

ПРИДНЕСТРОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Т.Г. ШЕВЧЕНКО

ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра электротехнологического оборудования

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Курс лекций

Тирасполь, 2016

УДК 621.317(075.8)
ББК 3221я73
Э45

Составитель: А.В. Костантиновская, преподаватель ПГУ

Рецензенты:

А.А. Мельниченко, гл. технолог НП ЗАО «Электромаш»
Т.И. Боровик, доцент кафедры ЭТО

Электротехнические измерения: Курс лекций/ Сост.
А.В.Костантиновская. -Тирасполь, 2016. – 112 с.

Курс лекций разработан в соответствии с рабочей программой курса «Электротехнические измерения» для студентов, обучающихся по направлению 230113 «Компьютерные системы и комплексы», для студентов дневной формы обучения, содержит теоретический материал по курсу и может быть использован студентами при подготовке к зачету по дисциплине.

УДК 621.317(075.8)
ББК 3221я73
Э45

Рекомендовано Научно-методическим советом ПГУ им.Т.Г. Шевченко

©□ А.В. Костантиновская,
составление, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Раздел 1. Государственная система обеспечения единства измерений	8
Тема 1.1. Основные виды и методы измерений, их классификация.	8
Тема 1.2. Метрологические показатели средств измерения	22
Раздел 2. Приборы формирования стандартных измерительных сигналов	33
Тема 2.1. Генераторы сигналов низкой частоты	33
Тема 2.2. Генераторы сигналов высокой частоты	38
Тема 2.3. Генераторы импульсных сигналов	41
Раздел 3. Измерение токов, напряжений, мощности	44
Тема 3.1. Измерение постоянных токов и напряжений электромеханическими измерительными приборами	44
Тема 3.2. Аналоговые электронные и цифровые вольтметры	49
Тема 3.3. Измерение мощности	58
Раздел 4. Исследование формы сигналов	64
Раздел 5. Измерение параметров сигналов	74

Тема 5.1. Измерение частоты и временных интервалов электрических сигналов	74
Тема 5.2. Измерение фазы гармонических сигналов	78
Раздел 6. Измерение амплитудно-частотных характеристик	82
Раздел 7. Измерение параметров компонентов электрических и электронных цепей	88
Тема 7.1. Измерение параметров с сосредоточенными параметрами	88
Тема 7.2. Измерение параметров полупроводниковых приборов	98
Раздел 8. Влияние измерительных приборов на точность измерений	103
Раздел 9. Автоматизация электротехнических измерений	107
Литература	112

ВВЕДЕНИЕ

Электротехнические измерения представляют собой совокупность электрических и электронных измерений, которые можно рассматривать как один из разделов метрологии.

Название «метрология» образовано от двух греческих слов: *metron* — мера и *logos* — слово, учение; дословно: учение о мере. В современном понимании **метрологией** называют науку об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Познание человеком окружающего мира неразрывно связано с наблюдениями и экспериментами. Получение информации в процессе наблюдения и экспериментов базируется на измерениях. На протяжении всей истории развития науки и техники перед человеком возникало и возникает множество вопросов и проблем, для решения которых необходимо располагать количественной информацией о том или ином свойстве объектов материального мира (явлении, процессе, веществе, изделии, теле и др.). Основным способом получения такой информации являются измерения, при правильном выполнении которых находится результат измерения, с большей или меньшей точностью отражающий интересующие свойства объекта познания.

В первой половине восемнадцатого века один из французских ученых Шарль Дюфе изобрел прибор для изучения электричества в атмосфере, и назвал его электроскоп. Спустя несколько лет, его дело подхватил российский естествоиспытатель М.Ломоносов. Проходит совсем немного времени и в середине 80-х годов восемнадцатого века такая наука, как электростатика совершает рывок вперед, после изобретения Ш.Кулоном его знаменитых крутильных весов (электростатическое устройство).

После изобретения первых электроизмерительных приборов начался период накопления знаний. В девятнадцатом веке они достигли такого объема, что науке об электричестве пришлось выделять отдельные отрасли. Такой отраслью стала электродинамика. В это время появляются первые гальванометры — приборы для измерения постоянного и переменного тока. Приблизительно в этот же период, ученые выделяют еще одну отрасль — электротехнику. Физики по всему миру начинают разрабатывать новые методы электроизмерений. Э.Ленц выделяет

баллистический метод, Кристи – мостовой, а И. Поггендорф – компенсационный.

Для любого измерения, необходимо оперировать какими-то эталонными величинами. Ученые начинают разрабатывать свои единицы измерений. Российский физик Б.С.Якоби предлагает за одну единицу электрического сопротивления принять сопротивление медной проволоки, длина которой составляла 25 футов (7,62 м), а вес равнялся 345 гран (22,5 г). Французскими академиками принимается несколько другая единица измерения – единица Бреге. Бреге равнялась сопротивлению стальной проволоки длиной 1 км. и диаметром 4 мм. В Германии за единицу сопротивления приняли ртутный столб и т.д.

Электротехника начала свое активное развитие после создания и применения в разных отраслях электрогенераторов. Лучшие электротехники девятнадцатого века трудились над созданием различных приборов для электроизмерений. Без этих технических средств дальнейшее развитие этой области стало бы невозможно.

В конце 19-го столетия двое французских ученых д'Арсонваль и Дебре создают первый высокочувствительный гальванометр. Спустя несколько лет российский физик М. Доливо-Добровольский создает приборы, которые позже лягут в основу современных вольтметров, амперметров и ваттметров.

Электротехнические измерения широко используются во многих сферах жизни:

- медицине (компьютерная томография, кардиографы и многое другое);
- торговле (весовая измерительная база, терминалы);
- службе ГИБДД (определение скорости перемещения автомобиля, основанное на эффекте Доплера);
- службе времени (разнообразные часы);
- быту (счетчики для учета расхода воды, электроэнергии, тепла).

Широкое использование электротехнических измерений в смежных отраслях, например в микроэлектронике для оценки изделий и технологических процессов, решает проблемы повышения качества продукции, а качество в условиях рыночной экономики является важнейшим показателем конкурентоспособности любого изделия.

Одно из главных направлений развития современной измерительной техники — переход на цифровые методы с использованием приборов с цифровым отсчетом, автоматизация измерений и дальнейшее развитие компьютерно-измерительных систем (КИС), в частности, их разновидности — виртуальных измерительных приборов.

Огромное количество измерений производится с помощью разных по принципу действия и точности средств измерения. Результаты измерений, полученные экспериментаторами в разное время и в разных местах, должны быть сопоставимы между собой. Необходимо также обеспечить единство измерений в масштабах каждого предприятия и всего государства в целом. Поэтому органы метрологического надзора наделены законодательными функциями. Нормативно-техническая документация разрабатывается с учетом норм и правил выполнения измерений, а также требований, направленных на достижение единства измерений. Порядок разработки и испытаний средств измерения, термины, определения, единицы физических величин и правила их применения унифицированы и узаконены стандартами Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) и другими обязательными к применению нормативными документами.

Электротехнические измерения играют существенную роль в развитии современной техники. Это касается не только таких отраслей, как электроэнергетика, радиоэлектроника, вычислительная техника, но и многих других, поскольку электронные измерительные приборы применяются для измерения любых электрических и неэлектрических величин. Создание информационно-измерительных систем (комплексов измерительной аппаратуры, объединенных с ЭВМ) позволило автоматизировать сложные технологические процессы и функционирование различных систем. Внедрение в измерительную технику микропроцессоров облегчило дальнейшее совершенствование средств измерений, создание нового поколения программируемых измерительных приборов с повышенными метрологическими характеристиками.

РАЗДЕЛ 1. ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Тема 1.1. Основные виды и методы измерений, их классификация

Основные метрологические понятия, термины и определения формулируются государственными стандартами.

Измерение — это процесс нахождения значения физической величины опытным путем с помощью специальных средств. В зависимости от способа получения результата измерения делятся на прямые и косвенные.

При **прямых измерениях** искомая физическая величина определяется непосредственно по индикатору прибора: напряжение - вольтметра, частота - частотомера, сила тока - амперметра. Прямые измерения очень распространены в метрологической практике.

При **косвенных измерениях** интересующая нас величина находится расчетным путем по результатам измерений других величин, связанных с искомой величиной определенной функциональной зависимостью. Например, измерив силу тока и напряжение, на основании известной формулы можно определить мощность:

$$P_x = U \cdot I \quad (1.1)$$

Косвенные измерения также часто применяются в метрологической практике.

Мера (прибор) — это средство измерения, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. По своему метрологическому значению, по той роли, которую они играют в деле обеспечения единообразия и верности, меры делятся на образцовые и рабочие.

Эталон — это тело или устройство самой высокой точности, служащее для воспроизведения и хранения единицы физической величины и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме. Примером точности эталона может служить Российский государственный эталон времени, погрешность которого за 30 000 лет не будет превышать 1с.

Физическая величина — это свойство, общее в качественном отношении для множества объектов, физических систем, их состояний и происходящих в них процессов, но индивидуальное в

количественном отношении для каждого из них. По принадлежности к различным группам физических процессов физические величины делятся на электрические, магнитные, пространственно-временные, тепловые и пр.

Значение физической величины — это оценка физической величины в принятых единицах измерения (например, 5 мА — значение силы тока, причем 5 — это числовое значение). Именно этот термин применяют для выражения количественной характеристики рассматриваемого свойства. Не следует говорить и писать «величина силы тока», «величина напряжения», поскольку сила тока и напряжение сами являются величинами. Следует использовать термины «значение силы тока», «значение напряжения».

Единица физической величины — это физическая величина, которой по определению присвоено стандартное числовое значение, равное единице. Единицы физических величин подразделяются на основные и производные.

Из-за большого диапазона реальных значений большинства измеряемых физических величин применение целых единиц не всегда удобно, поскольку в результате измерений получаются большие или малые их значения. Поэтому в системе измерений СИ (SI — система интернациональная) установлены дольные и кратные единицы.

Табл. 1.1. Электрические единицы измерения, используемые в электронике

Электрическая величина	Символ обозначения	Единицы измерения						Соотношение кратных (дольных) и основных единиц
		Основная			Кратная или дольная			
		Наименование	Русское обозначение	Международное обозначение	Наименование	Русское обозначение	Международное обозначение	
Сопrotивление	R, r	ом	Ом	Ω	мегаом килоом	МОм кОм	MΩ kΩ	1 МОм=10 ⁶ Ом 1 кОм=10 ³ Ом
Сила тока	I, i	ампер	А	A	миллиампер микроампер	мА мкА	mA μA	1 мА=10 ⁻³ А 1 мкА=10 ⁻⁶ А
Напряжение и ЭДС	U, u E, e	вольт	В	V	киловольт милливольт микровольт	кВ мкВ	kV μV	1 кВ=10 ³ В 1 мкВ=10 ⁻⁶ В
Мощность	P	ватт	Вт	W	гигаватт мегаватт микроватт	ГВт МВт мкВт	GW MW μW	1 ГВт=10 ⁹ Вт 1 МВт=10 ⁶ Вт 1 мкВт=10 ⁻⁶ Вт

Электрическая величина		Единицы измерения						Соотношение кратных (дольных) и основных единиц
		Основная			Кратная или доляная			
Наименование	Символ обозначения	Наименование	Русское обозначение	Международное обозначение	Наименование	Русское обозначение	Международное обозначение	
Емкость	С	фарад	Ф	F	микрофард нанофард пикофард	мкФ нФ пФ	μF nF pF	1 мкФ=10 ⁻⁶ Ф 1 нФ=10 ⁻⁹ Ф 1 пФ=10 ⁻¹² Ф
Индуктивность	L	генри	Гн	H	миллигенри микрогенри	мГн мкГн	mH μH	1 мГн=10 ⁻³ Гн 1 мкГн=10 ⁻⁶ Гн
Частота	F, f	герц	Гц	Hz	гигагерц мегагерц	ГГц МГц	GHz MHz	1 ГГц=10 ⁹ Гц 1 МГц=10 ⁶ Гц
Период	T	секунда	с	s	миллисекунда наносекунда	мс нс	ms ns	1 мс=10 ⁻³ с 1 нс=10 ⁻⁹ с
Длина волны	λ	метр	м	m	миллиметр сантиметр дециметр	мм см дм	mm cm dm	1 мм=10 ⁻³ м 1 см=10 ⁻² м 1 дм=10 ⁻¹ м
Сдвиг фаз	Δφ	радиан	рад	rad	градус	°	°	1° = $\frac{\pi}{180}$ рад

Кратная единица физической величины всегда больше основной (системной) в целое число раз. Например, мегаом (10⁶ Ом), киловольт (10³ В)

Доляная единица физической величины меньше основной (системной) в целое число раз. Например, нанофард (10⁻⁹ Ф), микроампер (10⁻⁶ А).

При выбранной оценке физической величины ее можно охарактеризовать истинным и действительным (измеренным) значением измеряемой физической величины.

Истинное (действительное) значение физической величины — это значение, свободное от погрешности. Нахождение истинного значения является главной проблемой метрологии, так как погрешности при измерении неизбежны. В связи с этим на практике за истинное значение принимают показание образцовой меры (прибора), погрешность которой пренебрежимо мала по сравнению с погрешностью применяемых рабочих мер (приборов).

Измеренное значение физической величины — это значение величины, отсчитанное по рабочей мере (прибору).

Измерительный прибор — это средство измерения, в результате применения которого измеряемая физическая величина становится показанием.

По принципу действия все измерительные приборы делятся на две группы:

- электромеханические приборы, используемые в цепях постоянного тока и на низких частотах;
- электронные приборы, используемые в цепях постоянного тока и во всем диапазоне частот.

По способу выдачи результата измерительные приборы подразделяются на:

- **аналоговые** (со стрелочным индикатором, самопишущие), показания которых являются непрерывной функцией измерения и измеряемой величины;
- **цифровые**, показания которых образуются в результате автоматического выработки дискретных сигналов измерительной информации, представленной в цифровой форме.

Различают измерительные приборы прямого действия и приборы сравнения.

Приборы прямого действия отображают измеряемую величину на индикаторе в единицах этой величины. Изменения рода физической величины в процессе измерения не происходит. К таким приборам относятся амперметры и вольтметры.

Приборы сравнения (компараторы) служат для сравнения измеряемых величин с величинами, значения которых известны. По назначению приборы делят на рабочие и образцовые.

Рабочие приборы предназначены только для измерения во всех областях хозяйственной деятельности.

Образцовые приборы служат для поверки и градуирования рабочих приборов. Погрешность измерения образцовых приборов на 1—2 порядка меньше по сравнению с рабочими приборами.

Стоимость прибора напрямую связана с погрешностью измерения: если прибор имеет погрешность в 10 раз меньше, то стоит такой прибор в 10 раз дороже. Использовать образцовые приборы для массовых измерений экономически нецелесообразно, поэтому в лабораториях учебных заведений и на производстве применяются в основном рабочие приборы.

Шкалы аналоговых измерительных приборов (АИП) классифицируются по следующим признакам:

1. По признаку равномерности различают:

- **равномерная шкала** — это шкала с делениями постоянной длины и с постоянной ценой деления (рис. 1.1, а). Такую шкалу

имеют электромеханические приборы только магнитоэлектрической системы;

- **неравномерная шкала** — это шкала с делениями непостоянной длины и с непостоянной ценой деления (рис. 1.1, б). Такую шкалу имеют электромеханические приборы выпрямительной, электромагнитной, электродинамической, ферродинамической, электростатической, термоэлектрической систем.

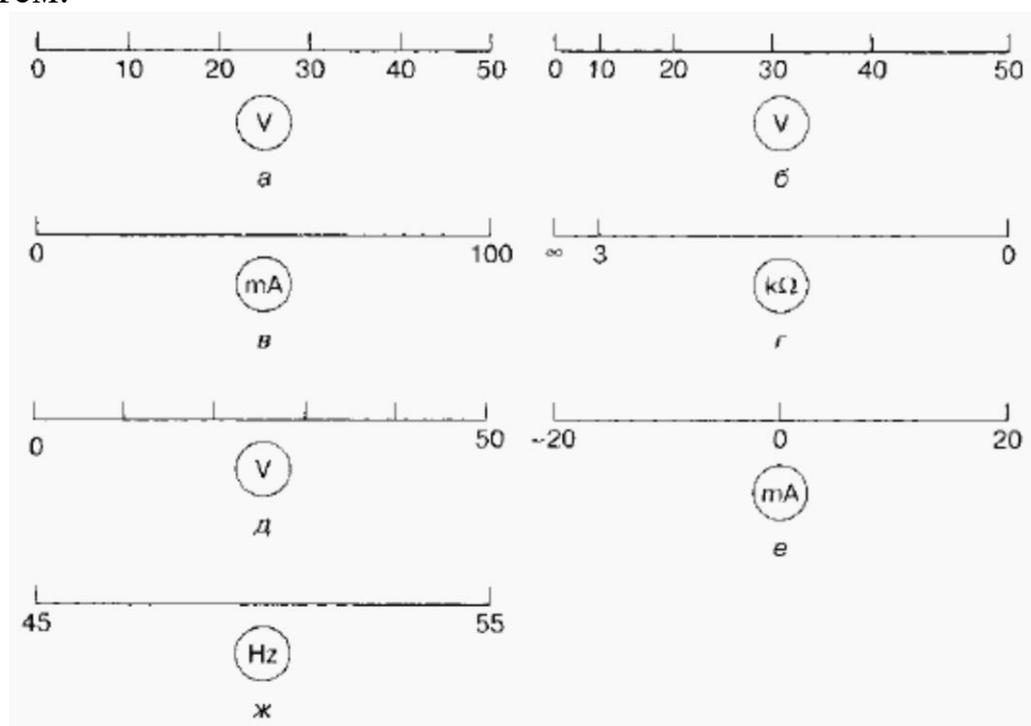


Рис. 1.1. Шкалы аналоговых приборов: равномерная (а), неравномерная (б), прямая (в), обратная (г), односторонняя (д), двухсторонняя (е), безнулевая (ж)

2. По признаку направления градуирования различают:

- **прямая шкала** градуирована слева направо, т.е. нуль на шкале расположен слева (рис 1.1, в). Такая шкала является самой распространенной в АИП;

- **обратная шкала** градуирована справа налево, т.е. нуль на шкале расположен справа (рис. 1.1, г). Такая шкала используется, например, в аналоговых мультиметрах при отсчете значения сопротивления резисторов и емкости конденсаторов.

3. По положению нуля на шкале и направлению движения стрелки индикатора различают:

- **односторонняя шкала** — это шкала, стрелка индикатора которой при измерении отклоняется только в одну сторону от нуля (рис. 1.1, д). Такая шкала является самой распространенной;

- **двухсторонняя шкала** — это шкала, стрелка индикатора при измерении которой отклоняется как влево, так и вправо от нуля. Причем отклонение влево от нуля дает отрицательные значения измеряемой величины, а отклонение вправо - положительные (рис. 1.1, е). Такую шкалу имеют индикаторы аналоговых измерительных мостов и гальванометры;

- **безнулевая шкала** — это шкала, на которой отсутствует нулевая отметка (рис. 1.1, ж). Такую шкалу имеют электромеханические частотомеры, генераторы, градуированные по частоте, длительности импульсов, временному сдвигу.

Электромеханические и электронные АИП достаточно широко распространены в метрологической практике. Приборы и их шкалы характеризуются рядом основных показателей.

Деление шкалы — это промежуток между двумя соседними отметками шкалы.

Цена деления шкалы (постоянная прибора), C , указывает число единиц измеряемой величины, приходящееся на одно деление шкалы (рис.1.2):

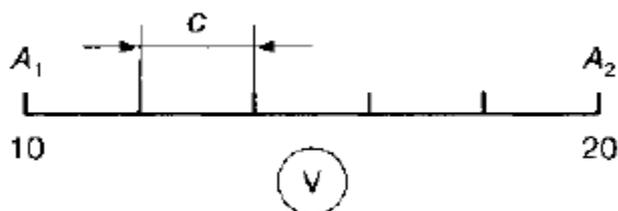


Рис. 1.2. Определение цены деления шкалы

$$C = \frac{A_2 - A_1}{n} \quad (1.2),$$

где A_1, A_2 — соседние оцифрованные деления;

n — количество делений между двумя цифрами.

На примере (см. рис. 1.2) цена деления шкалы составляет

$$C = \frac{(20 - 10)В}{5 \text{ дел}} = 2 \frac{В}{\text{дел}}$$

В неравномерной шкале цену деления находят на участке шкалы (только не в начале) между двумя соседними оцифрованными делениями.

Шаг шкалы — это интервал оцифрованных делений на шкале прибора. Например, если на шкале индикатора нанесены оцифрованные деления 0—10—20—30—40—50, то шаг шкалы равен 10.

Рабочий участок шкалы — это участок, в пределах которого погрешность прибора не выходит за указанный класс точности. Для шкалы миллиамперметра, показанной на рис. 1.3, а, рабочим участком является участок от 10 до 50 мА (он же является диапазоном измерения в однопредельном приборе). Для шкалы вольтметра, показанной на рис. 1.3 б, рабочим участком является участок от 3 до 10 В. На рабочем участке завод-изготовитель приборов гарантирует заявленный класс точности с первого оцифрованного деления шкалы аналогового индикатора.

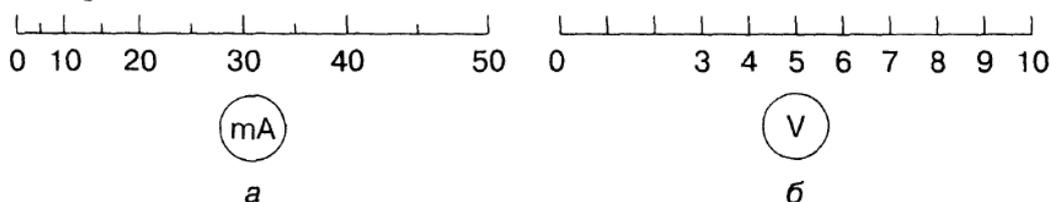


Рис. 1.3. Шкалы аналоговых приборов с разными рабочими участками: миллиамперметра (а), и вольтметра (б)

Чувствительность, s , прибора по измеряемому параметру показывает число делений шкалы, приходящееся на единицу измеряемой величины, т.е. является величиной, обратной цене деления:

$$s = \frac{1}{c} = \frac{n}{A_2 - A_1} \quad (1.3).$$

Чувствительность многопредельного прибора определяют на самом малом пределе измерения.

Частотный диапазон прибора необходимо знать для правильного его использования и для получения наименьшей погрешности измерения. **Частотный диапазон** — это полоса частот, в пределах которой погрешность прибора, полученная при изменении частоты сигнала, не превышает допустимого предела. Различают приборы для работы в цепях постоянного тока, переменного тока и универсальные (используемые в цепях постоянного и переменного тока).

Для приборов, работающих в цепях постоянного тока, частота равна нулю; для приборов, работающих в цепях переменного тока, и универсальных приборов на шкале индикатора и в паспорте обычно указывается частотный диапазон.

Внутреннее сопротивление прибора (амперметра, вольтметра) обычно указывается в паспорте и на лицевой панели (прямо или косвенно). Для амперметров характерно малое сопротивление R_A , для вольтметров — большое сопротивление R_B .

Потребляемая прибором мощность определяется по следующим формулам:

$$\text{для амперметра} \quad P_A = I_H^2 \cdot R_A \quad (1.4),$$

$$\text{а для вольтметров} \quad P_B = \frac{U_H^2}{R_B} \quad (1.5).$$

Чем потребляемая мощность меньше, тем точнее измерение.

Потребляемый вольтметром ток выражается формулой:

$$I_B = \frac{U_H}{R_B} \quad (1.6).$$

Падение напряжения на амперметре формулой:

$$U_A = I_H \cdot R_A \quad (1.7).$$

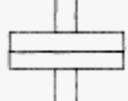
Рабочее положение прибора может быть разным:

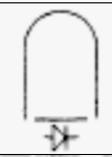
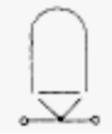
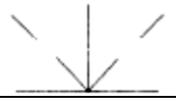
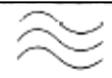
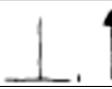
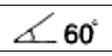
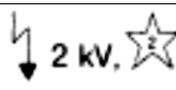
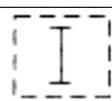
- горизонтальным (на шкале обозначается символами « \square » или « \rightarrow »);
- вертикальным (на шкале обозначается символами « \perp » или « \uparrow »);
- наклонным (на шкале обозначается символом « \sphericalangle » с указанием угла наклона).

Если допускается любое рабочее положение, то обозначение отсутствуют.

Расшифровка знаков и символов, указанных на лицевой панели прибора приведена в табл.1.2.

Табл. 1.2. Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов

Наименование	Условное обозначение	Буквенный шифр
Прибор магнитоэлектрической системы с подвижной рамкой		М
Прибор электромагнитной системы		Э
Прибор электродинамической системы		Д
Прибор ферродинамической системы		д
Прибор электростатической системы		С

Наименование	Условное обозначение	Буквенный шифр
Прибор выпрямительной системы с выпрямителем (выпрямительный прибор)		В
Прибор магнитоэлектрический с электронным преобразователем в измерительной цепи (электронный прибор)		-
Прибор термоэлектрической системы		Т
Прибор вибрационной системы		-
Ток постоянный		-
Ток переменный (однофазный)		-
Ток постоянный и переменный (универсальный прибор)		-
Ток трехфазный переменный (общее обозначение)		-
Прибор применять при вертикальном положении шкалы		-
Прибор применять при горизонтальном положении шкалы		-
Наклонное (с углом 60°)		-
Класс точности прибора, например 1,5		-
Напряжение испытательное, например 2 кВ		-
Прибор защищен от влияния внешнего магнитного поля (1 категория защищенности)		-
Прибор защищен от влияния внешнего электрического поля (1 категория защищенности)		-
Внимание! Смотри указания в инструкции по эксплуатации прибора		-

Предел измерений параметра, A_{max} — это наибольшее значение диапазона измерений.

Диапазон измерений параметра — это область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности АИП.

Методы измерений.

В зависимости от способа обработки экспериментальных данных измерений для получения результата различают следующие виды измерений – прямые, косвенные, совместные, совокупные и измерения корреляционно связанных величин.

Прямое измерение – это измерение, при котором значение величины находят непосредственно из опытных данных в результате выполнения измерения. Пример прямого измерения – измерение вольтметром напряжения источника.

Косвенное измерение – это измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. При косвенном измерении значение измеряемой величины получают путем решения уравнения $y = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – значения величин, полученные в результате прямых измерений.

Пример косвенного измерения – сопротивление резистора находят из выражения $R = \frac{U}{I}$, в которое подставляют результат прямых измерений падения напряжения U и протекающего через резистор тока I .

Совместные измерения – одновременные измерения значений нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними. Например, требуется определить градуировочную характеристику термосопротивления.

Совокупные измерения – одновременные измерения нескольких значений одноименных величин, при которых искомое значение находят решением системы уравнений, составленных по результатам прямых измерений различных сочетаний значений этих величин.

Измерение корреляционно связанных величин – измерение значений семейства функций $x_k(t)$ и $y_k(t)$, являющихся реализациями процессов P_x и P_y с целью установления взаимосвязи между ними.

Наличие взаимосвязи выражается в том, что в определенный момент времени t_0 существует такой параметр, при котором реализации процессов P_x и P_y совмещаются наилучшим способом.

Методы измерения выделяются в зависимости от их взаимодействия с мерой, их классификация показана на рис. 1.4.

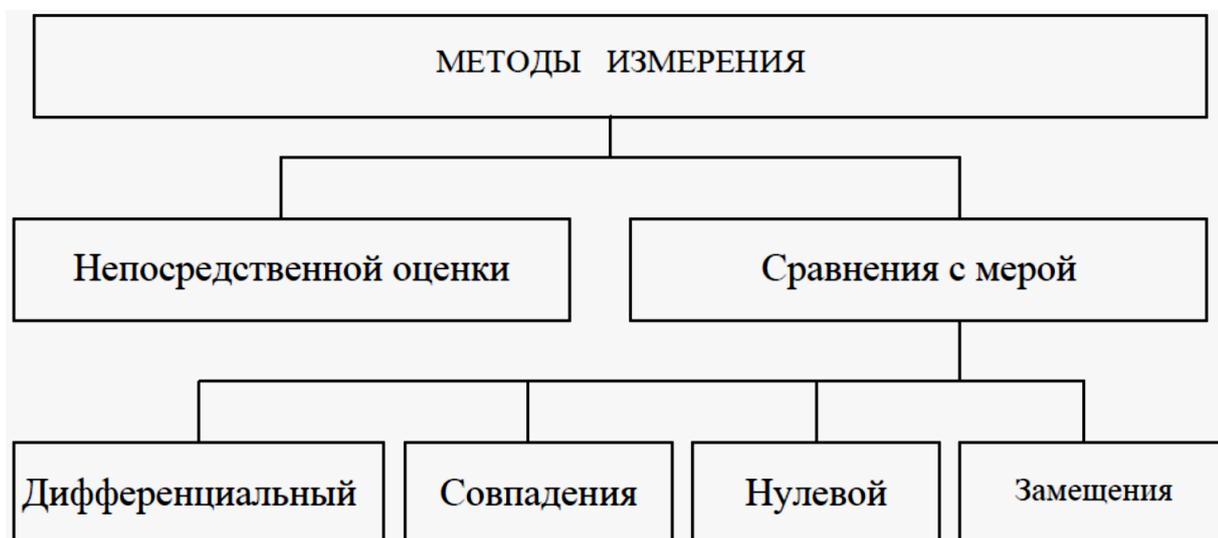


Рис. 1.4. Классификация методов измерения

Метод измерения - совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Измерения производятся одним из двух методов: методом непосредственной оценки или методом сравнения с мерой.

Метод непосредственной оценки - метод, при котором значение искомой величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора. Пример метода непосредственной оценки - измерение тока амперметром.

Метод сравнения с мерой - метод измерения, при котором измеряемую искомую величину сравнивают с однородной величиной, воспроизводимой мерой. Метод сравнения с мерой имеет ряд разновидностей:

- дифференциальный метод,
- нулевой метод,
- метод замещения,
- совпадения.

Нулевой метод – это метод, в котором разность между измеряемой величиной и воспроизводимой мерой сводится к 0.

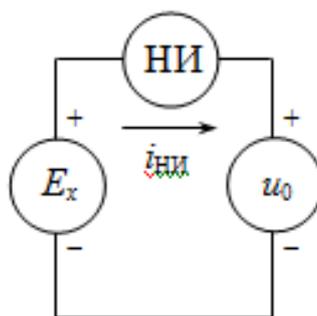


Рис. 1.5. Структурная схема нулевого метода,

где $НИ$ – нуль-индикатор; E_x – объект измерения; U_0 – мера.

Полярность важна: здесь устройства включены встречно; мы подбираем такую меру, выходной сигнал которой равен сигналу объекта измерения (т.е. $i_{НИ}=0$). Разность измеряемой величины и величины воспроизводимой мерой в процессе измерения сводится к нулю, что фиксируется с помощью нуль-индикатора. Результат измерения равен значению меры.

Метод обеспечивает высокую точность, если мера обладает высокой точностью, а НИ – высокой чувствительностью. Обычно

$$\frac{\Delta}{E_x} \approx 1\%$$

Подобный метод лежит в основе построения измерительных мостов. Достоинство метода – точность.

При **дифференциальном методе**, так же как и при нулевом, измеряемая величина находится путем измерения разницы между искомой величиной и непосредственно или косвенно с мерой.

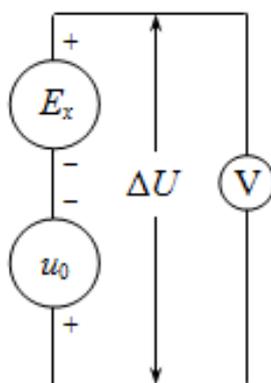


Рис 1.6. Структурная схема дифференциального метода.

Разность измеряемой величины и величины воспроизводимой мерой измеряется с помощью средства измерения – вольтметра (на рис. 1.6.). Результат определяется как сумма показания средства

измерения и величины воспроизводимой мерой $E_x = \Delta U + U_0$. Для этого метода

$$\frac{\Delta}{E_x} = \frac{\Delta}{\Delta U + U_0} \approx 0,01\%.$$

Метод замещения – метод, при котором измеряемая величина замещается воспроизведенной мерой.

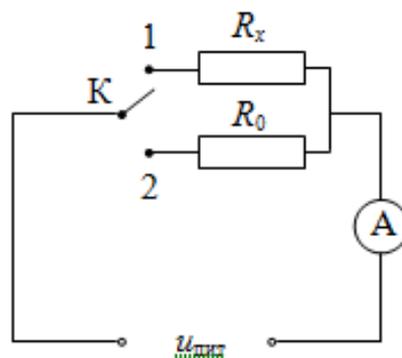


Рис 1.7. Структурная схема метода замещения,

где R_x – объект измерения; R_0 – мера.

В зависимости от положения ключа K можно записать уравнение:

$$i_x R_x = u_{пит}, \quad i_0 R_0 = u_{пит}.$$

Откуда

$$i_x R_x = i_0 R_0,$$

и

$$R_x = \frac{i_0 \cdot R_0}{i_x} \quad (1.8)$$

Примером применения метода замещения может быть измерение сравнительно большого электрического сопротивления на постоянном токе путем поочередного измерения силы тока, протекающего через контролируемый резистор и образцовый. Питание цепи при измерениях должно производиться от одного и того же источника тока. Сопротивление источника тока и прибора, измеряющего ток, должно быть очень мало по сравнению с изменяемым и образцовым сопротивлением.

Метод совпадений – это такой метод, при котором измеряемая величина определяется по периодическим сигналам или специальным шкалам. Фигура Лиссажу – классический пример метода совпадений.

Классификация измерительных приборов.

Электроизмерительные приборы различаются по следующим признакам:

- по роду измеряемой величины;
- по роду тока;
- по степени точности;
- по принципу действия;
- по способу получения отсчета;
- по характеру применения.

Кроме этих признаков, электроизмерительные приборы можно также отличать:

- по способу монтирования;
- по способу защиты от внешних магнитных или электрических полей;
- по выносливости в отношении перегрузок;
- по пригодности к применению при различных температурах;
- по габаритным размерам и другим признакам.

Для измерения электрических величин применяются различные электроизмерительные приборы, а именно:

- тока — амперметр;
- напряжения — вольтметр;
- электрического сопротивления — омметр, мосты сопротивления;
- мощности — ваттметр;
- электрической энергии — счетчик;
- частоты переменного тока — частотомер;
- коэффициента мощности — фазометр.

По роду тока приборы делятся на приборы постоянного тока, приборы переменного тока и приборы постоянного и переменного тока.

По степени точности приборы делятся на девять классов: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5 и 4. Цифры указывают значение допустимой приведенной погрешности в процентах.

По принципу действия приборы подразделяются на: магнитоэлектрические; электромагнитные; электродинамические (ферромагнитные); индукционные и другие.

По способу получения отсчета приборы могут быть с непосредственным отсчётом и самозаписывающие.

По характеру применения приборы делятся на стационарные, переносные и для подвижных установок.

Тема 1.2. Метрологические показатели средств измерений.

Общими характеристиками электроизмерительных приборов являются их погрешности, вариация показаний, чувствительность к измеряемой величине, потребляемая мощность, время установления показаний и надежность.

Вариация показаний прибора — это наибольшая разность показаний прибора при одном и том же значении измеряемой величины. Она определяется при плавном подходе стрелки к испытываемой отметке шкалы при движении ее один раз от начальной, а второй раз от конечной отметок шкалы. Вариация показаний характеризует степень устойчивости показаний прибора при одних и тех же условиях измерения одной и той же величины. Она приближенно равна удвоенной погрешности от трения, так как причиной вариации в основном является трение в опорах подвижной части.

Чувствительность электроизмерительного прибора к измеряемой величине x называется производная от перемещения указателя a по измеряемой величине x . Перемещение указателя a , которое выражается в делениях или миллиметрах шкалы, для обширной группы приборов определяется, в первую очередь, углом отклонения подвижной части измерительного механизма. Кроме того, оно зависит от типа отсчетного устройства и его характеристик (стрелочный или световой указатель, длина шкалы, число делений шкалы и др.).

Чувствительность собственно механизма приборов этой группы (независимо от применяемого отсчетного устройства) равна:

$$S' = da/dx \quad (1.9)$$

Выражением определяется чувствительность прибора в данной точке шкалы. Если чувствительность постоянна, т.е. не зависит от измеряемой величины, то ее можно определить из выражения

$$S = a/x \quad (1.9)$$

В этом случае чувствительность прибора численно равна перемещению указателя, соответствующему единице измеряемой величины. У приборов с постоянной чувствительностью перемещение указателя пропорционально измеряемой величине, т.е. шкала прибора равномерна.

Чувствительность прибора имеет размерность, зависящую от характера измеряемой величины, поэтому, когда пользуются

термином «чувствительность», говорят «чувствительность прибора к току», «чувствительность прибора к напряжению» и т.д. Например, чувствительность вольтметра к напряжению равна 10 дел./В.

Величина, обратная чувствительности, называется **ценой деления** (постоянной) прибора. Она равна числу единиц измеряемой величины, приходящихся на одно деление шкалы:

$$c = \frac{1}{s} \quad (1.10)$$

Например, если $S=10$ дел./В, то $C=0,1$ В/дел.

При включении электроизмерительного прибора в цепь, находящуюся под напряжением, прибор потребляет от этой цепи некоторую мощность. В большинстве случаев эта мощность мала с точки зрения экономии электроэнергии. Но при измерении в маломощных цепях в результате потребления приборами мощности может измениться режим работы цепи, что приведет к увеличению погрешности измерения. Поэтому малое потребление мощности от цепи, в которой осуществляется измерение, является достоинством прибора.

Мощность, потребляемая приборами в зависимости от принципа действия, назначения прибора и предела измерения, имеет самые различные значения и для большинства приборов лежит в пределах от 10^{-12} до 15 Вт.

После включения электроизмерительного прибора в электрическую цепь до момента установления показаний прибора, когда можно произвести отсчет, проходит некоторый промежуток времени (время успокоения). Под временем установления показаний следовало бы понимать тот промежуток времени, который проходит с момента изменения измеряемой величины до момента, когда указатель займет положение, соответствующее новому значению измеряемой величины. Однако если учесть, что всем приборам присуща некоторая погрешность, то время, которое занимает перемещение указателя в пределах допустимой погрешности прибора, не представляет интереса.

Под временем установления показаний электроизмерительного прибора понимается промежуток времени, прошедший с момента подключения или изменения измеряемой величины до момента, когда отклонение указателя от установившегося значения не превышает 1,5% длины шкалы.

Время установления показаний для большинства типов показывающих приборов не превышает 4 с.

Цифровые приборы характеризуются **временем измерения**, под которым понимают время с момента изменения измеряемой величины или начала цикла измерения до момента получения нового результата на отсчетном устройстве с нормированной погрешностью.

Под **надежностью электроизмерительных приборов** понимают способность их сохранить заданные характеристики при определенных условиях работы в течение заданного времени. Если значение одной или нескольких характеристик прибора выходит из заданных предельных значений, то говорят, что имеет место отказ. Количественной мерой надежности является минимальная вероятность безотказной работы прибора в заданных промежутке времени и условиях работы.

Вероятностью безотказной работы называется вероятность того, что в течение определенного времени T непрерывной работы не произойдет ни одного отказа. Время безотказной работы указано в описаниях приборов. Часто пользуются приближенным значением этого показателя, определяемым отношением числа приборов, продолжающих после определенного времени T безотказно работать, к общему числу испытываемых приборов. Например, для амперметров и вольтметров типа Э8027 минимальное значение вероятности безотказной работы равно 0,96 за 2000 ч. Следовательно, вероятность того, что прибор данного типа сохранит заданные характеристики после 2000 ч работы, составляет не менее 0,96, иными словами, из 100 приборов данного типа после работы в течение 2000 ч, как правило, не более четырех приборов будут нуждаться в ремонте,

К показателям надежности относят также **среднее время безотказной работы прибора**, которое определяется как среднее арифметическое время исправной работы каждого прибора.

Обычно, когда приборы начинают выпускать серийно, некоторая небольшая часть их отбирается для испытаний на надежность. Показатели надежности, определенные по результатам этих испытаний, присваивают всей серии приборов.

Гарантийным сроком называют период времени, в течение которого завод-изготовитель гарантирует исправную работу изделия при соблюдении правил эксплуатации прибора. Например,

для микроамперметров типа М266М предприятие-изготовитель гарантирует безвозмездную замену или ремонт прибора в течение 36 мес со дня отгрузки с предприятия, а для частотомеров типа Э373 этот срок составляет 11 лет.

Погрешности измерений.

При любом измерении физической величины неизбежны погрешности, какими бы точными и совершенными ни были средства и методы измерения и как бы тщательно ни выполнялись эти измерения. Поэтому истинное значение физической величины определяется только приблизительно.

Погрешность характеризует несовершенство измерения.

Характеристикой качества измерения является точность измерения ν , отражающая меру близости результата измерения к истинному значению измеряемой физической величины.

Вопросы погрешности являются основополагающими в теории и практике метрологии, в которой используются два понятия: погрешность результата измерения и погрешность средства измерения. Эти понятия близки друг к другу и классифицируются по одинаковым признакам.

Погрешность результата измерения — это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой физической величины. Так как истинное значение измеряемой величины неизвестно, то при количественной оценке погрешности измерения используют значение физической величины, найденное экспериментально и настолько близкое к истинному значению, что в реальной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

Погрешность средства измерения — это разность показаний средства измерения и истинного (действительного) значения измеряемой физической величины. Она характеризует точность измерений, выполняемых с помощью данного прибора.

В электротехнических измерениях различают несколько видов погрешностей, которые можно разделить на две большие группы: основная и дополнительная.

Основная погрешность определяется при нормальных условиях работы (температуре, давлении и влажности окружающей среды, частоте, форме и значению питающего напряжения).

Дополнительная погрешность появляется при отклонении значений, влияющих на результат измерения, от нормальных.

Основная погрешность включает в себя две составляющие: систематическую и случайную.

Систематическая погрешность при повторных измерениях одной и той же величины одним и тем же прибором остается постоянной или изменяется по определенному закону. В обоих случаях она легко обнаруживается и может быть исключена из результата измерений. Источниками систематической погрешности могут быть средство измерения (инструментальная составляющая), метод измерения (методическая составляющая), оператор (субъективная составляющая).

Практическими рекомендациями по уменьшению систематической погрешности являются предварительная установка показания индикатора на нуль, предварительная калибровка прибора и введение поправки.

Предварительная (перед измерением) установка показания индикатора на нуль может производиться с помощью:

- механического корректора (для электромеханических приборов);

- регулировочного потенциометра, обозначенного символом «▶0◀» (для электронных приборов — аналоговых и цифровых).

Предварительная калибровка (только для электронных приборов) выполняется с помощью регулировочного потенциометра, выведенного на лицевую панель прибора и обозначенного символом «▼». Значение калибровочного сигнала обычно указывается на шильдике (лицевая панель) и в паспорте прибора.

Случайная погрешность при повторных измерениях изменяется случайным образом. Она резко выделяется на фоне систематической погрешности. Основным способом уменьшения случайной погрешности является обработка результатов измерений методами статистики и теории вероятности.

Погрешности прямых измерений.

Прямое измерение — это измерение, при котором искомое значение физической величины определяют непосредственно по индикатору прибора. Часто под прямым понимают такое измерение, при котором промежуточное преобразование не

производится. Примером прямых измерений может служить измерение фазового сдвига и напряжения известными приборами (фазометрами и вольтметрами).

Абсолютная погрешность измерения, Δ — это отклонение результата измерения (показание рабочего прибора A_u) от истинного значения (показание образцового прибора $A_{обр}$), взятое по модулю:

$$\Delta = |A_{обр} - A_u| \quad (1.11)$$

Истинное значение измеряемой величины неизвестно, поэтому вместо него используют так называемое действительное значение — значение измеряемой величины, найденное экспериментальным путем с помощью образцового прибора. На практике значение погрешности измерения можно оценить только приближенно.

Для получения действительного значения измеряемой величины в ряде случаев учитывают погрешности средств измерений путем введения поправок.

Поправка, c — абсолютная погрешность, взятая с обратным знаком:

$$c = -\Delta \quad (1.12)$$

Абсолютная погрешность, характеризуя значение полученной погрешности, не определяет качество проведенного измерения. Поэтому используют действительную относительную погрешность измерения.

Действительная относительная погрешность измерения, γ_d — отношение абсолютной погрешности измерения к показанию рабочего прибора, выраженное в процентах:

$$\gamma_d = \frac{|\Delta|}{A} \cdot 100 \quad (1.13)$$

Действительная относительная погрешность измерения связана обратной зависимостью с **точностью измерения** ν — высокой точности измерения соответствует малая погрешность:

$$\nu = \frac{1}{\gamma_d} \quad (1.14)$$

Приведенная относительная погрешность, $\gamma_{пр}$ — это отношение наибольшей абсолютной погрешности к некоторому нормирующему (номинальному) значению выраженное в процентах:

$$\gamma_{пр} = \frac{|\Delta_{max}|}{A_H} \cdot 100 \quad (1.15)$$

Обобщая полученные сведения, можно утверждать, что в широко распространенной односторонней шкале номинальное значение всегда равно верхнему пределу шкалы прибора ($A_n = A_{max}$). В многопредельных амперметрах и вольтметрах с односторонней шкалой переключатель пределов указывает номинальное значение.

Анализ формул позволяет представить график зависимости погрешностей показания измерительного прибора на примере использования прибора с односторонней шкалой.

Из графика зависимости $\gamma_d = f(A)$ (рис. 1.8) следует важный вывод, имеющий практическое значение: действительная относительная погрешность измерения максимальна в 1-й четверти шкалы аналогового прибора и минимальна в 4-й. Следовательно, для получения наименьшей погрешности измерения необходимо использовать 4-ю (в крайнем случае 3-ю) четверть шкалы.

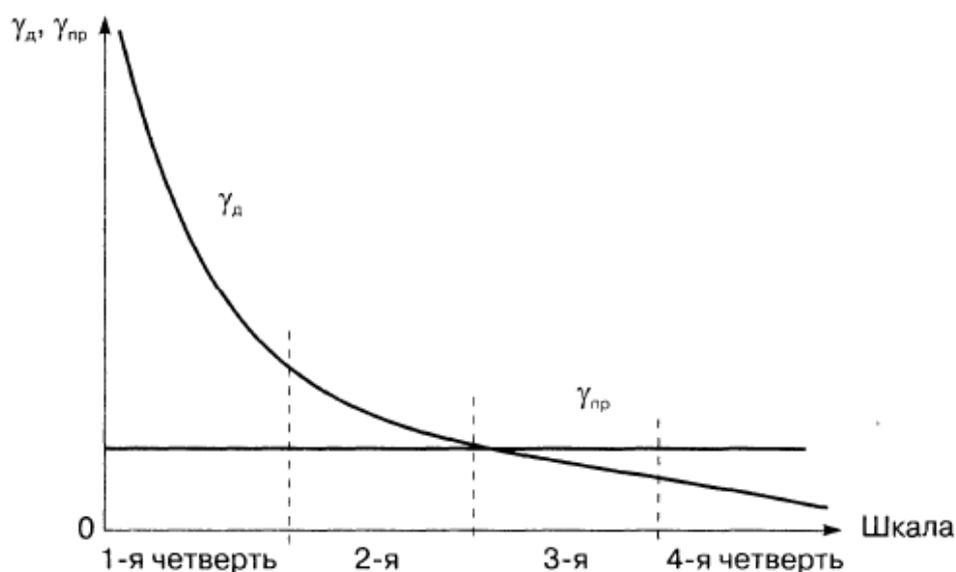
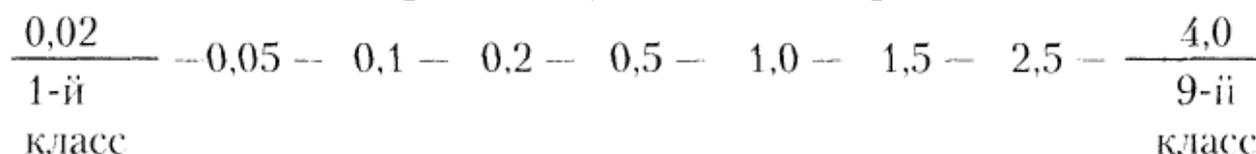


Рис. 1.8. График зависимости погрешностей γ_d и $\gamma_{пр}$ от показания измерительного прибора

Из графика зависимости $\gamma_{пр} = f(A)$ следует, что приведенная относительная погрешность не зависит от показания аналогового прибора, поэтому величина положена в основу **класса точности** электромеханических приборов.

Электромеханические приборы делятся на девять классов точности. Класс точности всегда указывается на лицевой панели

(цифрой без знака «%») и является сравнительной характеристикой различных электромеханических приборов.

Класс точности прибора, характеризующая приведенную относительную погрешность, не является непосредственным показателем точности измерения, так как существующая зависимость между действительной и приведенной относительными погрешностями выражается формулой:

$$\gamma_d = \gamma_{пр} \frac{A_H}{A} \quad (1.16)$$

Из формулы следует, что погрешность измерения зависит не только от класса точности ($\gamma_{пр}$), но и от показания прибора A (положения стрелки индикатора).

Погрешности косвенных измерений.

Косвенное измерение — это измерение, при котором искомое значение величины определяется путем выполнения определенных математических операций, т.е. оценка **погрешности косвенных измерений** производится по формуле:

$$\gamma_d = |k_1 \cdot \gamma_{d1}| + |k_2 \cdot \gamma_{d2}| + \dots + |k_n \gamma_{dn}| \quad (1.17)$$

где k_1, k_2, \dots, k_n — показатели степени (могут быть положительными, отрицательными, целыми или дробными числами); $\gamma_{d1}, \gamma_{d2}, \dots, \gamma_{dn}$ — относительные действительные погрешности прямых измерений.

Анализ формулы позволяет сделать вывод, что при косвенных измерениях погрешность, как правило, больше, чем при прямых измерениях.

Рассмотрим пример. Напряжение 40 В измерено вольтметром с односторонней шкалой; номинальное значение прибора — 50 В, 6-й класс точности (1,0%). Сила тока 2 мА измерена амперметром с односторонней шкалой; номинальным значением прибора — 3 мА, 6-й класс точности (1,0%). Определить значение измеренного сопротивления резистора, а также относительную и абсолютную погрешности измерения сопротивления резистора.

Решение. В основе измерения сопротивления резистора лежит формула закона Ома: $R = \frac{U}{I} = \frac{40 \text{ В}}{2 \cdot 10^{-3} \text{ А}} = 20000 \text{ Ом} = 20 \text{ кОм}$

Измерение сопротивления резистора косвенное, поэтому погрешность измерения определим по формуле:

$$\gamma_{dR} = |k_1 \gamma_{d1}| + |k_2 \gamma_{d2}|$$

Формулу $R = \frac{U}{I}$

запишем в виде $R = U^1 \cdot I^{-1}$

Из формулы следует, что $k_1=1$, $k_2=-1$.

Погрешность $\gamma_{д1}$ не что иное, как действительная относительная погрешность прямого измерения напряжения, а $\gamma_{д2}$ — действительная относительная погрешность прямого измерения силы тока, которые находим по формуле:

$$\gamma_{дU} = \gamma_{прВ} \cdot \frac{U_{н}}{U} = 1\% \cdot \frac{50 \text{ В}}{40 \text{ В}} = 1,25\%$$

$$\gamma_{дI} = \gamma_{прА} \cdot \frac{I_{н}}{I} = 1\% \cdot \frac{3 \text{ мкА}}{2 \text{ мкА}} = 1,5\%$$

Подставив полученные значения в формулу $\gamma_{дR}$ получим:

$$\gamma_{дR} = |1 \cdot 1,25\%| + |-1 \cdot 1,5\%| = 2,75\%$$

Используя формулу в виде

$$\gamma_{дR} = \frac{|\Delta R|}{R} \cdot 100$$

Найдем ΔR

$$\Delta R = \frac{\gamma_{дR} \cdot R}{100} = \frac{2,75\% \cdot 20 \text{ кОм}}{100} = 0,55 \text{ кОм}$$

Относительные погрешности могут быть положительными и отрицательными.

Большинство электронных приборов класса точности не имеют. Допустимые значения абсолютной и действительной относительной погрешностей приводятся в техническом паспорте в виде конкретной цифры или формулы.

Поверка электроизмерительных приборов

Поверкой средств измерений называют определение погрешности приборов, а также целый комплекс операций, направленный на определение состояния средства измерения. Целью поверки является определение возможности дальнейшей эксплуатации средства измерения.

В большинстве случаев определение погрешности производится методом сличения показаний поверяемого прибора с показаниями образцового. Во всех случаях меры, преобразователи и приборы, имеющие более высокий класс точности, являются образцовыми, для устройств с более низким классом точности.

Есть ряд мероприятий, который выполняется при поверке для средств измерений любого исполнения.

Последовательность операций при поверке электроизмерительного прибора:

1. Внешний осмотр преследует две основные цели: определение требований предъявляемых к прибору и выявление механических дефектов, которые могут привести к искажению измерительной информации или выходу его из строя.

По условным обозначениям, нанесенным на шкалах приборов, можно определить требования к их эксплуатации, например его нормальное положение при работе, номинальное напряжение и ток, схему подключения в цепь. Полученная информация используется при поверке.

При осмотре обращают внимание на наличие трещин в корпусе и на лицевой стороне прибора, состояние штепсельных разъемов и контактной системы. Все детали внутри должны быть посажены на место, под стеклом не должно быть посторонних предметов. Корректор должен позволять перемещать стрелку на 5% длины шкалы в любую сторону, а также устанавливать стрелку на ноль.

Если совместно с прибором используются масштабные преобразователи, последние должны быть также осмотрены, их класс точности должен быть выше, чем у поверяемого прибора.

При выявлении вышеуказанных дефектов прибор не допускается к дальнейшей эксплуатации.

2. Выбор метода проверки производится в зависимости от типа, характера конструкции прибора различными способами: сличают показания поверяемого прибора с показаниями образцового прибора при измерении одной и той же величины либо измеряют отдельные параметры данного прибора, определяющие правильность его работы.

Погрешность приборов классов 0,05 – 0,5, пригодных для постоянного тока, проверяют компенсационным методом на постоянном токе.

Погрешность приборов класса 0,1 – 0,5, пригодного для постоянного и переменного тока, производится на постоянном токе компенсационным, а на переменном токе – термоэлектрическим методом.

Погрешность приборов классов 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 определяют методом счисления с образцовыми приборами непосредственной оценки или любым более точным методом.

Допускается также поверка всех приборов класса 0,5 методом счисления с образцовым прибором класса 0,1. Поверка рабочих приборов класса 0,5 может производиться методом сличения с образцовым прибором класса 0,2 с длиной шкалы не менее 300 мм при условии введения поправок к показаниям последних.

При выборе образцовых приборов необходимо учитывать ряд общих требований, выполнение которых имеет существенное значение для обеспечения правильности результатов, он должен быть более точным, чем проверяемый. Допускаемая погрешность образцового прибора в том случае, когда поправки к его показаниям не учитываются, должна быть по крайней мере в 5 раз меньше допускаемой погрешности проверяемого прибора.

3. Определение погрешностей прибора. При поверке измерительных приборов выявляются степень точности их показаний. Неточное показание дают неправильное представление об измеряемой величине, а, следовательно, и о характере работы той или иной электрической установки. Высокая точность соответствует малой погрешности измерений. Определение погрешностей прибора является основной операцией процесса поверки. Погрешности имеют следующую классификацию:

- абсолютная погрешность, определяется как разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины;

- относительная погрешность – это отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины;

- приведенная погрешность измеряется как отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению.

Основная приведенная погрешность на всех отметках шкалы не должна превышать класса точности приборов.

Приборы с погрешностью, превышающей допустимую, к эксплуатации не допускаются.

РАЗДЕЛ 2. ПРИБОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ СТАНДАРТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

Тема 2.1. Генераторы сигналов низкой частоты

Для радиотехнических и электротехнических измерений характерны особенности: широкий диапазон частот, многообразие форм сигналов и видов модуляции.

Генератор сигналов — это устройство, позволяющее получать сигнал определённой природы (электрический, акустический или другой), имеющий заданные характеристики (форму, энергетические или статистические характеристики и т. д.). Генераторы широко используются для преобразования сигналов, для измерений и в других областях. Состоит из источника (устройства с самовозбуждением, например усилителя охваченного цепью положительной обратной связи) и формирователя (например, электрического фильтра).

В радиотехнике и электронике генератор используется для получения сигнала с заданными параметрами статических и энергетических показателей, а также — применяется для преобразования сигналов различной природы и измерения их качественных характеристик.

Генераторы разделяют:

1. По форме сигнала:

- Г2 — шумовых сигналов;
- Г3 — синусоидальных низкочастотных (НЧ) сигналов;
- Г4 — синусоидальных высокочастотных (ВЧ) сигналов;
- Г5 — импульсных сигналов;
- Г6 — сигналов специальной формы.

2. По частоте:

- НЧ (20 Гц — 200 кГц);
- ВЧ (200 кГц — 300 МГц);
- сверхвысокочастотных (СВЧ) (выше 300 МГц);
- с коаксиальным выходом на частотах 300 МГц — 1 ГГц;
- с волновым выходом на частотах более 10 ГГц.

3. По виду модуляции:

- с амплитудной;
- частотной;
- фазовой;
- импульсной.

Стандартный генератор сигналов состоит из двух составных частей - источника и формирователя. Источник производит сигнал, тогда как формирователь изменяет его, с целью получения заданных параметров: усиливает, уменьшает, меняет частоту.

Генераторы низких, высоких и сверхвысоких частот являются источниками гармонического сигнала.

Низкочастотные генераторы.

Низкочастотные генераторы, или генераторы низких частот (ГНЧ), являются источниками синусоидального сигнала в разных диапазонах частот: $F < 20$ Гц (инфразвуковые), 20 Гц ... 20 кГц (звуковые), 20...200 кГц (ультразвуковые). Диапазон частот может быть расширен до $F > 200$ кГц. В приборах некоторых типов наряду с синусоидальным сигналом вырабатывается сигнал, называемый меандром.



Рис. 2.1. Структурная схема аналогового ГНЧ

ГНЧ применяются для всестороннего исследования трактов радиоприемных устройств, для питания мостов переменного тока и пр.

Задающий генератор определяет форму и все частотные параметры сигнала: диапазон частот, погрешность установки частоты, нестабильность частоты, коэффициент нелинейных искажений.

Если на лицевой панели прибора форма сигнала не указана, то она всегда синусоидальная. В качестве задающего используются генераторы типа RC , колебательная система которых состоит из фазирующих RC - цепей. Весь частотный диапазон генератора поделен на 3—4 поддиапазона. Каждому поддиапазону

соответствует определенное значение сопротивления резистора (рис. 2.2), что позволяет изменять частоту дискретно.

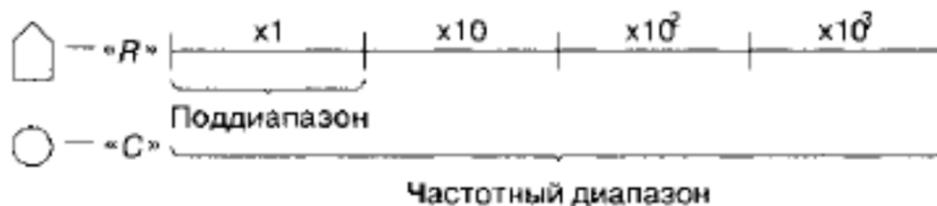


Рис. 2.2. Принцип установки частоты задающего генератора

Плавная установка частоты осуществляется конденсатором переменной емкости, который обслуживает все поддиапазоны. Задающие генераторы типа RC просты, дешевы, имеют малый коэффициент нелинейных искажений и малые массогабаритные размеры.

Формула частоты колебаний генератора типа RC:

$$F = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (2.1)$$

В некоторых ГНЧ дискретное регулирование частоты осуществляется не резистором, а конденсатором. Тогда плавная установка частоты обеспечивается переменным резистором-потенциометром. Усилитель ослабляет влияние последующих блоков на задающий генератор, делая его частотные параметры более качественными, обеспечивает усиление сигнала по напряжению (мощности) и позволяет плавно изменять напряжение на выходе.

Согласующий трансформатор предназначен для ступенчатого согласования выходного сопротивления генератора с сопротивлением подключаемой нагрузки.

Наличие у трансформатора средней точки (с.т.) позволяет получать два одинаковых по значению, но противоположных по фазе выходных напряжения (рис. 2.3).

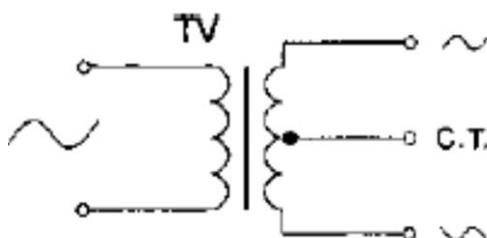


Рис. 2.3. Электрическая принципиальная схема согласующего трансформатора со средней точкой

Выходной согласующий трансформатор используется в генераторах с повышенным уровнем выходной мощности. У

большинства низкочастотных генераторов выходной трансформатор отсутствует.

Переключатель нагрузки обеспечивает согласование выходного сопротивления $D_{вых}$ генератора с сопротивлением нагрузки R_n . Если не выполняется согласование, то напряжение на выходе не соответствует установленному по индикатору генератора, генератор даже может выйти из строя. Наиболее распространенными значениями $D_{вых}$ являются 5, 50, 600 и 6000 Ом. Для согласования сопротивлений по выходу 1 в комплекте с прибором поставляется специальная нагрузка 50 Ом с кабелем.

Контроль выходного напряжения обеспечивается электронным вольтметром типа У—Д либо электромеханическим вольтметром выпрямительной системы. Индикатор выходного напряжения всегда показывает среднеквадратичное значение синусоидального сигнала.

Аттенюатор обеспечивает получение на выходе разных по значению напряжений, изменяющихся дискретно. При этом входное и выходное сопротивления аттенюатора не меняются и согласование не нарушается. Иногда ослабление указывается не в вольтах, а в децибелах.

Ослабление, вносимое аттенюатором, рассчитывается по формуле:

$$U_{вых}(\text{дБ}) = 20 \cdot \lg \frac{U_{вх}(\text{В})}{U_{вых}(\text{В})}, \quad (2.2)$$

где $U_{вх}$ (В) — напряжение на входе аттенюатора; $U_{вых}$ (В) — напряжение на выходе аттенюатора.

Рассмотрим два примера.

Пример 1. Определить напряжение на выходе генератора в вольтах, если на входе оно составляет 1 В, а на выходе $U = 60$ дБ. На основании формулы запишем:

$$60 \text{ дБ} = 20 \cdot \lg \frac{1 \text{ В}}{U_{вых}(\text{В})}; 3 = \lg \frac{1 \text{ В}}{U_{вых}(\text{В})}; 1000 = \frac{1 \text{ В}}{U_{вых}(\text{В})};$$
$$U_{вых}(\text{В}) = \frac{1}{1000} = 0,001 \text{ В} = 1 \text{ мВ}$$

Пример 2. Определить значение затухания, вносимого аттенюатором генератора, если напряжение на его входе составляет 1 В, а на выходе 100 мВ.

На основании формулы запишем

$$U_{вых}(\text{дБ}) = 20 \cdot \lg \frac{1 \text{ В}}{0,1 \text{ В}} = 20 \text{ дБ.}$$

Цифровые ГНЧ.

Цифровые ГНЧ по сравнению с аналоговыми имеют более качественные метрологические характеристики: меньшую погрешность установки и нестабильности частоты, меньший коэффициент нелинейных искажений, стабильность уровня выходного сигнала.

Такие генераторы получают все большее распространение по сравнению с аналоговыми за счет более высокого быстродействия, упрощения установки частоты, исключения субъективной ошибки в задании параметров выходного сигнала. Благодаря встроенному микропроцессору в цифровых ГНЧ можно по заданной программе автоматически перестраивать частоту сигнала.

Работа цифровых ГНЧ основана на принципе формирования числового кода с последующим преобразованием его в аналоговый гармонический сигнал, который аппроксимируется функцией, моделируемой с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Структурная схема цифрового ГНЧ представлена на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Структурная схема цифрового ГНЧ

Задающий генератор импульсов с кварцевой стабилизацией частоты вырабатывает короткие импульсы в периодической последовательности, которые поступают на делитель частоты. На выходе делителя частоты с регулируемым коэффициентом деления образуется последовательность импульсов с заданным периодом следования, определяющим шаг дискретизации.

Счетчик подсчитывает поступающие на него импульсы, кодовая комбинация накопленных в счетчике импульсов подается в цифро-аналоговый преобразователь, который вырабатывает соответствующее напряжение. После переполнения счетчик обнуляется и готов к началу формирования следующего периода.

Тема 2.2. Генераторы сигналов высокой частоты

Высокочастотные и сверхвысокочастотные генераторы, или генераторы высоких и сверхвысоких частот (ГВЧ и ГСВЧ), являются источниками синусоидального и не менее одного модулированного по какому-либо параметру сигналов (амплитудно-модулированного — АМ-сигнал, частотно-модулированного — ЧМ-сигнал) с известными параметрами. Форма сигналов на выходе ГВЧ представлена на рис. 2.5.

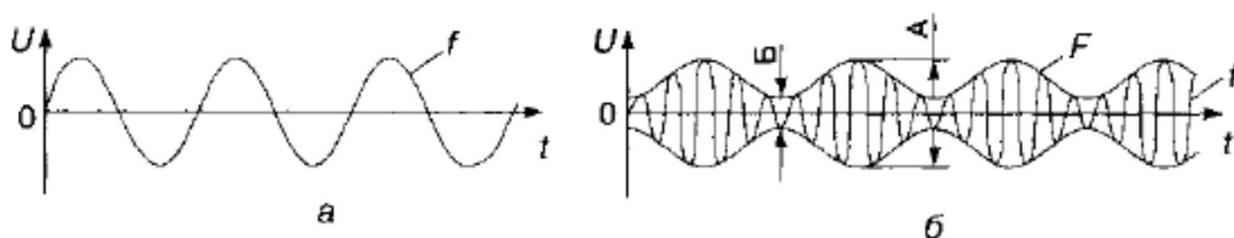


Рис. 6.5. Синусоидальный (а) и амплитудно - модулированный (б) сигналы на выходе ГВЧ

Если на лицевой панели прибора форма сигналов не указана, то это всегда синусоидальный и АМ-сигнал.

Приведенные сигналы характеризуются следующими параметрами: f - несущая (модулированная) высокая частота, F — модулирующая низкая частота, M — коэффициент амплитудной модуляции.

$$M = (A - B) \cdot 100\% / (A + B) \quad (2.3)$$

ГВЧ и ГСВЧ перекрывают следующие диапазоны несущих частот: 200 кГц ... 30 МГц (высокие) и $f > 30$ МГц (сверхвысокие). Диапазон частот может быть расширен до $f < 200$ кГц. Такие генераторы применяются для всестороннего исследования высокочастотных трактов теле- и радиоприемных устройств, для питания схем напряжением высоких и сверхвысоких частот. Структурная схема ГВЧ приведена на рис. 2.6.

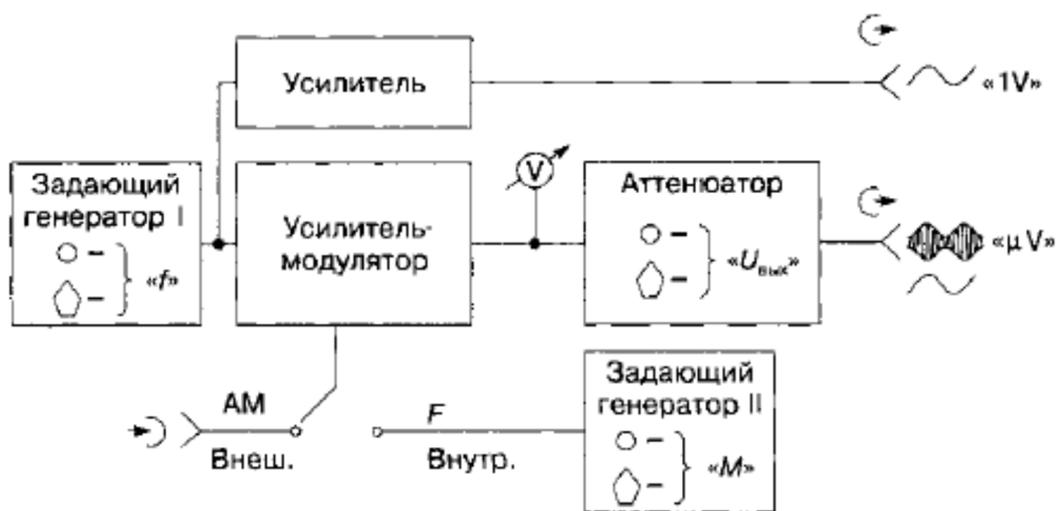


Рис. 2.6. Структурная схема РВЧ

Задающий генератор I определяет значение несущей частоты и форму сигнала. В качестве задающего генератора используется генератор типа LC , колебательная система которого представляет собой параллельный контур, состоящий из катушки индуктивности L и конденсатора C . Частота колебаний выражается формулой:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.4)$$

Весь частотный диапазон РВЧ поделен на поддиапазоны, количество которых может достигать восьми. Каждому поддиапазону соответствует конкретная катушка индуктивности, а плавная установка частоты (в границах поддиапазона) осуществляется с помощью конденсатора переменной емкости. РВЧ имеет два выхода: микровольтовый и одновольтовый.

С выхода задающего генератора I напряжение поступает на два канала: основной и вспомогательный. Основной канал содержит усилитель-модулятор и высокочастотный аттенюатор (выход « μV »). С этого выхода снимается немодулированное синусоидальное или модулированное регулируемое высокочастотное колебание, калиброванное по напряжению. Как и в ГНЧ, индикатор показывает среднеквадратичное значение синусоидального напряжения.

Вспомогательный канал содержит усилитель и выход « $1V$ ». С этого выхода снимается неконтролируемое, смодулированное (т.е. синусоидальное), нерегулируемое высокочастотное напряжение $1...2 V$ на согласующую нагрузку

Вход АМ предназначен для подключения внешнего модулирующего генератора (задающего генератора I) при положении тумблера «Внеш.» или внутреннего модулирующего генератора (задающего генератора II) при положении тумблера «Внутр.». Обычно значение модулирующей частоты — фиксированное (400 или 1000 Гц). Если на лицевой панели оно не указано, то принимается равным 1000 Гц.

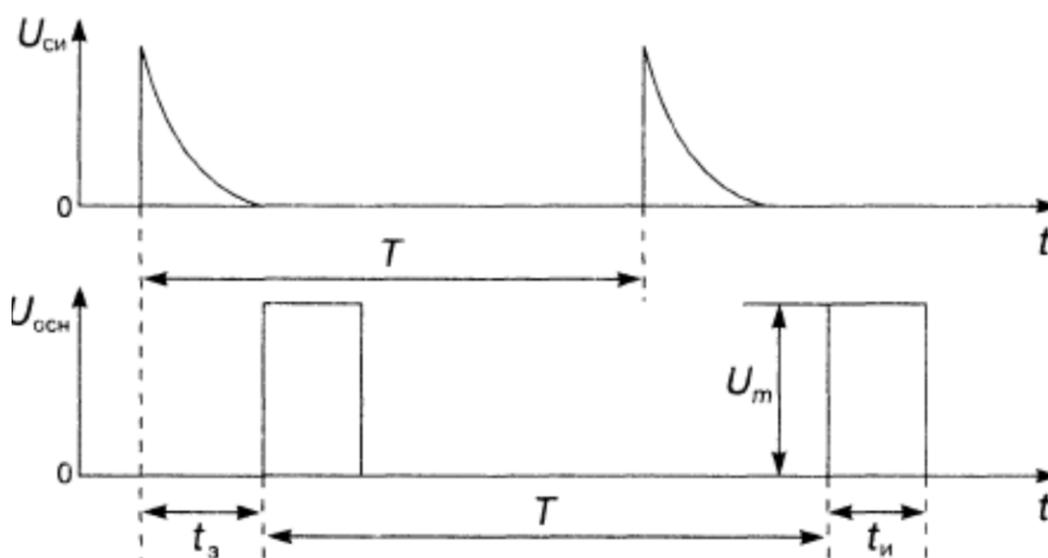
Особенностью ГСВЧ является использование специальных сверхвысокочастотных усилительных приборов: клистронов, ЛОВ-ламп обратной волны, лавинно-пролетных диодов, диодов Ганна, магнитронов, а также колебательных систем на объемном резонаторе или четвертьволновом отрезке волновода, коаксиальной линии.

На калиброванном выходе ГСВЧ мощность не превышает нескольких микроватт, а на некалиброванном — нескольких ватт. Кроме синусоидального сигнала, ГСВЧ могут вырабатывать импульсно-модулированный сигнал (ИМ-сигнал).

Тема 2.3. Генераторы импульсных сигналов

Импульсные генераторы, или генераторы импульсов (ГИ), нашли применение при настройке и регулировании импульсных схем, используемых в телевидении и связи, ЭВМ, радиолокации и т.д. Широко используются генераторы, обеспечивающие получение напряжений прямоугольной формы. Параметры импульсного сигнала могут регулироваться в широких диапазонах.

ГИ является источником двух сигналов: основного и дополнительного (синхронизированных импульсов — СИ). К основным параметрам этих сигналов, регулируемым в широких пределах (рис. 2.7), относятся U_m — амплитудное значение напряжения, t_u — длительность импульса, t_z — время задержки (временной сдвиг) основных импульсов по отношению к синхроимпульсам, T — период повторения импульсов.



К косвенным (вторичным) параметрам сигналов ГИ относятся — **скважность**, которая должна быть ≥ 2 и рассчитывается по формуле:

$$q = \frac{T}{t_u} = \frac{1}{F \cdot t_u}, \quad (2.5)$$

где $F = 1/T$ — частота повторения импульсов.
Структурная схема ГИ приведена на рис. 2.8.

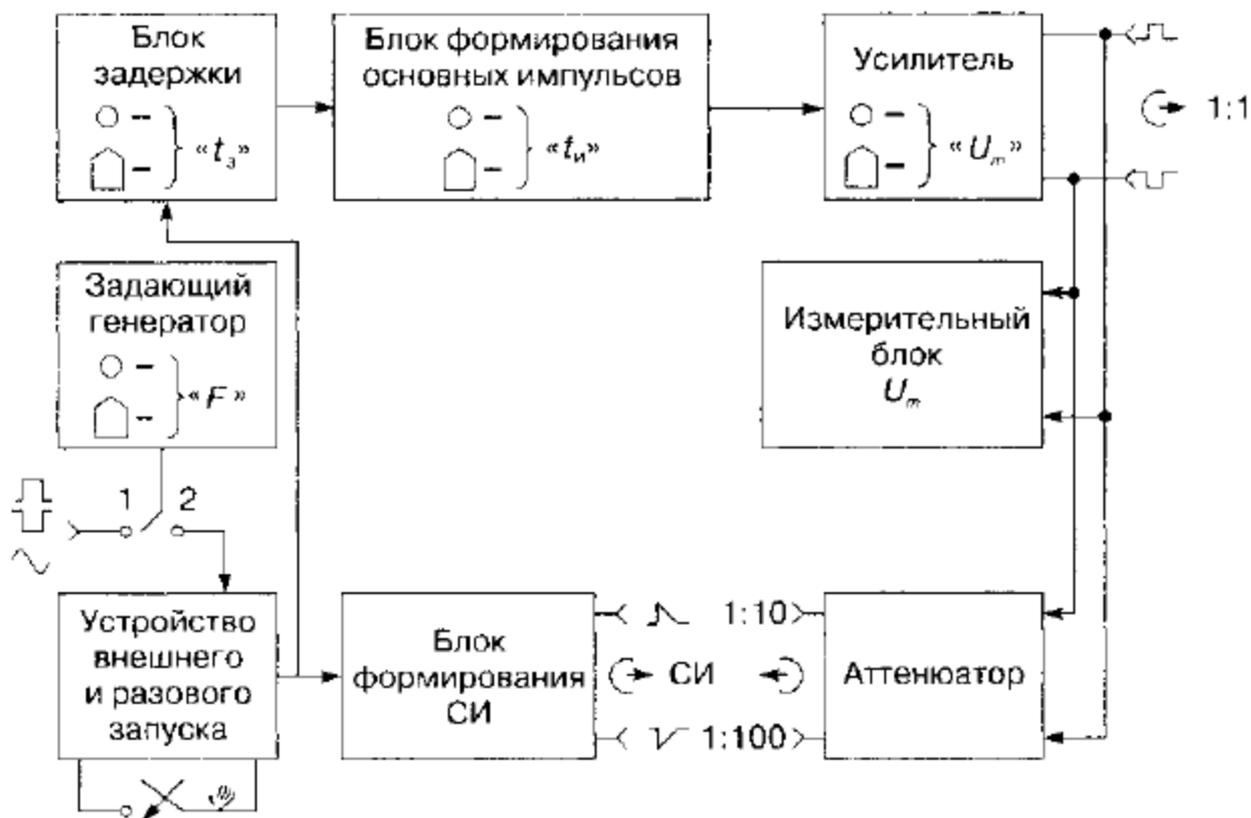


Рис. 2.8. Структурная схема ГИ

Задающий генератор вырабатывает короткие импульсы с частотой F и может работать в автоколебательном (положение ключа «1») или в ждущем (положение ключа «2») режимах. В режиме внешнего запуска частота следования импульсов определяется внешним генератором, подключенным к гнезду «Вход». Разовый запуск обеспечивается нажатием кнопки «Вход» устройства внешнего и разового запуска.

Блок формирования синхронизирующих импульсов (СИ) обеспечивает необходимую форму СИ.

Блок задержки создает временной сдвиг на время t_3 основных импульсов относительно СИ, поступающих от задающего генератора.

Блок формирования основных импульсов обеспечивает получение на выходе импульсов необходимой формы и длительности.

Усилитель увеличивает амплитуду импульсов, позволяет менять их полярность и осуществляет согласование по сопротивлению с нагрузкой, поставляемой в комплекте с генератором.

Аттенюатор уменьшает амплитуду импульсов в фиксированное число раз.

Измерительный блок представляет собой вольтметр, контролирующий амплитудное значение импульсного сигнала.

К основным метрологическим характеристикам генераторов, которые необходимо знать при выборе прибора, относятся следующие:

- форма сигнала;
- диапазон регулирования параметров;
- допустимая погрешность установки каждого параметра;
- максимальная допустимая временная нестабильность параметров;
- допустимые искажения формы сигнала.

РАЗДЕЛ 3. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ, НАПРЯЖЕНИЙ, МОЩНОСТИ

Тема 3.1. Измерение постоянных токов и напряжений электромеханическими измерительными приборами

Основной единицей измерения силы тока является ампер (А). Ампер — большая единица измерения силы тока, поэтому при электронных измерениях чаще используются дольные единицы:

- миллиампер ($1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$);
- микроампер ($1 \text{ mA} = 10^{-6} \text{ A}$).

В каталоговой классификации отечественные электронные амперметры обозначаются следующим образом: А1 — образцовые, А2 — постоянного тока, А3 — переменного синусоидального тока, А4 — переменного импульсного тока, А5 — фазочувствительные, А6 — селективные, А7 — универсальные.

В электронике требуется измерять силу тока от единиц микроампер до единиц ампер, в диапазоне частот от нуля до десятков мегагерц. Для измерения силы тока в таких широких диапазонах применяются амперметры, различающиеся по принципу работы.

Измерение силы постоянного тока и тока низких частот.

Для измерения силы постоянного тока низких частот применяются электромеханические амперметры, миллиамперметры, микроамперметры, мультиметры, электронные амперметры 2-й и 7-й подгрупп (А2 и А7).

При измерении силы постоянного тока используются приборы только магнитоэлектрической системы.

Любой измерительный прибор при подключении к цепи не должен изменять параметры и режим работы исследуемой цепи. Поэтому необходимо, чтобы амперметр обладал возможно меньшим сопротивлением и подключался последовательно с нагрузкой (рис 3.1, а). При этом через прибор и нагрузку протекает один и тот же ток.

При малом сопротивлении амперметра падение напряжения и потеря мощности на нем также малы. Сила тока в показанной цепи

до подключения амперметра составляет $I_x = \frac{U}{R_H}$, а после

подключения $I'_x = \frac{U}{R_H + R_A}$, где U — напряжение подключенного источника питания; R_A — внутреннее сопротивление амперметра; R_H — сопротивление нагрузки.

Только при $R_A \ll R_H$ будет $I_x \cong I'_x$.

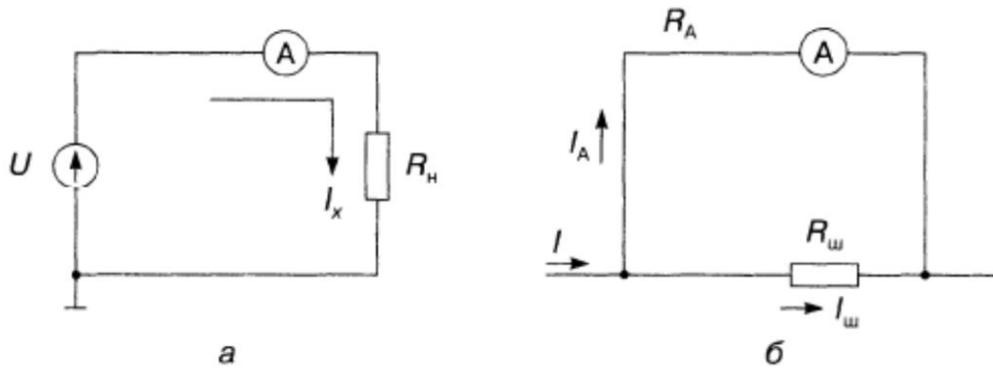


Рис. 3.1. Схема подключения амперметра в цепь (а), схема подключения шунта к амперметру (б)

Таким образом, погрешность, возникающая в результате подключения амперметра к исследуемой цепи и обусловленная потребляемой им мощностью, имеет систематическую методическую составляющую, а также инструментальную составляющую, которая зависит от величины внутреннего сопротивления используемого амперметра.

Для расширения диапазона измерения по току применяются **шунты**, которые представляют собой сопротивление, подключаемое параллельно с амперметром (рис. 3.1,б).

Очевидно, падение напряжения на приборе и шунте одинаково: $I_{ш}R_{ш} = I_A R_A$, где $I_{ш}$ — сила тока через шунт, $R_{ш}$ — сопротивление шунта, I_A — сила тока амперметра.

Из равенства следует что $R_{ш} = \frac{I_A R_A}{I_{ш}}$, но поскольку по первому закону Кирхгофа:

$$I_{ш} = I - I_A, \quad (3.1)$$

то сопротивление шунта можно выразить как $R_{ш} = \frac{I_A \cdot R_A}{I - I_A}$, где I — измеряемая сила тока.

Разделив числитель и знаменатель на I_A , получим $R_{ш} = \frac{R_A}{\frac{I}{I_A} - 1}$,

или
$$R_{ш} = \frac{R_A}{p-1}, \quad (3.2)$$

где p — шунтирующий множитель, показывающий, во сколько раз расширяется предел измерения амперметра:

$$p = \frac{I}{I_A} \quad (3.3)$$

Из анализа формулы следует, что для расширения диапазона измерения силы тока в p раз необходим шунт с сопротивлением в $(p-1)$ раз меньшим сопротивления амперметра.

Амперметр с несколькими шунтами называется многопредельным.

При изготовлении шунтов используются проволока, ленты или стержни. Шунты могут быть внутренними и наружными.

Для измерения силы переменного тока низких частот используют электронные амперметры 3-й и 7-й подгрупп (А3, А7) и электромеханические амперметры. Применимость электромеханических амперметров целесообразно рассматривать по частотным диапазонам.

При измерении силы тока промышленных частот 50, 100, 400 и 1000 Гц применяются электромеханические амперметры электромагнитной, электродинамической, ферродинамической, выпрямительной и термоэлектрической систем. В диапазоне частот 1...5 кГц используются амперметры выпрямительной, электродинамической и термоэлектрической систем. В диапазоне частот от 5 кГц до единиц мегагерц амперметры выпрямительной и электродинамической систем допускают значительную погрешность, обусловленную индуктивностью катушек и паразитной емкостью выпрямителей, поэтому для измерения силы тока лучше использовать амперметры термоэлектрической системы.

Электромеханические амперметры всех систем обычно градуируют в среднеквадратичных значениях при синусоидальной форме кривой тока.

Расширение диапазона измерений амперметров перечисленных систем возможно с помощью измерительных трансформаторов тока, так как падение напряжения в этих приборах в несколько раз больше, чем в амперметрах магнитоэлектрической системы, и требовались бы громоздкие и дорогостоящие шунты.

Амперметр термоэлектрической системы (термостатический преобразователь) представляет собой измерительный механизм магнитоэлектрической системы в сочетании с термопарой (рис. 3.2), предназначенной для измерения температуры t проволоки (терморезистора, или нагревателя), через которую протекает

измеряемый переменный ток. Индуктивность терморезистора незначительна, этим и объясняется применение амперметров термоэлектрической системы при измерении силы тока высоких частот.

Электрохимические амперметры имеют существенный недостаток — большое собственное потребление мощности из исследуемой цепи, которое заметно меньше у электронных амперметров.

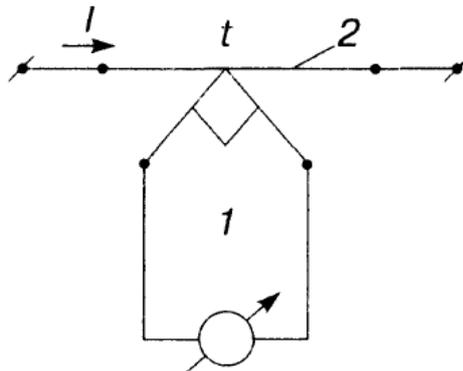


Рис. 3.2. Схема термостатического преобразователя, где 1 — термопара; 2 — терморезистор.

Измерение силы тока высоких частот.

В отличие от схемы замещения амперметра для измерения силы тока низких частот, когда эквивалентная схема амперметра представляет собой активное сопротивление R_A , за счет которого возникает методическая и инструментальная погрешности, схема замещения амперметра для измерения силы тока высоких частот не является точной, а имеет вид, показанный на рис. 3.3.

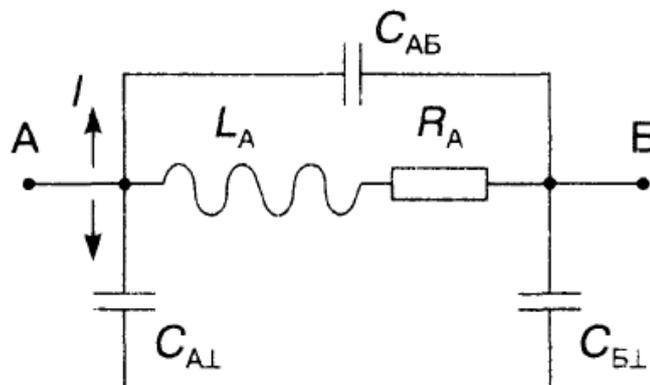


Рис. 3.3. Эквивалентная схема замещения амперметра для измерения силы тока высоких частот,

где: A, B — входные зажимы прибора; $C_{A\perp}, C_{B\perp}$ — емкости входных зажимов A и B относительно общей точки; L_A, r_A — индуктивное и активное сопротивление рабочей части прибора; C_{AB} — емкость между входными зажимами амперметра.

Из приведенной схемы замещения следует, что с повышением частоты увеличиваются токи утечки не через рабочую часть прибора, а следовательно, растет погрешность измерения силы тока. Для уменьшения погрешности измерения необходимо соблюдать следующие рекомендации:

- использовать только высокочастотные амперметры (термоамперметры), значения паразитных индуктивности и емкостей которых минимальны благодаря конструкции прибора;
- подключать амперметр к исследуемой цепи в точку с наименьшим потенциалом относительно земли.

В области сверхвысоких частот эквивалентная схема замещения амперметра усложняется, а погрешность измерения возрастает настолько, что измерение силы тока теряет физический смысл.

При выборе прибора для измерения силы тока нет необходимости знать все метрологические характеристики, указанные в паспорте, — нужны только основные:

- параметр тока, измеряемый прибором (среднеквадратичное, амплитудное или средневывпрямленное значение);
- диапазон измерения силы тока;
- частотный диапазон;
- допустимая погрешность;
- входной импеданс (активная и реактивная составляющие входного сопротивления — $R_{вх}, C_{вх}$).

Тема 3.2. Аналоговые электронные и цифровые вольтметры

Необходимость измерения напряжения на практике возникает очень часто. В электротехнических и радиотехнических цепях и устройствах чаще всего измеряют напряжение постоянного и переменного (синусоидального и импульсного) тока.

Основной единицей измерения напряжения является вольт (В). В практике электротехнических измерений широко используются дольные и кратные единицы:

- киловольт ($1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В}$);
- милливольт ($1 \text{ мВ} = 10^{-3} \text{ В}$);
- микровольт ($1 \text{ мкВ} = 10^{-6} \text{ В}$).

В каталоговой классификации электронные вольтметры обозначаются следующим образом: В1 — образцовые, В2 — постоянного тока, В3 — переменного синусоидального тока, В4 — переменного импульсного тока, В5 — фазочувствительные, В6 — селективные, В7 — универсальные.

На шкалах аналоговых индикаторов и на лицевых панелях (на переключателях пределов) отечественных и зарубежных электронных и электромеханических вольтметров применяются следующие обозначения: V— вольтметры, kV— киловольтметры, mV— милливольтметры, μV — микровольтметры.

Напряжение постоянного тока (рис. 3.4, а) выражается как $u(t)=const$. Источниками такого напряжения являются генераторы постоянного тока и химические источники питания.

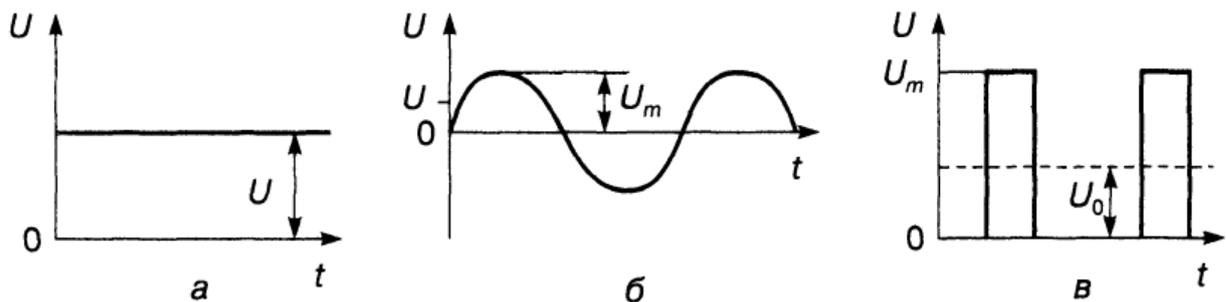


Рис. 3.4. Временные диаграммы напряжений: постоянного (а), переменного синусоидального (б) и переменного импульсного (в) тока.

Напряжение переменного синусоидального тока (рис. 3.4, б) выражается как

$$u(t) = U_m \sin(\omega t) \quad (3.4)$$

и характеризуется среднеквадратичным U и амплитудным U_m значениями:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0,7U_m, U_m = \sqrt{2}U \quad (3.5)$$

Источниками такого напряжения являются ГНЧ и ГВЧ, электросеть.

Напряжение переменного импульсного тока (рис. 3.4, в) характеризуется амплитудным U_m и средним U_0 (постоянная составляющая) значениями напряжения. Источником такого напряжения являются импульсные генераторы с сигналом разной формы.

Измерение напряжения постоянного тока. Для измерения напряжения постоянного тока используются электромеханические вольтметры и мультиметры, электронные аналоговые и цифровые вольтметры, электронные осциллографы.

Электромеханические вольтметры непосредственной оценки измеряемой величины составляют большой класс приборов аналогового типа и имеют следующие достоинства:

- возможность работы без подключения к источнику питания;
- малые габаритные размеры;
- меньшая цена (по сравнению с электронными);
- простота конструкции и удобство эксплуатации.

Чаще всего при электротехнических измерениях в силовых цепях используются вольтметры на основе электромагнитной и электродинамической систем, в слаботочных цепях — магнитоэлектрической системы. Поскольку все названные системы сами являются измерителями силы тока (амперметрами), то для создания на их основе вольтметров необходимо увеличить внутреннее сопротивление прибора, т.е. подключить последовательно с измерительным механизмом **добавочный резистор** $r_{доб}$ (рис. 3.5, а).

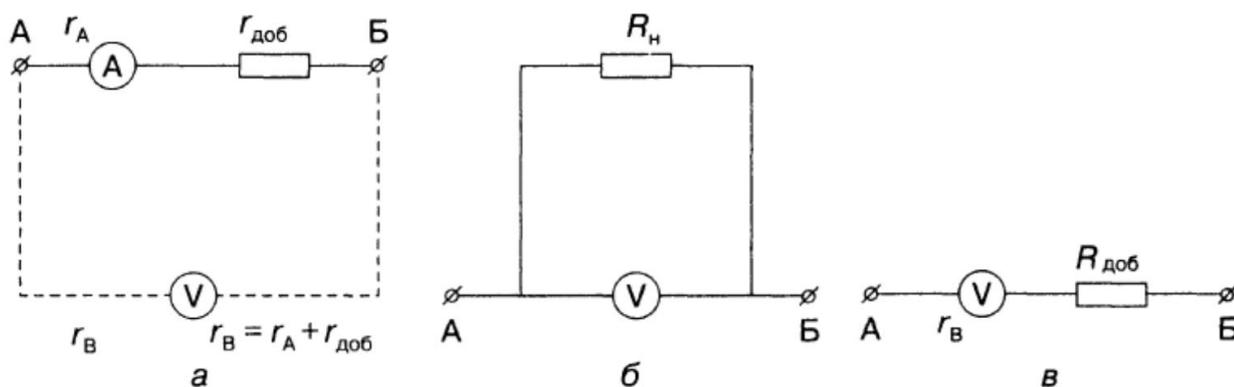


Рис. 3.5. Схема создания вольтметра на основе амперметра (а), подключение вольтметра к нагрузке (б), подключение добавочного резистора к вольтметру (в)

Вольтметр подключается к исследуемой цепи параллельно (рис. 3.5, б), и его входное сопротивление должно быть достаточно большим.

Для расширения диапазона измерения вольтметра также используют добавочный резистор, который подключают к прибору последовательно (рис. 3.5, в).

Значение сопротивления добавочного резистора определяется по формуле:

$$r_{\text{доб}} = r_{\text{в}}(p - 1) \quad (3.6)$$

где p — число, показывающее, во сколько раз расширяется предел измерения вольтметра:

$$p = \frac{U_{\text{н1}}}{U_{\text{н}}}, \quad (3.7)$$

где $U_{\text{н}}$ — исходный предел измерения; $U_{\text{н1}}$ — новый предел измерения.

Добавочные резисторы, размещенные внутри корпуса прибора, называются внутренними, подключенные к прибору снаружи — внешними. Вольтметры могут быть многопредельными. Между пределом измерения и внутренним сопротивлением многопредельного вольтметра существует прямая зависимость: чем больше предел измерения, тем больше сопротивление вольтметра.

Электромеханические вольтметры имеют следующие недостатки:

- ограниченный диапазон измерения напряжений (даже в многопредельных вольтметрах);
- малое входное сопротивление, следовательно, большое собственное потребление мощности из исследуемой цепи.

Этими недостатками электромеханических вольтметров обусловлено предпочтительное использование для измерения напряжения в электронике электронных вольтметров.

Электронные аналоговые вольтметры постоянного тока построены по схеме, представленной на рис. 3.6. Входное устройство состоит из эмиттерного повторителя (для увеличения входного сопротивления) и аттенюатора — делителя напряжения.

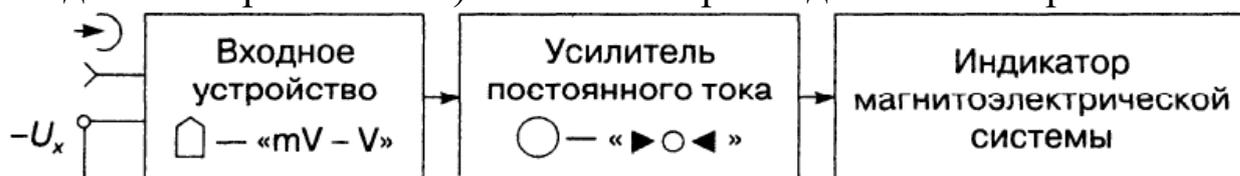


Рис. 3.6. Структурная схема электронного аналогового вольтметра постоянного тока

Преимущества электронных аналоговых вольтметров по сравнению с электромеханическими очевидны:

- широкий диапазон измерения напряжений;
- большое входное сопротивление, следовательно, малое собственное потребление мощности из исследуемой цепи;
- высокая чувствительность благодаря наличию усилителя на входе прибора;
- невозможность перегрузок.

Вместе с тем электронные аналоговые вольтметры имеют ряд недостатков:

- наличие источников питания, большей частью стабилизированных;
- большая, чем у электромеханических вольтметров, приведенная относительная погрешность (2,5...6%);
- большие массогабаритные размеры, более высокая цена.

В настоящее время аналоговые электронные вольтметры постоянного тока применяются недостаточно широко, так как по своим параметрам заметно уступают цифровым вольтметрам.

Измерение напряжения переменного тока. Для измерения напряжения переменного тока используются электромеханические вольтметры и мультиметры, электронные аналоговые и цифровые вольтметры, электронные осциллографы.

Рассмотрим недорогие и достаточно точные электромеханические вольтметры. Делать это целесообразно по частотным диапазонам.

На промышленных частотах 50, 100, 400 и 1000 Гц широко применяются вольтметры электромагнитной, электродинамической, ферродинамической, выпрямительной, электростатической и термоэлектрической систем.

На низких частотах (до 15...20 кГц) применяются вольтметры выпрямительной, электростатической и термоэлектрической систем.

На высоких частотах (до единиц—десятков мегагерц) используются приборы электростатической и термоэлектрической систем.

Для электротехнических измерений широко используются универсальные приборы — мультиметры.

Мультиметры (тестеры, ампервольтметры, комбинированные приборы) позволяют измерять множество

параметров: силу постоянного и переменного тока, напряжение постоянного и переменного тока, сопротивление резисторов, емкость конденсаторов (не все приборы), некоторые статические параметры маломощных транзисторов (h_{21} , $I_{КЭ0}$ и h_{22}).

Мультиметры выпускаются с аналоговым и цифровым отсчетом. Широкое использование мультиметров объясняется следующими их преимуществами:

- многофункциональность, т.е. возможность использования в качестве амперметров, вольтметров, омметров, фарадометров, измерителей параметров маломощных транзисторов;
- широкий диапазон измеряемых параметров благодаря наличию нескольких пределов измерения по каждому параметру;
- возможность использования в качестве переносных приборов, поскольку отсутствует сетевой источник питания;
- небольшие массогабаритные размеры;
- универсальность (возможность измерения переменных и постоянных токов и напряжений).

Мультиметры имеют также ряд недостатков:

- узкий частотный диапазон применимости;
- большое собственное потребление мощности из исследуемой цепи;
- большая приведенная погрешность у аналоговых (1,5; 2,5 и 4) и у цифровых мультиметров;
- непостоянство внутреннего сопротивления на различных пределах измерения силы тока и напряжения.

По отечественной каталоговой классификации мультиметры имеют обозначение Ц43 и далее номер модели, например, Ц4352.

Для определения внутреннего сопротивления аналогового мультиметра на включенном пределе измерения в паспорте прибора может быть приведено удельное сопротивление.

Электронные аналоговые вольтметры переменного тока построены по одной из структурных схем (рис. 3.7), которые различаются последовательностью расположения основных блоков — усилителя и преобразователя (детектора) напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока. Свойства этих вольтметров во многом зависят от выбранной схемы.

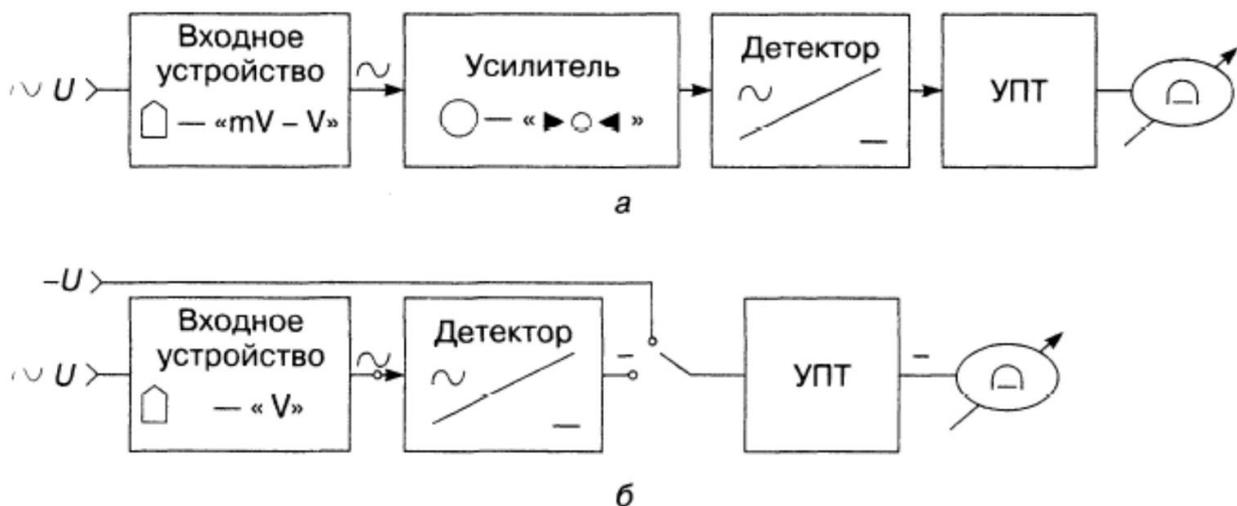


Рис. 3.7. Структурные схемы электронных аналоговых вольтметров переменного тока типа У—Д (а) и типа Д—У (б)

Вольтметры первой группы типа усилитель-детектор (У—Д) — имеют высокую чувствительность, что связано с наличием дополнительного усилителя. Поэтому все микро- и милливольтметры построены по схеме У—Д. Однако частотный диапазон таких вольтметров неширок (до единиц мегагерц), так как создание широкополосного усилителя переменного тока связано с определенными трудностями. Вольтметры типа У—Д относятся к не универсальным (подгруппа В3), т.е. могут измерять только напряжение переменного тока.

Вольтметры второй группы типа детектор-усилитель (Д—У) — имеют широкий частотный диапазон (до единиц гигагерц) и низкую чувствительность. Вольтметры этого типа относятся к универсальным (подгруппа В7), т.е. измеряют напряжение не только переменного, но и постоянного тока; могут измерять напряжение значительного уровня, так как обеспечить большое усиление с помощью УПТ несложно.

В вольтметрах обоих типов важную функцию выполняют преобразователи напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока — детекторы, которые по функции преобразования входного напряжения в выходное можно классифицировать на три типа: амплитудного, среднеквадратичного и средневыпрямленного значения.

От типа детектора во многом зависят свойства прибора. Вольтметры с детектором амплитудного значения являются самыми высокочастотными; вольтметры с детектором среднеквадратичного значения позволяют измерять напряжение переменного тока любой формы; вольтметры с детектором

средневыпрямленного значения пригодны для измерения напряжения только гармонического сигнала и являются самыми простыми, надежными и недорогими.

Импульсные и цифровые вольтметры. При измерении импульсных напряжений с малой амплитудой применяют предварительное усиление импульсов. Структурная схема аналогового импульсного вольтметра (рис. 3.7) состоит из выносного пробника с эмиттерным повторителем, аттенюатора, широкополосного предварительного усилителя, детектора амплитудного значения, усилителя постоянного тока (УПТ) и электромеханического индикатора. Вольтметры, реализованные по этой схеме, непосредственно измеряют напряжение 1 мВ...3 В с погрешностью $\pm(4 - 10)\%$, длительностью импульсов 1...200 мкс и скважностью 100 ... 2500.

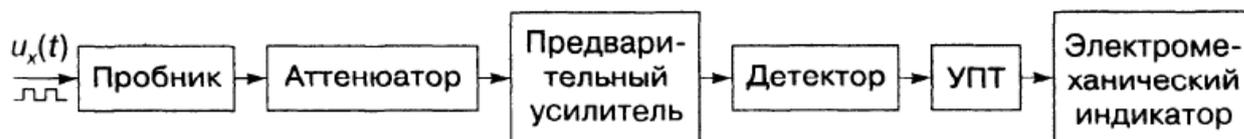


Рис. 3.7. Структурная схема импульсного вольтметра

Для измерения малых напряжений в широком диапазоне длительностей (от наносекунд до миллисекунд) применяют вольтметры, работающие на основе автокомпенсационного метода.

Электронные цифровые вольтметры имеют существенные преимущества перед аналоговыми:

- высокая скорость измерений;
- исключение возможности возникновения субъективной ошибки оператора;
- малая приведенная погрешность.

Благодаря этим преимуществам цифровые электронные вольтметры широко используются для измерения. На рис. 3.8 приведена упрощенная структурная схема цифрового вольтметра.



Рис. 3.8. Упрощенная структурная схема цифрового вольтметра

Входное устройство предназначено для создания большого входного сопротивления выбора пределов измерения, ослабления помех, автоматического определения полярности измеряемого напряжения постоянного тока. В вольтметрах переменного тока входное устройство включает в себя также преобразователь напряжения переменного тока в постоянный. С выхода входного устройства измеряемое напряжение подается на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), в котором напряжение преобразуется в цифровой (дискретный) сигнал в виде электрического кода или импульсов, количество которых пропорционально измеряемому напряжению. Результат появляется на табло цифрового индикатора. Работой всех блоков управляет устройство управления.

Цифровые вольтметры в зависимости от типа АЦП подразделяются на четыре группы: кодоимпульсные, времяимпульсные, частотно-импульсные, пространственного кодирования.

В настоящее время широко применяются цифровые времяимпульсные вольтметры, преобразователи которых выполняют промежуточное преобразование измеряемого напряжения в пропорциональный интервал времени, заполняемый импульсами с известной частотой повторения. В результате такого преобразования дискретный сигнал измерительной информации на входе АЦП имеет вид пачки счетных импульсов, количество которых пропорционально измеряемому напряжению.

Погрешность времяимпульсных вольтметров определяется погрешностью дискретизации измеряемого сигнала, нестабильностью частоты счетных импульсов, наличием порога чувствительности схемы сравнения, нелинейностью преобразованного напряжения на входе схемы сравнения.

Время преобразования — это время, затрачиваемое на выполнение одного преобразования аналоговой величины в цифровой код.

Пределы изменения входной величины — это диапазоны преобразования входной величины, которые полностью определяются числом разрядов и «весом» наименьшего разряда.

Чувствительность (разрешающая способность) — это наименьшее различимое преобразователем изменение значения входной величины.

К основным метрологическим характеристикам вольтметров, которые необходимо знать для правильного выбора прибора, относятся следующие характеристики:

- параметр измеряемого напряжения (среднеквадратичное, амплитудное);
- диапазон измерения напряжения;
- частотный диапазон;
- допустимая погрешность измерений;
- входной импеданс ($R_{вх}$, $C_{вх}$).

Эти характеристики приводятся в техническом описании и паспорте прибора.

Тема 3.3. Измерение мощности

Измерение мощности весьма распространено в практике электрических и электронных измерений на постоянном и переменном токе во всем освоенном диапазоне частот — вплоть до миллиметровых и более коротких волн.

Особое значение имеет измерение мощности в диапазоне СВЧ, поскольку мощность является единственной характеристикой электрического режима соответствующего тракта, когда измерение тока и напряжения на СВЧ из-за большой погрешности практически невозможно.

Мощность измеряется ваттметрами в пределах от долей микроватт до единиц — десятков гигаватт.

В зависимости от измеряемых мощностей приборы делятся на ваттметры малой (<10 мВт), средней (10 мВт ... 10 Вт) и большой (>10 Вт) мощности.

Основной единицей измерения мощности является ватт (Вт). Используются также кратные и дольные единицы:

- гигаватт (1 ГВт = 10^9 Вт);
- мегаватт (1 МВт = 10^6 Вт);
- киловатт (1 кВт = 10^3 Вт);
- милливатт (1 мВт = 10^{-3} Вт);
- микроватт (1 мкВт = 10^{-6} Вт).

Мощность может измеряться не только в абсолютных, но и в относительных единицах — децибелах:

$$P(\text{дБ}) = 10 \cdot \lg \frac{P(\text{Вт})}{P_0(\text{Вт})} \quad (3.8)$$

Для измерения мощности используют косвенные и прямой методы.

В каталоговой классификации электронные ваттметры обозначаются следующим образом: М1 — образцовые, М2 — проходящей мощности, М3 — поглощаемой мощности, М4 — мосты для измерителей мощности, М5 — преобразователи (головки) ваттметров.

Электромеханические ваттметры классифицируются в соответствии с единицами измерения мощности, указанными на их шкалах и лицевых панелях: W — ваттметры; kW — киловаттметры; mW — милливаттметры; μ W — микроваттметры.

Измерение мощности в цепях постоянного и переменного тока низких частот.

Для измерения мощности в цепях постоянного и переменного тока промышленных частот используются чаще всего электромеханические ваттметры электродинамической и ферродинамической систем.

В лабораторной практике применяются в основном ваттметры электродинамической системы 3, 4 и 5-го классов точности (0,1; 0,2; 0,5). В промышленности при технических измерениях применяют ваттметры ферродинамической системы 6, 7 и 8-го классов точности (1,0; 1,5 и 2,5).

Шкалы однопредельных ваттметров градуированы в значениях измеряемой величины (ваттах, киловаттах и т.д.). Многопредельные ваттметры имеют неградуированную шкалу. Перед использованием таких ваттметров при известных номинальном значении тока I_n и номинальном значении напряжения U_n выбранного предела, а также количестве делений шкалы $n_{шк}$ применяемого ваттметра необходимо определить его цену деления (постоянную прибора) при $\cos \varphi = 1$ по формуле:

$$c = \frac{U_n I_n}{n_{шк}} \quad (3.9)$$

Зная цену деления для данного ваттметра в выбранном пределе, несложно произвести отсчет значения измеряемой мощности. Измеренное значение мощности будет составлять:

$$P = c \cdot n \quad (3.10)$$

где n — отсчет количества делений по шкале прибора.

Ваттметры электродинамической системы применяются для измерения мощности в цепях постоянного и переменного тока частотой до нескольких килогерц.

Ваттметры ферродинамической системы применяются для измерения мощности в цепях постоянного и переменного тока промышленных частот.

На постоянном и переменном токе низких, средних и высоких частот используются косвенные методы измерения мощности, т.е. напряжения, сила тока и фазовые сдвиги определяются путем последующего вычисления мощности. Активная мощность двухфазного переменного тока в цепи с комплексной нагрузкой определяется по формуле:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = \frac{U^2}{R} \cos \varphi = I^2 \cdot R \cdot \cos \varphi \quad (3.11)$$

где U , I — среднеквадратичное значение напряжения и силы тока; $\cos \varphi$ — фазовый сдвиг между силой тока и напряжением.

В цепи с чисто активной нагрузкой R_n , когда $\varphi = 0$, $\cos \varphi = 1$, мощность переменного тока составляет

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R_n = \frac{U^2}{R_n} \quad (3.12)$$

мощность импульсного тока:

$$P_n = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \quad (3.13)$$

На практике обычно измеряется средняя мощность за период следования импульсов:

$$P_{cp} = k_\phi \cdot P_n \cdot \frac{T}{t_n} = k_\phi \cdot P_n \cdot q \quad (3.14)$$

Где q — скважность, t_n — длительность импульса, k_ϕ — коэффициент формы импульса, T — период следования импульсов.

$$q = \frac{T}{t_n} \quad (3.15)$$

Высокочастотные методы измерения мощности.

Возможны два типовых метода измерения мощности (в зависимости от ее вида: поглощаемая или проходящая).

Поглощаемая мощность — это мощность, потребляемая нагрузкой. В этом случае нагрузка заменяется ее эквивалентом, а измеряемая мощность полностью рассеивается на этом эквиваленте нагрузки, и далее измеряется мощность теплового процесса. Нагрузка ваттметра полностью поглощает мощность, поэтому такие приборы называются ваттметрами поглощаемой мощности (рис. 3.9, а).



Рис. 3.9. Методы измерения ваттметрами поглощаемой (а) и проходящей мощности (б)

Так как нагрузка полностью должна поглощать измеряемую мощность, то прибор может использоваться только при отключенном потребителе. Погрешность измерения будет тем

меньше, чем более полно обеспечено согласование входного сопротивления ваттметра с выходным сопротивлением исследуемого источника или волновым сопротивлением линии передачи.

Проходящая мощность — это мощность, передаваемая генератором в реальную нагрузку. Приборы, ее измеряющие, называются ваттметрами проходящей мощности. Такие ваттметры потребляют незначительную долю мощности источника, а основная ее часть выделяется в реальной полезной нагрузке (рис. 3.9, б).

К ваттметрам проходящей мощности относятся приборы на преобразователях Холла, с поглощающей стенкой и другие приборы.

В диапазоне высоких и сверхвысоких частот косвенные методы измерения мощности не применяются, так как в разных сечениях линии передач значения силы тока и падения напряжения различны; кроме того, подключение измерительного прибора меняет режим работы измерительной цепи. Поэтому на СВЧ используются другие методы: например, преобразования электромагнитной энергии в тепловую (калориметрический метод), изменения сопротивления резистора (термисторный метод).

Калориметрический метод измерения мощности характеризуется высокой точностью. Этот метод используется во всем радиотехническом диапазоне частот при измерении сравнительно больших мощностей, когда имеет место потеря тепла.

Калориметрический метод основан на преобразовании электрической энергии в тепловую, когда нагревается некоторая жидкость в калориметре ваттметра (рис. 3.10).

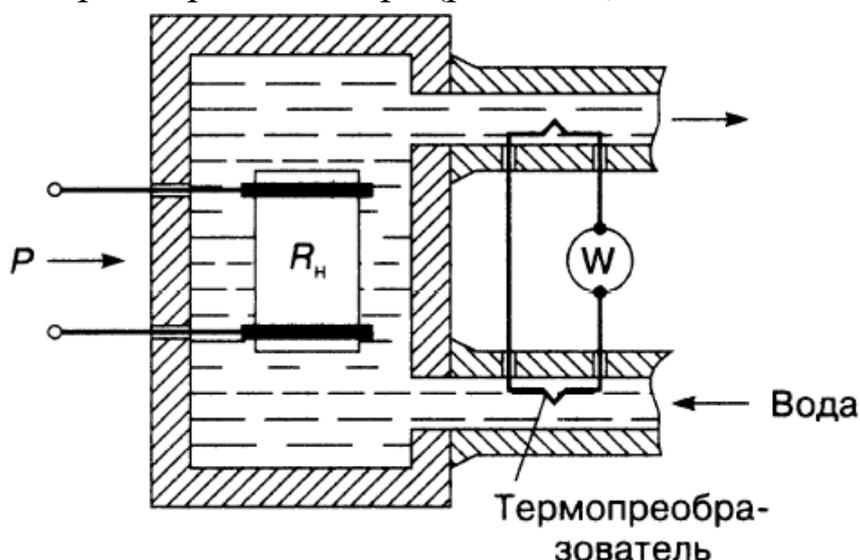


Рис. 3.10. Устройство калориметрического ваттметра

Далее мощность оценивается путем определения по известной разности температур и известному объему жидкости, протекающей через калориметр:

$$P = k \cdot V(t_2 - t_1), \quad (3.16)$$

где k – коэффициент используемой жидкости; V – объем нагретой жидкости, t_2 , t_1 – конечная и начальная температура жидкости.

Погрешность калориметрического метода составляет 1...7%.

Термисторный (болометрический) метод измерения мощности основан на использовании свойства терморезисторов, изменять свое сопротивление под воздействием поглощаемой ими мощности электромагнитных колебаний. В качестве терморезисторов используют термисторы и болометры.

Термистор представляет собой полупроводниковую пластину, заключенную в стеклянный баллон. Термисторы имеют отрицательный температурный коэффициент, т.е. с повышением температуры их сопротивление падает.

Болометр представляет собой тонкую пластину из слюды или стекла с нанесенным на нее слоем (пленкой) платины. Пленочные болометры обладают очень высокой чувствительностью. Болометры имеют положительный температурный коэффициент, т.е. с повышением температуры их сопротивление растет.

Чувствительность и надежность термисторов выше, чем болометров, однако параметры болометров стабильнее, поэтому они применяются в образцовых ваттметрах (подгруппа М1).

Термисторный метод обеспечивает высокую чувствительность, поэтому его применяют для измерения малых и средних мощностей. Использование ответвителей и делительных устройств позволяет применять метод и для измерения больших мощностей.

Погрешность термисторных ваттметров составляет 4... 10% и чаще всего зависит от степени согласованности нагрузки.

К основным метрологическим характеристикам ваттметров, которые необходимо знать при выборе прибора, относятся следующие:

- тип прибора (поглощаемой или проходящей мощности);
- диапазон измерения мощности;
- частотный диапазон;
- допустимая погрешность измерений;

- коэффициент стоячей волны (КСВ) входа измерителя мощности или модуль коэффициента отражения.

РАЗДЕЛ 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ СИГНАЛОВ.

Осциллографы относятся к приборам, позволяющим наблюдать форму различных сигналов и измерять параметры этих сигналов. Отличительной особенностью осциллографов является их многофункциональность.

Современные осциллографы делятся на электромеханические (самописцы) и электронные (электронно-лучевые) и различаются между собой принципом построения, областями измерения, а часто и типами решаемых задач.

В настоящее время для анализа формы сигнала чаще всего используют осциллографы с электронно-лучевой трубкой (ЭЛТ) - **электронно-лучевые осциллографы (ЭЛО)**. Эти измерительные приборы относятся к наиболее универсальным, и предназначены для визуального наблюдения электрических сигналов и измерения их параметров. В настоящее время разработаны и используются различные типы ЭЛО: универсальные, скоростные, стробоскопические, запоминающие, специальные.

В качестве «карандаша», вычерчивающего закон изменения исследуемой величины на люминесцирующем экране, в электронном осциллографе (ЭО) используется узкий луч электронов, формируемый внутри ЭЛТ особой электронно-оптической системы электронной пушкой. Устройство ЭЛТ с электростатическим управлением луча показано на рис. 4.1.

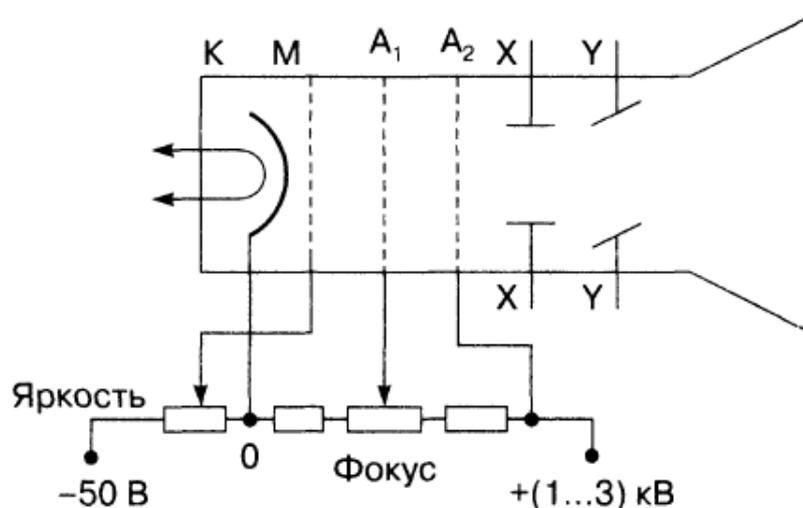


Рис. 4.1. Устройство ЭЛТ с электростатическим управлением луча

Внутри стеклянного баллона, в котором путем откачивания воздуха создается вакуум, расположен катод K с прямым или косвенным подогревом, модулятор M , изменением напряжения на

котором регулируется яркость луча, фокусирующий анод A_1 ускоряющий анод A_2 и две пары отклоняющих пластин: горизонтальные — X и вертикальные — Y . Внутренняя поверхность экрана трубки покрыта слоем люминофора, светящегося под действием бомбардировки электронами. Электронная трубка, состоящая из K, M, A_1, A_2 , формирует узкий луч электронов.

Осциллографические трубки имеют следующие параметры: размер по диагонали, чувствительность:

$$s = \frac{h}{U_{вх}} = \frac{\text{дел}}{В} \quad (4.1)$$

где h — отклонение луча на экране (в делениях); $U_{вх}$ — значение напряжения на пластинах, вызвавшее отклонение h .

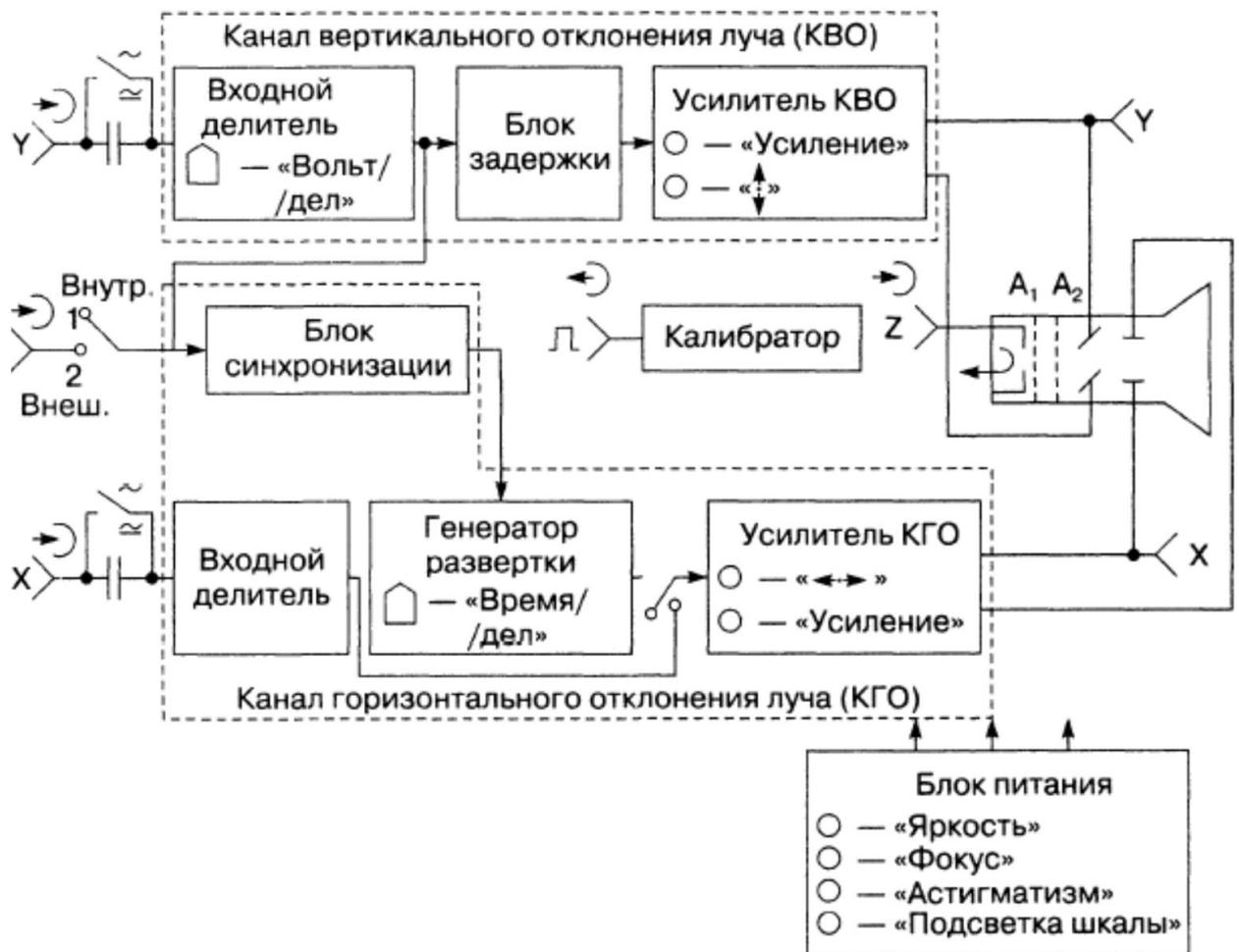


Рис. 4.2. Упрощенная структурная схема универсального аналогового осциллографа

В современных ЭО на лицевой панели указывается коэффициент отклонения по каналу X или Y :

$$k_{Y(X)} = \frac{1}{s} = \frac{U_{вх}}{h} \frac{В}{\text{дел}}, \quad (4.2)$$

а также ток накала — I_n , напряжение накала — U_n , время послесвечения — t , запирающее напряжение на управляющем электроде — U_3 и рабочее напряжение на анодах A_1 и A_2 .

Существует большое многообразие универсальных осциллографов, однако, структурная схема, определяемая особенностями ЭЛТ, у них общая (рис. 4.2). ЭЛТ, используемые в универсальных осциллографах, относятся к низковольтным — 1...3 кВ.

Универсальный осциллограф состоит из ЭЛТ с электростатическим отклонением луча, трех электрических каналов (Y , X , Z) и блока питания.

По каналу Y подается исследуемое напряжение, отклоняющее электронный луч в вертикальном направлении. Отличительным признаком входа канала Y является указание значения входного импеданса (R_{ex} , C_{ex}) на лицевой панели прибора (рядом с входом).

По каналу X подается вспомогательное напряжение, отклоняющее электронный луч в горизонтальном направлении. Вход канала X , как и вход канала Y , расположен на лицевой панели прибора.

По каналу Z подается напряжение, управляющее яркостью луча. Вход канала Z расположен на задней панели осциллографа, так как этот вход используется реже, чем входы каналов Y и X . Блок питания обеспечивает питание различными по значению напряжениями не только ЭЛТ, но и все остальные блоки осциллографа.

Входной делитель, блок задержки и усилитель образуют канал вертикального отклонения луча (КВО). Исследуемое напряжение достаточного значения может быть подано непосредственно на пластины Y .

Канал горизонтального отклонения луча (КГО) содержит входной делитель, генератор развертки, блок синхронизации и усилитель КГО, и котором формируется развертывающее пилообразное напряжение, подаваемое непосредственно или через КГО на горизонтальные отклоняющие пластины канала X .

Для проверки работоспособности осциллографа в структурную схему прибора введен калибратор — устройство, формирующее периодический импульсный сигнал с известными высокостабильными параметрами (амплитудой, частотой и

длительностью), используемый для снижения погрешности измерений.

Методика измерения параметров сигналов осциллографом. Для получения возможно меньшей погрешности измерения осциллограф должен соответствовать основным метрологическим характеристикам.

К основным метрологическим характеристикам осциллографа относятся чувствительность (либо коэффициент отклонения), полоса пропускания, значение импеданса по входу канала Y , погрешность воспроизведения формы сигнала и измерения его параметров.

Чувствительность s выражается формулой:

$$s = \frac{1}{U} \left[\frac{\text{дел}}{\text{В}} \right] \quad (4.3)$$

В техническом паспорте прибора приводится чувствительность по обоим каналам: по вертикальному каналу – s_x и горизонтальному каналу – s_y .

В современных осциллографах наиболее широкое применение нашел **коэффициент отклонения**, связанный с чувствительностью обратной зависимостью:

$$k = \frac{1}{s} \left[\frac{\text{В}}{\text{дел}} \right] \quad (4.4)$$

Полоса пропускания характеризует частотный диапазон сигналов, исследуемых и наблюдаемых на конкретном осциллографе. В этом частотном диапазоне сигнал измеряется с допустимой погрешностью. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) прибора приведена на рис. 4.3, где f_n и f_v — нижняя и верхняя граничные частоты соответственно. Узкополосные осциллографы, как правило, обладают большей чувствительностью, чем широкополосные.



Рис. 4.3. Амплитудно-частотная характеристика осциллографа

Значение импеданса по входу канала Y — это активная $R_{вх}$ и реактивная (емкостная) $C_{вх}$ составляющие входного сопротивления осциллографа. Достоинством осциллографа является большее значение входного сопротивления, что влечет за собой малое собственное потребление мощности от источника исследуемого сигнала. Значение входной емкости прямо пропорционально связано с полосой пропускания осциллографа: чем меньше входная емкость прибора, тем шире частотный диапазон.

Погрешность воспроизведения формы сигнала (искажение) и измерения его параметров обусловлена кривизной экрана, трудностью точного отсчета линейных размеров по вертикали и горизонтали, неумением оператора настроить прибор. Такая погрешность может достигать 10... 15% и является главным недостатком аналоговых осциллографов.

Осциллографические развертки. Напряжение, обеспечивающее перемещение электронного луча по горизонтали (оси времени), называется в осциллографах **развертывающим напряжением**; траектория, описываемая на экране ЭЛТ при отсутствии исследуемого напряжения, — **разверткой**; время, в течение которого описывается эта траектория, — **длительностью развертки**, а ее линейный размер по оси времени — **длиной развертки**.

Развертки, применяемые в современных аналоговых осциллографах, различаются по нескольким признакам:

- по форме развертывающего напряжения — пилообразные и синусоидальные;
- по форме траектории на экране ЭЛТ (при одновременной подаче исследуемого и развертывающего напряжений) — линейные, круговые и спиральные;
- по временным соотношениям — непрерывные, ждущие, ждущезадержанные (лупа времени) и однократные.

Наиболее широко используется линейная развертка, создаваемая напряжением U_X пилообразной формы и вырабатываемая генератором развертки. В зависимости от режима работы генератора развертки, как уже отмечалось ранее, линейная развертка может быть непрерывной или ждущей.

Непрерывная линейная развертка применяется для исследования гармонических процессов. Генератор развертки вырабатывает сигнал даже при отсутствии на его входе

запускающего сигнала. К пластинам канала Y подводится исследуемое напряжение, а к пластинам канала X — напряжение, нарастающее (или убывающее) линейно, т.е. изменяющееся пропорционально времени (рис 4.4).

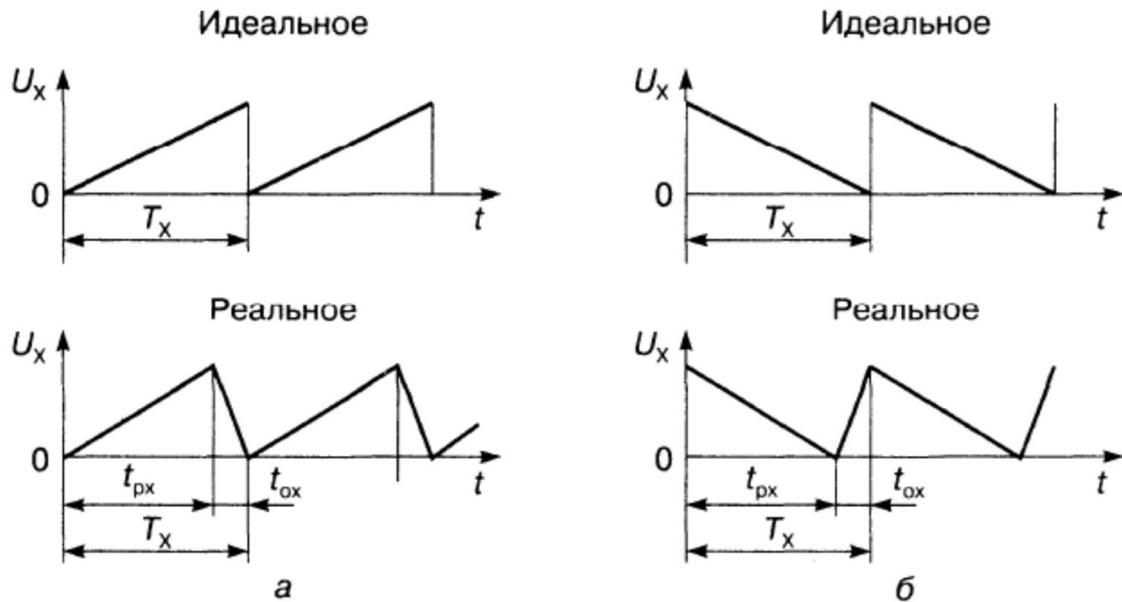


Рис. 4.4. Примеры линейно-нарастающего (а) и линейно-убывающего (б) идеального и реального развертывающего напряжения

Параметрами непрерывного реального развертывающего напряжения являются t_{px} — время рабочего (прямого) хода луча, t_{ox} — время обратного хода луча, T_x — период повторения развертывающего напряжения. Для получения возможно меньших искажений осциллограммы развертывающее напряжение должно иметь высокую линейность с возможно меньшим временем t_{ox}

Ждущая линейная развертка применяется для исследования импульсных сигналов. При этом генератор развертки запускается только с помощью сигнала запуска. К уже записанным ранее временным параметрам добавляется $t_{ож}$ — время ожидания. Под действием ждущего напряжения электронный луч, проделав за время t_{px} один прямой ход (слева направо) и за время t_{ox} — один обратный ход, остается некоторое время $t_{ож}$ в состоянии ожидания (покоя). Затем процесс перемещения луча повторится.

Ждущая развертка должна отвечать некоторым требованиям:

- для получения минимальных искажений исследуемого сигнала развертка должна быть линейной (неэкспоненциальной), как и непрерывная пилообразная, с возможно меньшим обратным ходом;

- для получения неподвижной осциллограммы при использовании ждущей и непрерывной линейной развертки необходимо применять синхронизацию.

- для получения исследуемого сигнала в крупном масштабе по горизонтали необходимо выбрать положение органа управления, задающего масштаб, — переключателя «Длительность» («Время/дел.»).

Например, необходимо исследовать и измерить импульсный сигнал прямоугольной формы длительностью $t_u = 5$ мкс осциллографом, у которого переключатель «Время/дел.» имеет положения: $0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 2 - 5 - 10 - 20 - 50 \mu s - 0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 2 - 5 - 10 - 20 - 50 ms$.

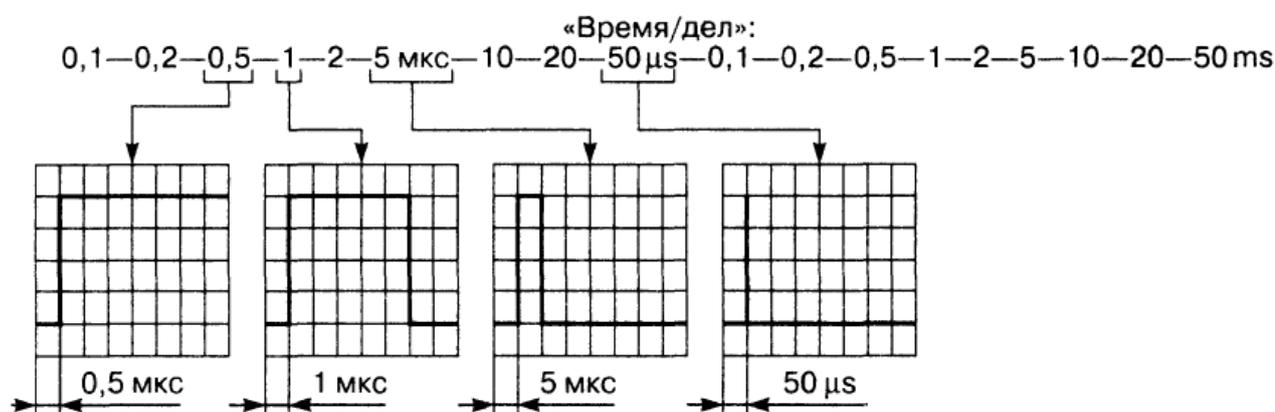


Рис. 4.5. Осциллограммы импульсного сигнала с $t_u = 5$ мкс при разных положениях переключателя

На рис. 4.5. представлены осциллограммы импульсного сигнала с $t_u = 5$ мкс при разных положениях переключателя для четырех значений калиброванной развертки: $0,5 - 1 - 5 \text{ мкс} - \mu s$

Анализ этих осциллограмм показывает, что из всех положений переключателя «Время/дел.» оптимальным является положение « $1 \mu s$ », поскольку при этом положении хорошо видна форма сигнала и длительность импульса можно измерить с наименьшей погрешностью.

Синхронизация развертки — это принудительная «подгонка» частоты развертки к кратности частоты сигнала.

Наблюдать исследуемый сигнал на экране осциллографа и измерить его параметры можно только при неподвижной осциллограмме, что обеспечивается при условии равенства или кратности частот (периодов) развертывающего и исследуемого сигналов, т.е. при:

$$F_Y = n \cdot F_X \text{ или } T_X = n \cdot T_Y, \quad (4.5)$$

где n — коэффициент частоты (периодов) сигнала: $n = 1, 2, 3 \dots$

Для выполнения этого условия и необходима синхронизация.

Внутренняя синхронизация осуществляется от внутреннего источника осциллографа. В качестве источника внешней синхронизации используется напряжение внешнего генератора. Синхронизация осуществляется короткими импульсами, вырабатываемыми блоком синхронизации, запускающими генератор развертки и управляющими его работой. Эти импульсы можно синхронизировать не только с U_y , но и со специальным внешним сигналом, поступающим на блок синхронизации при установке переключателя вида синхронизации в положение «Внеш.».

Двухлучевые осциллографы позволяют одновременно наблюдать за двумя сигналами, характеризующими исследуемый объект, благодаря получению дополнительной информации. Эту задачу можно выполнить также и однолучевым осциллографом с внешним электронным коммутатором.

Основными узлами, отличающими двухлучевой осциллограф от однолучевого, является особая ЭЛТ, внутри которой помещены две отдельные электронно-оптические системы и две отдельные системы отклоняющих пластин, т.е. двухлучевая трубка представляет собой две однолучевые трубки, работающие на общий экран.

Соответственно, в двухлучевом осциллографе имеются два канала вертикального отклонения и один общий генератор развертки. Калибратор амплитуды и длительности чаще всего также общие для двух лучей.

Для получения неподвижной осциллограммы (синхронизации) необходимо обеспечить кратность исследуемых сигналов:

$$F_{y1} = n \cdot F_{y2}, \quad (4.6)$$

где F_{y1}, F_{y2} - частота исследуемых сигналов.

Двухлучевой осциллограф отличается от однолучевого внешними признаками: он имеет два входа канала Y и по две регулировки «Яркость», «Фокус», «Астигматизм», «Перемещение по вертикали \updownarrow ».

Двухканальные осциллографы позволяют получить на экране изображение двух исследуемых сигналов с помощью электронного коммутатора, который периодически включает разные входы осциллографа. В таком осциллографе имеется также

два одинаковых канала вертикального отклонения и однолучевая ЭЛТ. В зависимости от режима работы коммутатора реализуется один из режимов работы осциллографа: одноканальный (когда на экране виден один сигнал, подаваемый на один из входов — Y_1 или Y_2) или поочередный (когда на экране видны оба сигнала за счет переключения коммутатора во время каждого обратного хода развертки). По такому же принципу, как двухканальные осциллографы, строятся многоканальные осциллографы (с количеством каналов до восьми).

Двухканальный осциллограф отличается от двухлучевого таким внешним признаком, как наличие по одной регулировки: «Яркость», «Фокус», «Астигматизм».

Двухканальные осциллографы намного проще схематически и дешевле двухлучевых.

Алгоритм подготовки осциллографа к работе:

1. включить тумблер «Сеть». При этом должна загореться индикаторная лампочка;

2. через 1—2 мин после прогрева прибора при повороте ручки «Яркость» вправо на экране должна появиться светящаяся линия развертки. Если на экране появилась не линия развертки, а точка, то во избежание выхода из строя ЭЛТ яркость свечения следует уменьшить до едва различимой и включить внутреннюю синхронизацию для получения на экране линии развертки. Если после выполнения описанных процедур на экране не появится линия развертки или точка, то следует проверить, установлены ли регулировочные органы « \leftrightarrow » и « \updownarrow » в среднее положение. Если и тогда на экране ничего не появится, то следует поворачивать регулировки «Уровень» и «Стаб.»;

3. с помощью регулировок «Яркость», «Фокус» и «Астигматизм» установить оптимальные значения перечисленных параметров горизонтальной линии развертки: линия развертки должна быть буквально волосистой, тогда измерение линейных размеров параметров обеспечит минимально возможную погрешность;

4. поскольку выбор режима работы осциллографа определяется характером и значением исследуемого сигнала, то гармонические сигналы исследуются, как правило, при положении «Внутр.» переключателя синхронизации, а импульсные — при положении

«Внеш.», При этом на разъем «Вход X» подаются импульсы синхронизации от внешнего источника;

5. переключатель по входу Y « $\sim - \sim$ » устанавливаются чаще всего в положение « \sim », что обеспечивает связь с источником исследуемого сигнала по постоянному току и дает возможность совместить линию развертки с осью времени;

6. осциллограф готов к работе, и можно подавать исследуемый сигнал через специальный кабель на вход Y . Если значение напряжения исследуемого сигнала даже приблизительно неизвестно, то необходимо переключатель «Вольт/дел.» установить в максимальное положение (чтобы не сгорела входная цепь), затем вывести его в положение, обеспечивающее оптимальный размер по вертикали. Во избежание появления большой погрешности перед измерением необходимо ручки плавного регулирования усиления по X и Y установить в крайнее правое положение «Калибр».

Цена одного деления сетки перед измерением устанавливается с помощью калибраторов амплитуды и длительности («Вольт/дел.» и «Время/дел.»).

На размеры осциллограммы по вертикали влияют следующие органы управления: многоступенчатый переключатель «Вольт/дел.», а в некоторых осциллографах — тумблер «Усилитель» на два положения (например). Произведение положений переключателя «Вольт/дел.» и тумблера «Усилитель» определяет цену одного деления масштабной сетки — c_6 .

На размеры осциллограммы по горизонтали влияют два органа управления: многоступенчатый переключатель «Время/дел.» и тумблер «Развертка» на два положения. Произведение положений этих органов управления определяет цену одного деления масштабной сетки осциллографа c_2 .

РАЗДЕЛ 5. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ

Тема 5.1. Измерение частоты и временных интервалов электрических сигналов

Измерение частоты и периода повторения сигнала.

Различные по форме (следовательно, и по назначению) сигналы характеризуются разнообразными параметрами. К важным параметрам относятся частота и связанные с ней период и длина волны электромагнитных колебаний, фазовый сдвиг, временные интервалы, коэффициент нелинейных искажений и ряд специфических параметров, характерных для модулированных сигналов и сигналов СВЧ - устройств.

Основной единицей измерения частоты сигнала является герц, но ввиду его малости в электронике используют кратные единицы: килогерц ($1 \text{ кГц} = 10^3 \text{ Гц}$); мегагерц ($1 \text{ МГц} = 10^6 \text{ Гц}$); гигагерц ($1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$). Частота сигнала измеряется электронными и электромеханическими частотомерами.

В практике электротехнических измерений в большинстве случаев измеряют **линейную частоту**, которую исторически в радиоэлектронике обозначают буквой f (высокие частоты) или буквой F (низкие частоты). Гармонические сигналы характеризуются также **угловой (круговой) частотой** ω :

$$\omega = 2\pi f \text{ [рад/с]} \quad (5.1)$$

Угловая частота равна изменению фазы сигнала $\varphi(t)$ в единицу времени. Для низких частот угловая частота записывается как:

$$\Omega = 2\pi F \quad (5.2)$$

для высоких — как
$$\omega = 2\pi f \quad (5.3)$$

При непостоянстве частоты используется понятие **мгновенной угловой частоты**

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} = 2\pi f(t), \quad (5.4)$$

где $f(t)$ — мгновенная циклическая частота.

При описании методов измерения частоты будем подразумевать ее среднее значение за время измерения. Под **линейной частотой** понимают число колебаний в единицу времени

$$F = \frac{n}{t} \quad (5.5)$$

Наряду с частотой на ВЧ и СВЧ часто используют **длину волны электромагнитных колебаний** λ , которая связана с линейной частотой зависимостью:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (5.6)$$

где c – скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с).

Реже измеряют **период электромагнитных колебаний** T , связанный с линейной частотой обратной зависимостью:

$$T = \frac{1}{F} \quad (5.7)$$

Таким образом, параметры F , T и λ связаны между собой и при необходимости можно измерить любой из них. Приборы, измеряющие частоту сигнала, называются частотомерами, длину волны — волномерами, период — периодомерами.

В зависимости от участка спектра частот электромагнитных колебаний применяются различные методы измерения, которые подразделяются на низко- и высокочастотные. Приборы для измерения низких и высоких частот также называются низко- и высокочастотными.

При измерении низких (промышленных) частот (до 1000 Гц) широко используются электромеханические частотомеры на основе электромагнитной, электродинамической, ферродинамической, выпрямительной, вибрационной систем.

Для измерения низких частот применяют осциллографические методы (методы сравнения), используемые чаще для градуировки шкал генераторов различных измерительных приборов. При реализации этого метода требуется генератор образцовой частоты более высокой точности и осциллограф. К осциллографическим методам относятся метод фигур Лиссажу, метод яркостной модуляции и метод использования калиброванной линейной развертки осциллографа. Погрешность измерения третьим методом зависит от нелинейности развертывающего напряжения, а также от погрешности отсчета линейных размеров периода и качества фокусировки и яркости луча на экране осциллографа.

В настоящее время для измерения низких частот широко используются электронные цифровые частотомеры (ЧЗ)

При измерении частоты сигнала методом дискретного счета исследуемый сигнал с частотой F_x подается на входное устройство, в котором усиливается или ослабляется до значения, необходимого для работы блока формирования сигнала (рис 5.1).

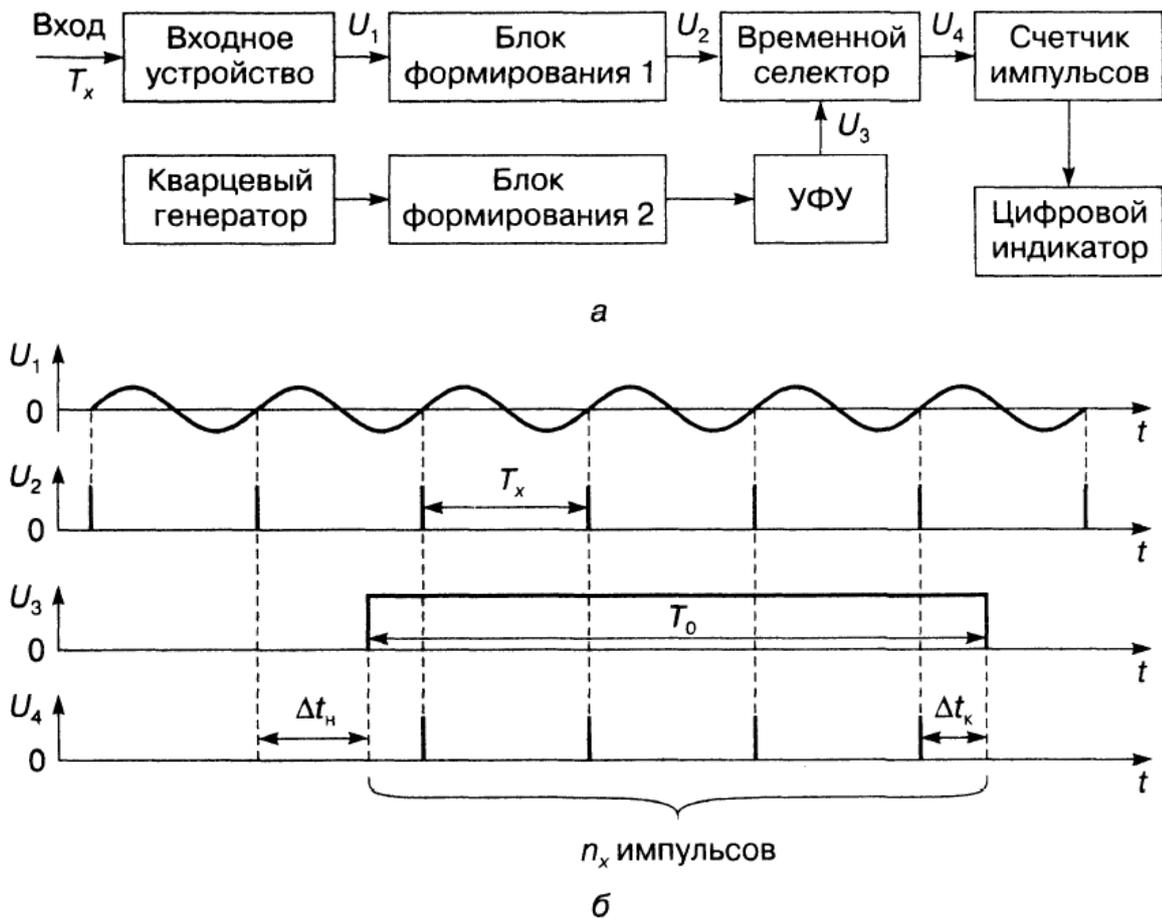


Рис. 5.1. Упрощенная структурная схема цифрового частотомера (а) и временные диаграммы, поясняющие его работу в режиме измерения частоты сигнала (б)

Поступающий в блок формирования 1 гармонический сигнал U_1 преобразуется в последовательность коротких однополярных импульсов U_2 со счетным периодом повторения $T_x = 1/F_x$. Передние фронты счетных импульсов практически совпадают с моментом перехода сигнала U_1 через нулевое значение на оси времени при его возрастании.

Затем счетные импульсы поступают на один из входов временного селектора (электронного ключа), а на другой его вход с выхода кварцевого генератора подаются импульсы прямоугольной формы, калиброванные по длительности, с периодом повторения $T_0 > T_x$ для последующего их формирования в блоке формирования 2.

Временной селектор открывается импульсом U_3 и в течение времени его действия пропускает пакет импульсов U_2 на вход счетчика. В результате на счетчик импульсов поступает n импульсов напряжением U_1 . То есть метод дискретного счета состоит в подсчете числа периодов измеряемой частоты F_x за

известный высокостабильный интервал времени T_0 . В результате измерения получим:

$$n = \frac{T_0}{T_x} \quad (5.8)$$

$$F_x \frac{n}{T_0} \quad (5.9)$$

Из анализа формулы следует, что чем ниже значение измеряемой частоты F_x , тем больше должна быть погрешность. Поэтому для получения меньшей погрешности измерения низких частот увеличивается время измерения T_0 . Следовательно, измерение низких частот требует большего времени измерения.

Диапазон измеряемых цифровым прибором частот ограничивается снизу погрешностью дискретизации, а сверху — быстродействием используемых счетчиков-делителей. Верхний предел измерения в количественном выражении не превышает 200МГц. Расширения верхнего предела добиваются переносом измеряемой частоты в область более низких частот (гетеродинное преобразование).

К основным метрологическим характеристикам частотомеров, которые необходимо знать при выборе прибора, относятся следующие:

- диапазон измерения частот;
- чувствительность — минимальное напряжение (мощность), при котором может работать прибор;
- допустимая погрешность измерения.

Тема 5.2. Измерение фазы гармонических сигналов сдвига.

Единицами измерения фазового сдвига являются радиан и градус:

$$1^\circ = \pi/180 \text{ рад} \quad (5.10)$$

Электромеханические фазометры на лицевой панели имеют знак $\Delta\varphi$. **Фаза** характеризует состояние гармонического процесса в данный момент времени:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (5.11)$$

Фазой называется весь аргумент синусоидальной функции $(\omega t + \varphi)$. Обычно измерение $\Delta\varphi$ производится для колебаний одной и той же частоты:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) \\ u_2(t) &= U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_2) \end{aligned} \quad (5.12)$$

В этом случае фазовый сдвиг:

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_1) - (\omega t + \varphi_2) = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (5.13)$$

Для упрощения принимают начальную фазу одного колебания за нуль (например, φ_2), тогда $\Delta\varphi = \varphi_1$.

Приведенное понятие фазового сдвига относится только к гармоническим сигналам. Для негармонических (импульсных) сигналов применимо понятие временного сдвига (время задержки t_3), диаграммы которого приведены на рис. 5.2.

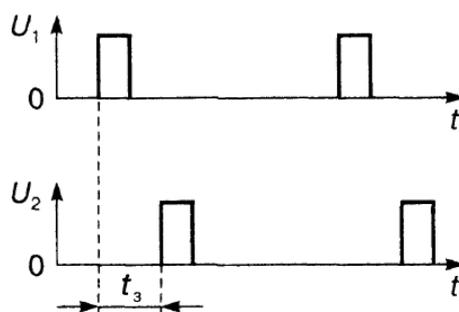


Рис 5.2. Диаграммы напряжений с временным сдвигом

Измерение фазового сдвига широко используется на промышленных и сверхвысоких частотах, т.е. во всем диапазоне частот.

Фазовый сдвиг возникает, например, между входным и выходным напряжениями четырехполюсника, а также в силовых цепях переменного тока между током и напряжением и определяет коэффициент мощности ($\cos\varphi$), следовательно, и мощность в исследуемой цепи.

Для измерения фазового сдвига на промышленных частотах широко используют электромеханические фазометры электродинамической и ферродинамической систем. Недостатками таких фазометров являются сравнительно большая потребляемая мощность от источника сигнала и зависимость показаний от частоты. Относительная приведенная погрешность электромеханических фазометров — не более $\pm 5\%$.

В зависимости от требуемой точности измерения фазового сдвига и частоты сигнала, применяют один из следующих методов:

- осциллографический (один из трех): компенсационный, электронный метод дискретного счета и метод преобразования фазового сдвига в импульсы тока;
- метод измерения с использованием фазометров на основе микропроцессорной системы;
- метод преобразования частоты сигнала.

Осциллографические методы, в свою очередь, разделяются на три:

- линейной развертки;
- синусоидальной развертки (эллипса);
- круговой развертки.

Для реализации **метода линейной развертки** используют двухканальный или двухлучевой осциллограф (или однолучевой осциллограф с электронным коммутатором). На экране получается изображение синусоидальных сигналов.

Метод линейной развертки позволяет определить знак фазового сдвига, охватывает полный диапазон его измерения — $0...360^\circ$. Погрешность метода составляет $\pm(5...7^\circ)$.

Метод синусоидальной развертки реализуется с помощью однолучевого осциллографа. Исследуемые сигналы с напряжением $u_1(t)$ и $u_2(t)$ подаются на входы X и Y осциллографа при выключенном внутреннем генераторе линейной развертки. На экране появится фигура в виде эллипса, форма которого зависит от фазового сдвига между двумя напряжениями и их амплитуд.

Погрешность измерения $\Delta\varphi$ методом синусоидальной развертки (методом эллипса) зависит от точности измерения отрезков, входящих в уравнение, от качества фокусировки и яркости луча на экране ЭЛТ.

Оба рассмотренных метода являются косвенными и достаточно трудоемкими.

Метод круговой развертки — наиболее удобный осциллографический метод измерения фазового сдвига. При этом определяется знак фазового сдвига во всем диапазоне измерения угла ($0...360^0$). Погрешность измерения постоянна во всем диапазоне.

Абсолютная погрешность измерения методом круговой развертки достигает $2...5^0$ и зависит от точности определения центра круга, точности измерения фазового сдвига с помощью транспортира и от степени идентичности порога срабатывания обоих формирователей.

Компенсационный метод (метод наложения) реализуется с помощью осциллографа.

Погрешность измерения компенсационным методом небольшая ($0,2...0,5^0$) и определяется главным образом качеством градуировки фазовращателя.

Компенсационный метод применяют и в диапазоне СВЧ при измерении фазового сдвига, вносимого каким-либо элементом, дополнительно включаемым в тракт СВЧ (фильтром, отрезком волновода).

Электронный метод дискретного счета положен в основу работы цифрового фазометра и состоит из двух основных этапов: преобразование фазового сдвига в соответствующий интервал времени и измерение этого интервала времени методом дискретного счета.

Общая погрешность измерения этим методом зависит от погрешности дискретности, которая связана с тем, что интервал Δt измеряется с точностью до одного периода T_0 и от нестабильности времени срабатывания преобразователя.

Большими возможностями обладают фазометры со встроенным микропроцессором, которыми можно измерять фазовый сдвиг между двумя периодическими сигналами за любой выбранный период.

Малую погрешность измерения $\Delta\varphi$ данным фазометром можно получить только на достаточно низкой частоте исследуемых сигналов. Расширить частотный диапазон позволяет предварительное (гетеродинное) преобразование сигналов.

К основным метрологическим характеристикам фазометров, которые необходимо знать при выборе прибора, относятся следующие:

- назначение прибора;
- диапазон измерения фазового сдвига;
- частотный диапазон;
- допустимая погрешность измерения.

РАЗДЕЛ 6. ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

При контроле технического состояния электронных устройств важное место занимает измерение частотных характеристик различных их узлов, а именно амплитудно-частотных характеристик (АЧХ).

Многополюсник — электрическая цепь, содержащая несколько точек (полюсов, портов) для соединения с другими цепями. Частными случаями многополюсника являются двухполюсник (например, согласованная нагрузка), четырёхполюсник (например, аттенюатор), шестиполюсник (например, циркулятор или смеситель), восьмиполюсник (например, направленный ответвитель) и др.

Четырёхполюсник — электрическая цепь, разновидность многополюсника, имеющая четыре точки подключения. Как правило, две точки являются входом, две другие — выходом.

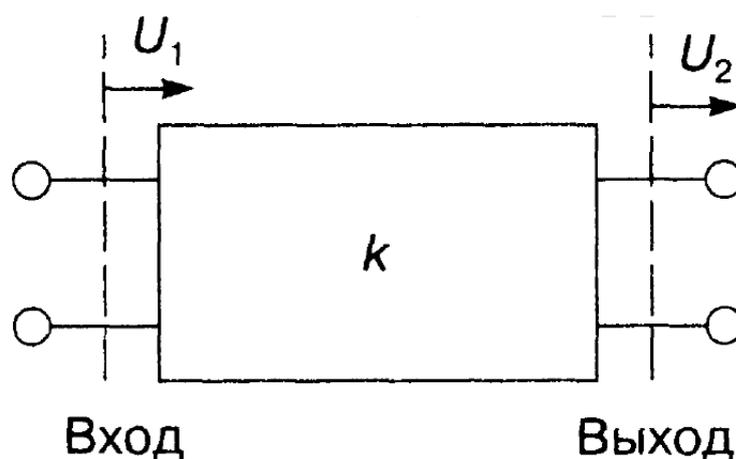


Рис.6.1. Схема четырёхполюсника

В электронике широко используют линейные четырёхполюсники, АЧХ которых определяется зависимостью модуля коэффициента передачи от частоты сигнала.

Коэффициент передачи k , в цепях с сосредоточенными постоянными представляет собой отношение комплексных амплитуд выходного и входного гармонических напряжений одной частоты при условии отсутствия отражения на входе, как показано на схеме четырёхполюсника (рис. 6.1):

$$k = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \quad (6.1)$$

Если $U_2 < U_1$ то происходит ослабление сигнала при прохождении его через четырехполосник (в этом случае — пассивный), а коэффициент передачи $k < 1$.

Если $U_2 > U_1$, то сигнал усиливается, четырехполосник является активным, а $k > 1$. Значения коэффициента передачи четырехполосника и частоты сигнала, на которой проводится его измерение, образуют точку в системе соответствующих координат, а совокупность таких же точек образуют АЧХ в рассматриваемом частотном диапазоне.

Измерения параметров АЧХ четырехполосника выполняются одним из двух методов:

- снятием зависимости модуля коэффициента передачи от частоты по точкам с последующим интерполированием кривой АЧХ;

- получением панорамного изображения АЧХ с использованием генератора качающейся частоты и индикатора.

На практике при исследовании четырехполосников определяют чаще всего АЧХ (рис. 6.2), которая отражает его свойства в исследуемой полосе частот — полосе пропускания, в которой модуль коэффициента передачи не должен быть меньше $0,7k_{max}$.

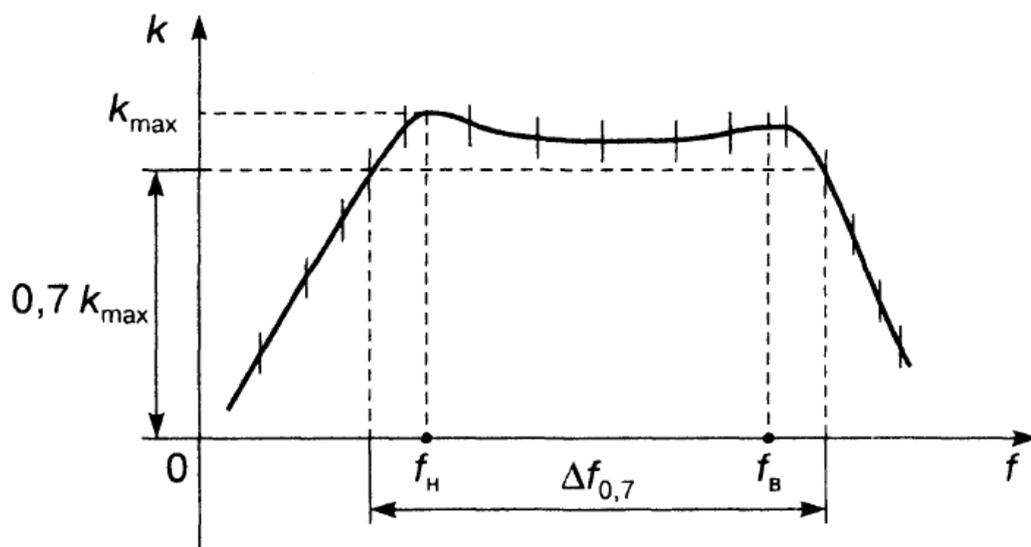


Рис. 6.2. АЧХ четырехполосника

Полоса пропускания линейного четырехполосника ограничивается нижней f_H и верхней f_B частотой, поэтому его ширина составляет:

$$\Delta f = f_B - f_H \quad (6.2)$$

Метод снятия АЧХ по точкам реализуется с помощью диапазонного генератора синусоидального сигнала и вольтметра (рис. 6.3).

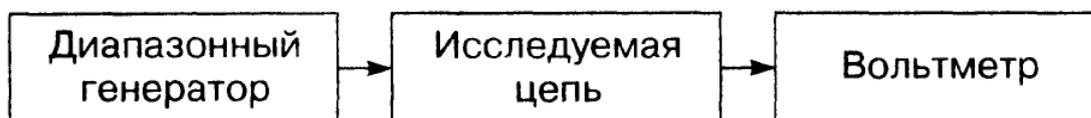


Рис. 6.3. Структурная схема соединения приборов при снятии АЧХ четырехполюсника по точкам

Изменяя частоту гармонических колебаний в исследуемой полосе частот, измеряют вольтметром напряжение на выходе проверяемого четырехполюсника при постоянстве значения входного напряжения.

По результатам измерений графически строят АЧХ.

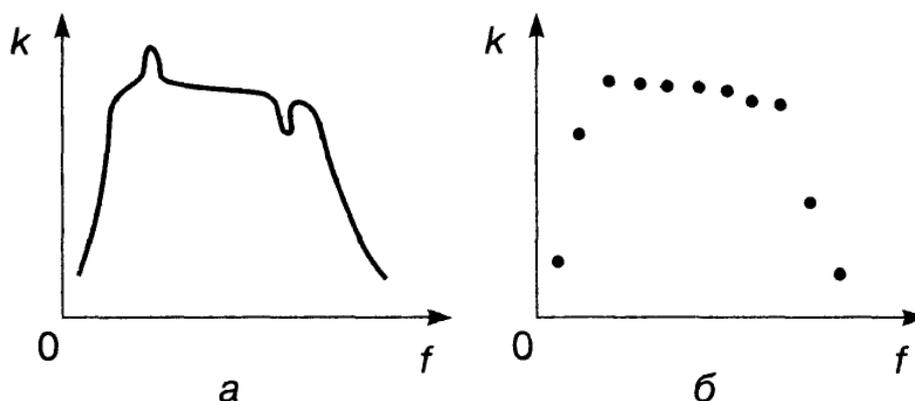


Рис. 6.4. Достоверная кривая АЧХ четырехполюсника (а) и кривая, снятая по точкам (б)

Рассмотренный метод имеет ряд недостатков:

- трудоемкость измерения, связанная со снятием АЧХ по точкам, количество которых прямо пропорционально требуемой точности измерения;
- влияние длительных измерений на характер кривой АЧХ, изменения температуры окружающей среды и питающего напряжения, которые искажают достоверную кривую (рис. 6.4, а);
- возможность пропуска резких изменений кривой в промежутках между точками (рис. 6.4, б) из-за дискретности воспроизведения АЧХ.

Метод получения панорамного изображения лежит в основе работы специальных панорамных приборов — характериографов. Этот метод лишен недостатков, присущих методу снятия АЧХ по точкам, но имеет меньшую точность измерения из-за короткого времени измерения в каждой точке кривой АЧХ.

Структурная схема простейшего измерителя АЧХ (рис. 6.5) состоит из генератора качающейся частоты (ГКЧ), частота которого плавно изменяется по определенному закону в рассматриваемой полосе частот, и индикатора, воспроизводящего кривую АЧХ.

В качестве индикатора обычно используется осциллограф.

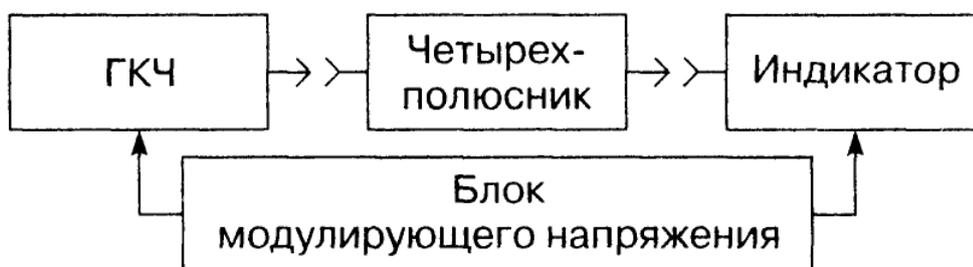


Рис. 6.5. Структурная схема простейшего измерителя АЧХ

Сигнал с ГКЧ подается на вход исследуемого четырехполюсника. Поскольку модуль коэффициента передачи четырехполюсника зависит от частоты сигнала на входе, то на его выходе сигнал изменяется по амплитуде. Огибающая этого сигнала, выделяемая детектором, который входит в состав индикатора, управляет отклонением луча индикатора по вертикали, изображая кривую АЧХ. Одновременно блок модулирующего напряжения синхронизирует работу ГКЧ и индикатора и управляет частотой ГКЧ и отклонением луча индикатора по горизонтали.

Измерение модуля коэффициента передачи основано на методе замещения. Для этого перед началом измерения прибор калибруется сигналом, подаваемым с ГКЧ непосредственно на индикатор, а имеющийся на выходе ГКЧ аттенюатор устанавливается в положение максимального ослабления, условно принимаемого за нуль. После подключения четырехполюсника восстанавливают показания индикатора, которые соответствовали его положению при калибровке, изменяя ослабление аттенюатора ГКЧ, определяют ослабление или усиление четырехполюсника. При заранее калиброванной шкале осциллографического индикатора также можно провести измерение АЧХ, не отключая четырехполюсник.

Для повышения качества измерений и расширения функциональных возможностей прибора в структурную схему панорамного измерителя АЧХ вводятся дополнительные узлы (рис. 6.6).

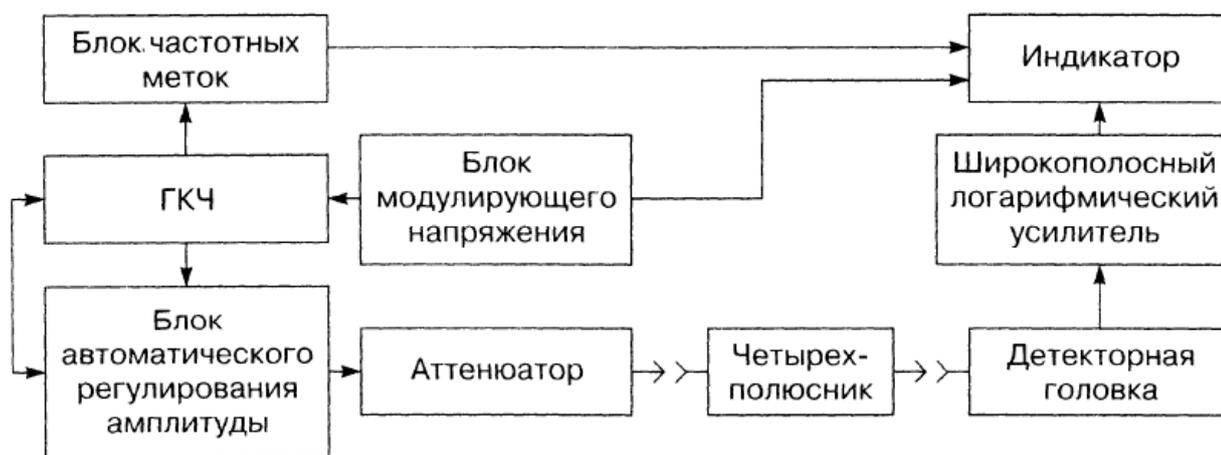


Рис. 6.6. Структурная схема панорамного измерителя АЧХ

Центральным узлом измерителя АЧХ является ГКЧ, который в зависимости от предъявляемых к нему требований выполняется в двух вариантах. Для получения большой выходной мощности и малых нелинейных искажений колебания вырабатываются непосредственно задающим автогенератором качающейся частоты.

В качестве индикатора чаще всего используется дисплей. В зависимости от скорости качания частоты ГКЧ выбирают дисплеи с нормальным или длительным послесвечением, с электромагнитным или с электростатическим управлением луча.

На уменьшение погрешности измерения АЧХ и увеличение разрешающей способности прибора оказывают влияние размеры рабочей части дисплея.

В зависимости от ширины полосы качания характеристики подразделяются на: узкополосные, широкополосные и комбинированные.

Узкополосные характеристики обеспечивают полосу качания, составляющую доли и единицы процента центральной частоты; широкополосные имеют полосу качания, составляющую полный диапазон частот прибора; комбинированные объединяют в себе функции узкополосных и широкополосных.

Характеристики классифицируются еще по нескольким параметрам:

- по допустимым значениям основных частотных и амплитудных параметров — на классы точности;
- числу одновременно исследуемых АЧХ — одно- и многоканальные;
- динамическому диапазону воспроизведения АЧХ — с линейным и логарифмическим масштабом по амплитуде.

Использование в составе характериографов встроенного микропроцессора (рис. 6.7) позволяет повысить уровень их автоматизации



Рис. 6.7. Структурная схема характериографа со встроенным микропроцессором

Микропроцессор выполняет функции управления характериографом и обработки измерительной информации и решает следующие задачи управления: установка поддиапазонов частот и перестройка частоты в полосе качания; запуск частотомера; установка коэффициента передачи управляемого усилителя; установка поддиапозона детектора; индикация результатов измерения и функционирования измерителя.

На основе поступающей в микропроцессор информации об уровне выходного сигнала с аттенюатора, о частоте выходного сигнала с частотомера и уровне измеряемого сигнала с детектора производится расчет параметров АЧХ исследуемого четырехполюсника. Одновременно обеспечивается линеаризация частотного масштаба и осуществляется коррекция неравномерности собственно АЧХ, что снижает погрешность измерения. При работе на малых уровнях сигнала для уменьшения влияния шумов и помех предусмотрен режим многократной выборки и усреднения результатов измерения.

РАЗДЕЛ 7. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЕЙ

Тема 7.1. Измерение параметров с сосредоточенными параметрами

С точки зрения соотношения размеров цепей и рабочей длины волны электрических колебаний различают цепи с сосредоточенными и распределенными постоянными (параметрами).

Цепи с сосредоточенными постоянными — это цепи, физические размеры которых много меньше рабочей длины волны колебаний. Их характеристики фактически не зависят от конфигурации выводов пассивных и активных элементов и размеров соединительных проводов.

Цепи с распределенными постоянными — это цепи, физические размеры которых соизмеримы с рабочей длиной волны колебаний. Каждый элемент или соединительный провод в таких цепях обладает сопротивлением, индуктивностью и емкостью. Такие цепи называются также длинными линиями, или СВЧ-трактами.

В большинстве случаев при выборе полупроводниковых приборов важны сведения об их статических, динамических и предельных параметрах.

Статические параметры характеризуют поведение приборов при постоянном токе, динамические — их частотно-временные свойства, предельные параметры определяют область устойчивой и надежной работы.

Основными параметрами, характеризующими электрические и электронные цепи, являются активное сопротивление R резисторов, емкость C конденсаторов и индуктивность L катушек. Т.к. не всегда удается определить значение параметров напрямую, то в ряде случаев определяют косвенные (вторичные) параметры элементов и цепей: проводимость g (величина, обратная сопротивлению), полное сопротивление Z , добротность Q , тангенс угла потерь $tg \delta$, собственная емкость C_L катушек индуктивности, характеристическое сопротивление p .

Добротность характеризует колебательную систему, катушки индуктивности и конденсаторы и является безразмерным параметром.

Тангенс потерь характеризует потери в диэлектрике конденсатора и является безразмерным параметром.

Для резисторов основной единицей измерения является ом (Ом). Ввиду его малости в электротехнических измерениях применяются и кратные единицы: килоом ($1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом}$), мегаом ($1 \text{ МОм} = 10^6 \text{ Ом}$), гигаом ($1 \text{ ГОм} = 10^9 \text{ Ом}$).

Для конденсаторов основной единицей измерения является фарад (Ф). Ввиду того, что фарад является крупной единицей, применяются в основном дольные единицы: микрофарад ($1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$), нанофарад ($1 \text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}$), пикофарад ($1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$).

Для катушек индуктивности и дросселей основной единицей измерения является генри (Гн). Так как эта единица очень большая, то используют дольные единицы: миллигенри ($1 \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн}$), микрогенри ($1 \text{ мкГн} = 10^{-6} \text{ Гн}$).

Специфика измерений параметров электрических цепей связано с большим интервалом измеряемых величин: так, измеряемые емкости могут изменяться от десятков пикофарад (в радиоприемниках) до фарад (в системах пуска двигателя), напряжение – от микровольт до сотен вольт и так далее интервал величин, измеряемых прибором, полностью определяется его физическим устройством. Но не всегда нужен прибор максимальной точности, так, аналоговые электромагнитные гальванометры, часто применяемые на производстве, выбираются по двум признакам: надежности и наглядности.

Табл. 7.1. Сравнение приборов, в зависимости от принципа действия

Магнитоэлектрические приборы	Ферродинамические приборы	Электромагнитные приборы
Высокая точность и чувствительность	Точность меньше, чем у магнитоэлектрического	Точность и чувствительность низкие
Показания не зависят от внешнего магнитного поля	Высокая чувствительность	Нелинейная шкала затрудняет измерения
Применим только к системам постоянного тока	Применим и к цепям постоянного тока, и к цепям переменного	Высокая надежность

Магнитоэлектрические и ферродинамические приборы недостаточно надежны, а цифровые приборы, если в них не предусмотрена функция усреднения показаний, могут быть неудобны для измерения цепей с быстро меняющимися параметрами.

В зависимости от измеряемого параметра, погрешности измерения, частотного диапазона и некоторых других характеристик применяются различные методы измерений, которые можно разделить на низкочастотные и высокочастотные.

К низкочастотным методам измерений относятся метод амперметра–вольтметра (вольтметра—амперметра), мостовой метод и метод дискретного счета.

К высокочастотным методам измерений относятся метод амперметра-вольтметра и резонансный метод.

Метод амперметра—вольтметра является одним из наиболее простых, но и менее точных методов измерений и может использоваться в цепях постоянного и переменного тока.

Метод амперметра—вольтметра является косвенным, так как основан на использовании закона Ома, но которому измеряемое сопротивление прямопропорционально падению напряжения на нем и обратно пропорционально силе тока, протекающего по нему.

Мостовой метод положен в основу работы измерительных мостов (Е7), которые являются универсальными приборами. С их помощью можно измерят сопротивление резисторов, емкость конденсаторов, индуктивность катушек, добротность и тангенс потерь.

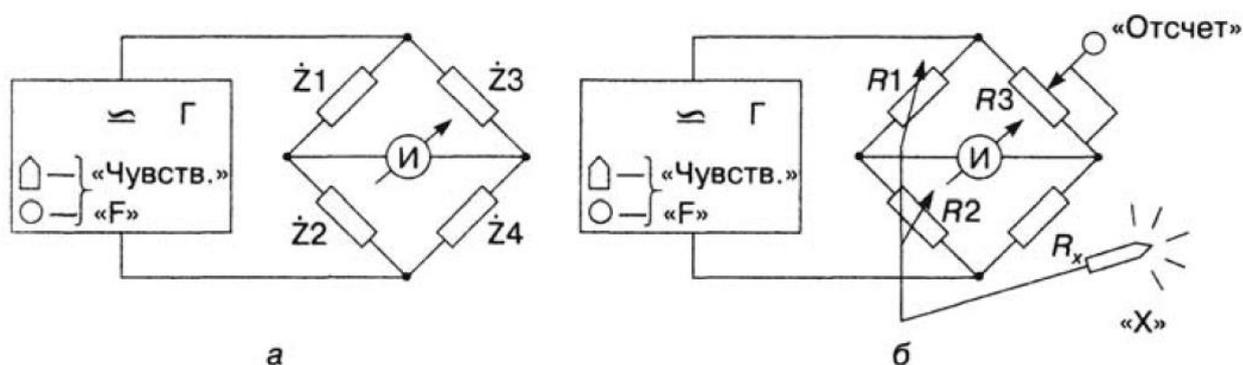


Рис. 7.1. Схемы четырехплечного моста в общем виде (а) и для измерения сопротивления резисторов (б)

Название «мост» прибор получил потому, что между двумя параллельными ветвями индикаторная диагональ образует как бы мост ($Z1$, $Z2$ и $Z3$, $Z4$). Ветви, в которые включены комплексные

сопротивления Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 , называют плечами моста. В одну диагональ моста включен генератор G питающего напряжения, в другую — индикатор I равновесия (баланса) моста (рис. 7.1, а).

Измерение сопротивления резисторов выполняют в цепях постоянного и переменного тока. Во все плечи моста включены чисто активные сопротивления (рис 7.1, б).

Условием равновесия моста является равенство произведений сопротивлений двух противоположных плеч:

$$R_x \cdot R_1 = R_2 \cdot R_3, \quad (7.1)$$

Откуда
$$R_x = \frac{R_2}{R_1} \cdot R_3. \quad (7.2)$$

Признак равновесия моста — отсутствие показаний на индикаторе.

Если поменять местами индикаторную диагональ и диагональ питания, то равновесие моста не нарушится.

Процесс уравнивания моста постоянного тока достигается изменением (подбором) отношения R_2/R_1 переключателя «Множитель» и плавным изменением сопротивления потенциометра R_3 — регулировки «Отсчет», что позволяет значительно расширить диапазон измерения. Уравнивание моста считается законченным при полностью использованном значении напряжения питания (регулировка «Чувствительность») генератора.

Результат измерения представляет собой произведение от умножения показания регулировки «Отсчет» на показание переключателя «Множитель». Чувствительность моста зависит от чувствительности используемого индикатора и значения напряжения источника питания. Поэтому в качестве индикатора в аналоговых мостах используется прибор магнитоэлектрической системы с двухсторонней шкалой (с нулем посередине).

Измерение емкости конденсаторов выполняется мостом только переменного тока. Сопротивление четырехплечного моста в общем виде носит комплексный характер, поэтому условия равновесия моста переменного тока будут определяться двумя условиями: по модулю и по фазе.

В качестве индикатора равновесия моста служат электромеханический индикатор выпрямительной системы или электронный вольтметр типа У—Д, в точных мостах — электронный

осциллограф (в момент равновесия моста на экране ЭЛТ будет только горизонтальная линия развертки).

Конденсаторы различаются не только значением емкости и рабочим напряжением, но и активными потерями в диэлектрике, которые характеризуются тангенсом угла потерь $tg \delta$ (рис 7.2).

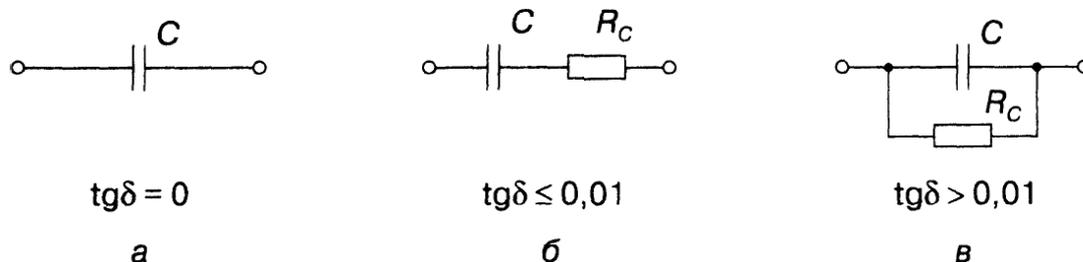


Рис. 7.2. Эквивалентные схемы конденсаторов без потерь (а), с малыми (б) и с большими потерями (в)

Рассмотрим функциональную схему моста для измерения емкости конденсаторов с малыми потерями (рис. 7.3, а).

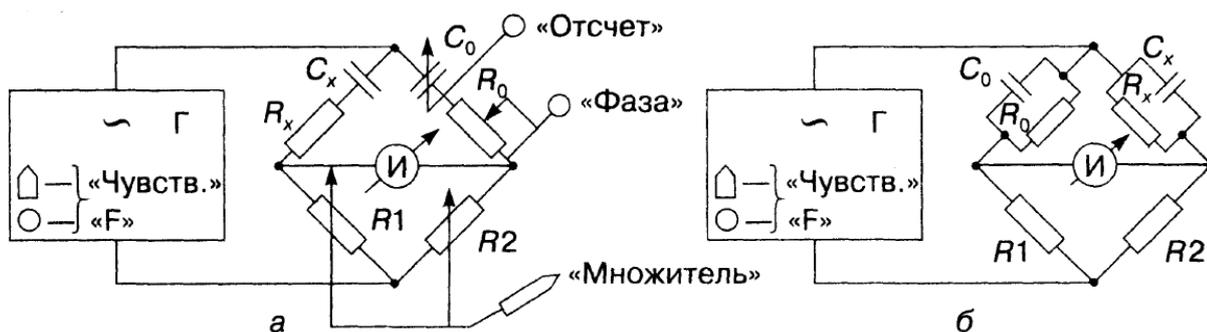


Рис. 7.3. Функциональные схемы мостов для измерения емкости конденсаторов с малыми (а) и с большими потерями (б)

Условие равновесия моста в комплексном виде выражается как:

$$R_1 \left(RP_0 + \frac{1}{j\omega C_0} \right) = R_2 \left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right). \quad (7.3)$$

Раскрыв скобки и приравняв отдельно вещественные и мнимые части, получим:

$$R_1 \cdot RP_0 = R_2 \cdot R_x, \quad (7.4)$$

Откуда
$$R_x = RP_0 \cdot \frac{R_1}{R_2} \text{ (по фазе)} \quad (7.5)$$

$$\frac{R_1}{j\omega C_0} = \frac{R_2}{j\omega C_x}, \quad (7.6)$$

Откуда
$$C_x = C_0 \cdot \frac{R_2}{R_1} \text{ (по модулю)}. \quad (7.7)$$

С помощью рассматриваемой схемы моста можно измерять $tg \delta$. Электрическая цепь левого верхнего плеча моста показана на рис. 7.4, а.

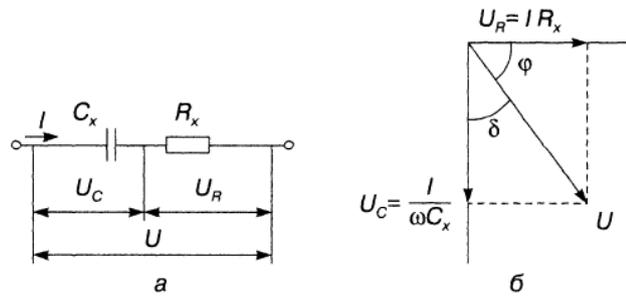


Рис. 7.4. Электрическая цепь левого верхнего плеча моста (а) и векторная диаграмма тока и напряжений в плече (б)

В векторной диаграмме (рис. 7.4, б) угол φ – фазовый сдвиг между током и напряжением в левом плече, угол δ — угол потерь в диэлектрике:

$$tg\delta = \frac{U_R}{U_C} = \frac{I \cdot R_x \cdot \omega \cdot C_x}{I} = \omega C_x R_x. \quad (7.8)$$

Определим $tg\delta$ через известные (образцовые) параметры элементов цепи. Для этого перемножим уравнения, умножив левую и правую части на ω :

$$\omega C_x R_x = \omega C_0 R_0 = tg\delta. \quad (7.9)$$

Из выражения (7.9) следует, что при $\omega = const$ и $C_0 = const$ сопротивление образцовой цепи R_0 можно градуировать непосредственно в значениях $tg\delta$.

Рассмотрим функциональную схему моста для измерения емкости конденсаторов с большими потерями (см. рис. 7.3, б).

Условие равновесия моста в комплексном виде выражается формулой:

$$\frac{R_1}{R_x + \frac{1}{\omega C_x}} = \frac{R_2}{R_0 + \frac{1}{\omega C_0}}, \quad (7.10)$$

откуда

$$C_x = C_0 \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (\text{по модулю}) \quad (7.11)$$

$$R_x = R_0 \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (\text{по фазе}) \quad (7.12)$$

Тангенс угла потерь конденсатора находим по формуле:

$$tg\delta = \frac{1}{\omega C_x \cdot R_x} = \frac{R_0}{\omega C_0}. \quad (7.13)$$

Условие равновесия моста зависит от частоты, поэтому мостовые схемы измерения предназначены для работы на одной (реже — на двух) фиксированной частоте.

Измерение индуктивности катушек выполняется мостом только переменного тока (рис 7.5). Измерение возможно путем сравнения с индуктивностью L_0 образцовой катушки или с емкостью C_0 образцового конденсатора. Образцовые катушки

переменной индуктивности изготовить трудно, и надежность их невысока, поэтому на практике используют схемы сравнения с образцовыми конденсаторами.

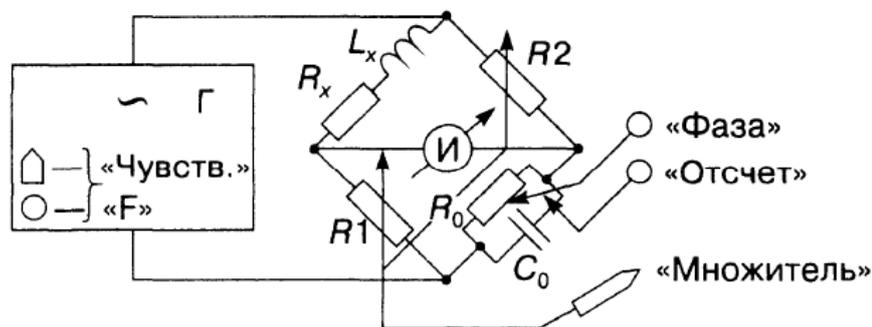


Рис. 7.5. Функциональная схема моста для измерения индуктивности катушек

Условие равновесия моста:

$$R_1 \cdot R_2 = \dot{Z}_0 \cdot \dot{Z}_x; \quad (7.14)$$

$$\dot{Z}_x = R_x + j\omega L_x; \quad (7.15)$$

$$\dot{Z}_0 = \frac{R_0}{1 + j\omega C_0 R_0}, \quad (7.16)$$

где R_x – сопротивление потерь в измеряемой катушке.

$$R_1 \cdot R_2 = (R_x + j\omega L_x) \frac{R_0}{1 + j\omega C_0 R_0} \quad (7.17)$$

откуда

$$R_1 \cdot R_2 = R_x \cdot R_0; \quad (7.18)$$

$$R_x = \frac{R_1}{R_0} \cdot R_2; \quad (7.19)$$

$$j\omega L_x R_0 = j\omega C_0 R_0 R_1 R_2, \quad (7.20)$$

$$\text{откуда} \quad L_x = C_0 R_1 R_2. \quad (7.21)$$

С помощью рассматриваемого моста можно измерять также добротность Q катушек. Известно, что

$$Q = \omega L / R. \quad (7.22)$$

Получим

$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega C_0 R_0. \quad (7.23)$$

Таким образом, мостовая схема для измерения параметров R , L , C , Q , $\text{tg} \delta$ применяется в так называемых универсальных мостах, представляющих собой сочетание мостов постоянного и переменного тока.

Источниками погрешности при измерении параметров элементов цепей мостовым методом являются неточность уравнивания моста, нестабильность значения напряжения и частоты источника питания моста, погрешность значений образцовых элементов.

К достоинствам мостового метода относятся универсальность мостов при измерении параметров; к недостаткам — большая погрешность (до 3%) аналоговых мостов, невозможность измерения параметров на рабочих частотах, трудоемкость измерений. Меньшую погрешность (0,2%) и возможность автоматизации измерений обеспечивают цифровые мосты.

Резонансный метод является высокочастотным и основан на использовании электрического резонанса в колебательной системе. На низких частотах колебательные системы с достаточно высокой добротностью создать трудно, поэтому невозможна точная фиксация момента настройки контура в резонанс. Кроме того, габариты колебательной системы на низких частотах непомерно увеличиваются.

Резонансный метод положен в основу работы куметров (Q — характеристика добротности катушек индуктивности, контуров, конденсаторов).

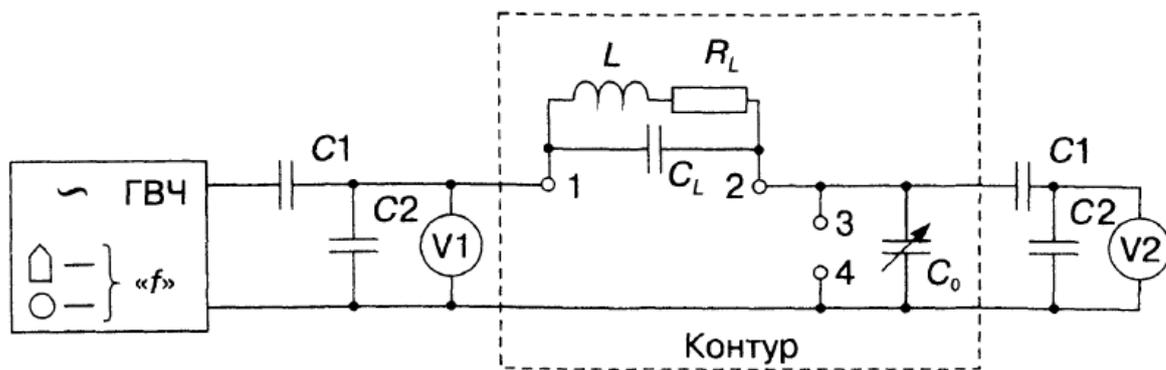


Рис. 7.6. Функциональная схема куметра

Прибор состоит из ГВЧ, измерительного контура LC , индикатора резонанса V_2 и вольтметра V_1 , контролирующего величину входного напряжения. Генератор и индикатор V_2 слабо связаны с измерительным контуром, чтобы вносимые ими сопротивления не влияли на параметры контура. Для этого генератор и индикатор V_2 соединяются с контуром через емкостные делители напряжения C_1 , C_2 . В качестве индикатора резонанса используется электронный вольтметр типа Д—У или электромеханический индикатор выпрямительной системы.

Методика измерения заключается в определении резонансной частоты измерительного контура, состоящего из измеряемого элемента (катушки индуктивности L_x) и образцового элемента

(конденсатора C_0). Значение L_x (или C_x) вычисляется по формуле Томпсона:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (7.24)$$

При измерении индуктивности катушки ее подключают к зажимам 1—2. При этом измерительный контур образован катушкой L_x с активными потерями R_L межвитковой емкостью ее проводов C_L и перестраиваемой образцовой емкостью C_0 . Резонанс в контуре на заданной частоте достигается изменением емкости C_0 образцового конденсатора. Момент резонанса контура определяется по индикатору V_2 . Значение определяется косвенно по расчетной формуле:

$$L_x = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_0}. \quad (7.25)$$

При постоянстве входного напряжения вольтметр V_2 можно градуировать в единицах добротности. Следовательно, этот метод является прямым.

С помощью приведенной схемы куметра можно определять параметры C , Q , $\operatorname{tg}\delta$ и R , подключая измеряемый конденсатор или резистор к зажимам 3—4:

$$C_x = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L_0}. \quad (7.26)$$

При измерении C_x контур составляется из образцовой катушки L_0 и измерительного конденсатора C_x .

Измерение добротности Q можно выполнять методом вольтметров или методом расстройки частоты.

Метод вольтметров состоит в следующем. В контур вводится напряжение U_1 известного значения. В момент резонанса измеряется напряжение U_2 на контуре.

Поскольку U_2 больше U_1 в Q раз, то

$$Q = \frac{U_1}{U_2}, \text{ при } U_1 = \text{const}. \quad (7.27)$$

При постоянстве входного напряжения вольтметр V_2 можно градуировать в единицах добротности. Следовательно, этот метод является прямым. Диапазон измерения регулируется изменением подводимого к контуру напряжения U_1 .

Метод расстройки частоты (косвенный) состоит в следующем. Контур настраивают в резонанс на частоту f_0 (рис. 7.7), при этом фиксируется максимальное показание индикатора резонанса по V_2 . Затем контур расстраивают до частот f_1 и f_2 от резонансной до значения $0,7Q_{\max}$, тогда

$$Q = \frac{f_0}{2\Delta f_{0,7}}. \quad (7.28)$$

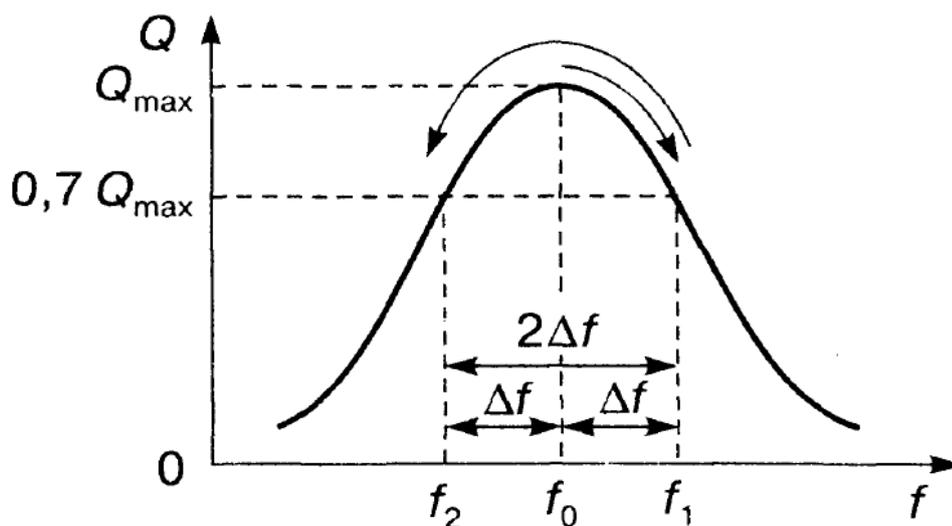


Рис. 7.7. Резонансная кривая при измерении добротности методом расстройки частоты

К достоинствам куметров относится необходимость проведения измерений на рабочих частотах и измерения большого количества параметров; к недостаткам – трудоемкость измерений, большая погрешность измерения (1...5%), причинами которой являются нестабильность напряжения и частоты ГВЧ, неточность градуировки шкалы образцового конденсатора C_0 , погрешность приборов V_1 и V_2 , погрешность считывания показаний.

Тема 7.2. Измерение параметров полупроводниковых приборов

Современные сложные электронные устройства различного назначения характеризуются высокой надежностью и малыми габаритными размерами благодаря применению в них диодов, транзисторов и интегральных микросхем (ИМС), выполняющих вполне конкретные функции.

Входящие в состав ИМС диоды, транзисторы, резисторы и конденсаторы оказывают влияние на свойства микросхем и при недостаточности информации об их параметрах, особенностях эксплуатации, схемах включения не обеспечивают наилучшие режимы работы электронного устройства в целом. Разброс параметров и характеристик полупроводниковых приборов и ИМС одного и того же типа, чувствительность к перегрузкам, влияние изменения температуры приводят к необходимости перед установкой в электронную схему проводить их испытание.

Полупроводниковые приборы классифицируются по функциональному назначению, мощности и граничной частоте применимости.

Измерение параметров диодов принципиально отличается от рассмотренных ранее измерений аналогичных параметров, что объясняется зависимостью свойств полупроводниковых приборов от внешних условий (главным образом, от температуры) и нелинейностью вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов.

В соответствии с первой причиной следует учитывать разогрев p - n – перехода проходящим током во время измерения, что требует обеспечения отвода тепла исследуемого диода (теплоотвод) и ограничения времени измерения.

Вторая причина обязывает выполнять измерения при определенных значениях напряжения и силы тока.

Сила тока, протекающего через диод, зависит от знака и значения приложенного напряжения. Эта зависимость наглядно представляется вольт-амперной характеристикой, где по оси ординат откладывают значение силы тока диода, а по оси абсцисс — приложенное напряжение. Поскольку прямой ток обычно превышает обратный в тысячи раз, то ВАХ диодов строят в разных масштабах: прямой ток откладывают в миллиамперах, обратный —

в микроамперах. Масштаб обратного напряжения выбирают более крупным, чем масштаб прямого напряжения.

ВАХ полупроводникового диода представлена на рис. 7.8, а, где хорошо видно, что при большом обратном напряжении резко возрастает обратный ток.

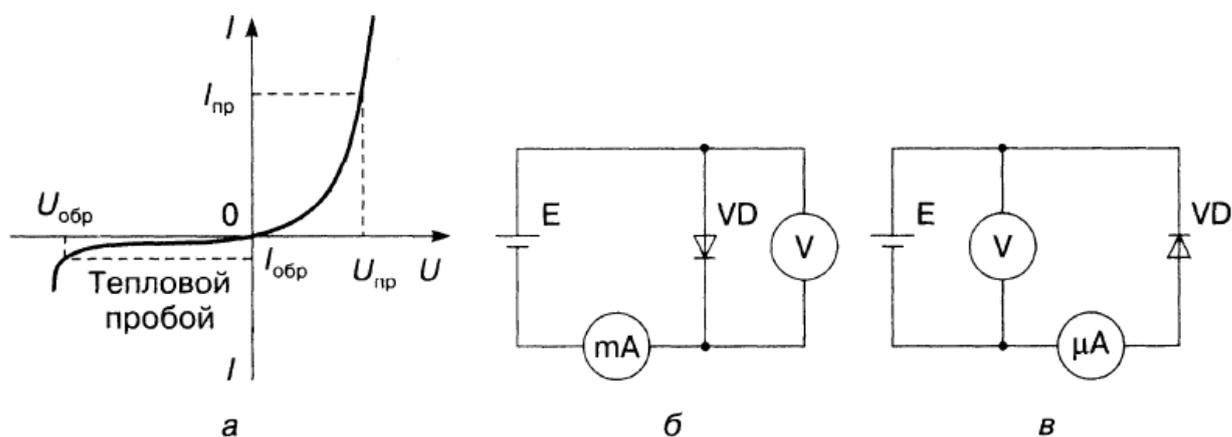


Рис. 7.8. ВАХ диода (а), схема измерения на прямой (б) и обратной (в) ветвях

Это явление сопровождается тепловым необратимым пробоем диода и выходом его из строя. На ВАХ имеются области с различным дифференциальным сопротивлением $R_{\text{диф}} = \Delta U / \Delta I$, поэтому необходимая точность определения параметров может быть достигнута при соблюдении некоторых условий измерения.

При измерении параметров на прямой ветви ВАХ (рис. 7.8, б) следует задавать постоянный ток $I_{\text{пр}}$ и измерять падение прямого напряжения $U_{\text{пр}}$. Это условие означает, что внутреннее сопротивление источника питания должно быть много больше сопротивления диода, чтобы изменение напряжения на диоде (VD) не вызывало изменений тока, выходящих за пределы заданной погрешности измерений, т.е. источник питания должен быть источником тока по отношению к диоду.

Условие необходимо выполнять на всех участках ВАХ (при измерении напряжения), где дифференциальное сопротивление мало. Стабилизированный источник питания постоянного тока обеспечивает дискретные значения прямого тока в диапазоне изменения прямого напряжения для испытуемого диода. Измерение $U_{\text{пр}}$ выполняет высокоомный вольтметр постоянного тока; контроль дискретных значений тока обеспечивается миллиамперметром магнитоэлектрической системы.

При измерении параметров диода на обратной ветви ВАХ (рис. 7.8 в) необходимо задаваться силой обратного тока $I_{\text{обр}}$ и

измерять обратное напряжение $U_{обр}$. При этом источник питания E , которым задается режим измерения, должен иметь малое внутреннее сопротивление — в противном случае незначительные изменения обратного тока вызовут большую погрешность при измерении обратного напряжения.

Со стабилизированного источника на диод VD подаются заданные значения обратного напряжения, которые контролируются вольтметром магнитоэлектрической системы. Сила обратного тока диода измеряется микроамперметром постоянного тока. Таким образом, в справочнике на диоды, в качестве электрических характеристик указываются координаты точек характеристики на прямой и обратной ветвях.

Прямую ветвь характеризуют следующие параметры: $U_{пр}$ — прямое падение напряжения на диоде при заданной силе постоянного прямого тока $I_{пр}$; $R_{диф}$ — дифференциальное сопротивление.

Обратную ветвь характеризуют следующие параметры: $U_{обр}$ — постоянное обратное напряжение на диоде при заданной силе постоянного обратного тока, протекающего через диод; $I_{обр}$ — сила постоянного обратного тока, протекающего через диод при подаче на него постоянного обратного напряжения $U_{обр}$, $U_{обр\max}$ — наибольшее допустимое обратное напряжение (предельное напряжение).

Эффективность выпрямления определяют расчетом **коэффициента выпрямления** по результатам измерений:

$$k_{выпр} = I_{пр}/I_{обр} = R_{обр}/R_{пр} \quad (7.29)$$

Исследование ВАХ диодов по точкам оказывается трудоемким и не всегда целесообразным. Поэтому на практике требуемые параметры измеряют в определенных точках. Например, $U_{пр}$, $I_{пр}$, $I_{обр}$ измеряют с помощью специальных измерителей параметров диодов.

Для оценки частотных свойств диода снимают частотные характеристики (рис. 7.9) $I_{выпр}(f)$.

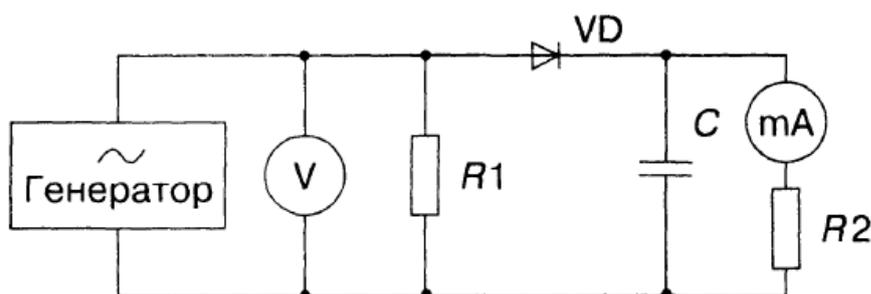


Рис. 7.9. Схема измерения частотной характеристики диода

Основным параметром, определяющим частотные свойства диода, является граничная рабочая частота $f_{гр}$, при которой сила выпрямленного тока уменьшается на 30% относительно номинального значения, измеренного на низкой частоте.

На высоких частотах (более 100 кГц) должны быть приняты меры для уменьшения погрешности, вносимой паразитными индуктивностями.

Проходная емкость диода ограничивает применение полупроводниковых диодов на высоких частотах.

Погрешность измерения емкости зависит от точности задания рабочей точки, в которой измеряется емкость, и точности измерения напряжения.

Все рассмотренные измерения выполняют при температуре окружающей среды $+20...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, если это не оговорено особо.

Изменение температуры заметно влияет на все основные параметры диода. С повышением температуры уменьшается прямое и обратное сопротивление, увеличивается проходная емкость диода из-за уменьшения контактной разности потенциалов, что приводит к некоторому ухудшению частотных свойств диода. С повышением температуры особенно резко меняется обратное сопротивление, что является основным фактором, определяющим температурный предел работы диодов, а дальнейшее повышение температуры приводит к необратимому изменению его параметров. Исследуемый диод помещают в термостат, поддерживая заданную температуру (для германиевых — не выше $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, для кремниевых — не выше $125\text{ }^{\circ}\text{C}$). На основании анализа полученных результатов определяют максимально и минимально допустимые температуры для диода конкретного типа.

У **выпрямительных диодов** измеряют все указанные параметры, для которых необходимо знать предельно допустимые

эксплуатационные режимы, при которых диод должен работать с заданной надежностью в течение установленного срока.

Предельно допустимые режимы выпрямительных диодов характеризуются максимальной силой прямого тока $I_{прmax}$ и обратного напряжения $U_{обрmax}$, максимально допустимой мощностью P_{max} , рассеиваемой на диоде, диапазоном температур окружающей среды.

Измерение силы прямого тока и обратного напряжения описано ранее, а значение рассеиваемой на диоде мощности определяется как сумма мощностей при протекании прямого и обратного токов:

$$P = P_{пр} + P_{обр} \quad (7.30)$$

Из-за малости обратного тока значением $P_{обр}$ обычно пренебрегают и тогда:

$$P = P_{пр} = 2U_{пр.ср} \cdot I_{пр.ср} \quad (7.31)$$

У **высокочастотных диодов** измеряют практически все те же параметры, которые рассматривались ранее. Однако СВЧ-диоды из-за чувствительности к тепловым и электрическим воздействиям должны храниться в экранирующей защитной оболочке, и в процессе измерения параметров диод должен быть защищен от воздействия электромагнитного поля.

У **импульсных диодов** наряду с параметрами ВАХ измеряют специальные параметры (характеризующие инерционность диодов): время восстановления обратного сопротивления, заряд переключения, максимальное импульсное прямое падение напряжения.

У **детекторных диодов** измеряют чувствительность по току, сопротивление в рабочей точке, коэффициент стоячей волны, шумовое отношение.

У **смесительных диодов** измеряемыми параметрами являются потери преобразования, выходное сопротивление, коэффициент стоячей волны, шумовое отношение, нормированный коэффициент шума.

У **параметрических и умножительных диодов с управляемой емкостью** наряду с емкостью диода, силой обратного тока и предельно допустимым напряжением измеряют добротность диода на заданной частоте и собственную индуктивность диода.

У **стабилитронов (стабисторов)** измеряют напряжение стабилизации.

РАЗДЕЛ 8. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

В метрологической практике при проведении измерений необходимо учитывать ряд факторов, влияющих на результаты измерения. Это — объект и субъект измерения, средство измерения (СИ) и условия измерения.

Объект измерения должен быть чист от посторонних включений (если измеряется плотность вещества), свободен от влияния внешних помех (природные процессы, промышленные помехи и т. п.). Сам объект не должен обладать внутренними помехами (работа самого объекта измерения).

Субъект измерения, т. е. оператор. Привносит в результат «личностный» момент измерения. Он зависит от квалификации оператора, санитарно-гигиенических условий труда, психофизиологического состояния субъекта, от учета эргономических требований.

Метод измерения. Очень часто измерение одной и той же величины разными методами дает различные результаты, причем каждый из них имеет свои недостатки и достоинства.

Если измерение не удастся выполнить так, чтобы исключить или компенсировать какой-либо фактор, влияющий на результат, то в ряде случаев вносят соответствующую поправку.

Влияние СИ на измеряемую величину во многих случаях проявляется как возмущающий фактор, например, внутренние шумы измерительных электронных усилителей. Другим фактором является инерционность СИ. Некоторые СИ дают постоянно завышенные или постоянно заниженные показания, что может быть результатом дефекта изготовления.

Условия измерения как влияющий фактор включают температуру окружающей среды, влажность, атмосферное давление, напряжение в сети и т. п.

Учет указанных факторов предполагает исключение ошибок и внесение поправок к измеренным величинам.

Измерительные приборы в зависимости от их назначения, области применения и условий работы должны выбираться по следующим основным принципам:

- 1) должна существовать возможность измерения исследуемой физической величины;

2) пределы измерения прибора должны охватывать все возможные значения измеряемой величины. При большом диапазоне изменений последней, целесообразно использовать многопредельные приборы;

3) измерительный прибор должен обеспечивать требуемую точность измерений.

Поэтому следует обратить внимание не только на класс выбираемого измерительного прибора, но и на факторы, влияющие на дополнительную погрешность измерений:

- несинусоидальность токов и напряжений,
- отклонение положения прибора при установке его в положение, отличное от нормального,

- влияние внешних магнитных и электрических полей и т. п.;

4) при проведении некоторых измерений важную роль играют экономичность (потребление) измерительного прибора, его масса, габариты, расположение органов управления, равномерность шкалы, возможность считывания показаний непосредственно по шкале, быстродействие и пр.;

5) подключение прибора не должно существенно влиять на работу исследуемого устройства, поэтому при выборе приборов следует учитывать их внутреннее сопротивление. При включении измерительного прибора в согласованные цепи входные или выходные сопротивления должны быть требуемого номинального значения;

6) прибор должен удовлетворять общим техническим требованиям техники безопасности при производстве измерений, а также техническим условиям или частным стандартам;

7) не допускается использовать приборы: с явными дефектами измерительной системы, корпуса и т.д; с истекшим сроком поверки; нестандартные или не аттестованные ведомственной метрологической службой, не соответствующие по классу изоляции напряжениям, на которые подключается прибор.

Поверка средства измерений (не путать со словом «проверка») — совокупность операций, выполняемых органами государственной метрологической службы (другими уполномоченными на то органами или организациями) с целью определения и подтверждения соответствия СИ установленным техническим требованиям.

В процессе измерений необходимо учитывать все виды возникающих погрешностей и, поняв их причину, стремиться их уменьшить.

Измерения проведены правильно, если систематические погрешности в их результатах близки к нулю. К систематическим погрешностям относятся: инструментальные, метода измерений, установки прибора, считывания.

Если исключить систематические погрешности не удастся, то их уменьшают, устраняя причины их возникновения, регулируя СИ при поверке и перед началом измерения, применяя специальные методы измерения и др.

В состав современных измерительных приборов включают микропроцессоры, которые позволяют автоматически находить значения систематической погрешности и исключать ее.

Метод теоретического анализа состоит в том, что систематическую погрешность можно рассчитать на основании известных характеристик используемых приборов или особенностей метода измерения, т. е. по формулам. Так, можно определить систематическую погрешность прибора, обусловленную собственным потреблением мощности, если известно его входное сопротивление и т. д.

Метод замещения заключается в том, что измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой.

Статистический метод состоит в том, что для обработки результаты измерений разбивают на несколько независимых групп наблюдений. Разница между групповыми средними и групповыми дисперсиями (средними в группе) указывают на наличие систематической погрешности, и позволяет вычислить ее.

Метод различных измерений позволяет обнаруживать систематические погрешности, источник которых неизвестен. Для этого величину измеряют несколькими различными методами, разными измерительными приборами, при различных условиях. В этом случае необходимо, чтобы используемые для измерений приборы имели примерно равные собственные погрешности.

Метод образцовых сигналов состоит в сравнении подаваемых на вход измерительного устройства сигналов: измеряемого и образцового такого же рода, что и измеряемый. Разность между ними определит систематическую погрешность.

Метод введения поправок и поправочных множителей.

Поправкой называют значение величины, одноименной с измеряемой, прибавляемое к полученному при измерении значению, с целью исключения систематической погрешности. Поправка численно равна абсолютной систематической погрешности, но имеет обратный знак. Поправки задаются в виде графиков, таблиц или формул.

Исключить систематическую погрешность измерения можно также путем умножения результатов измерения на поправочный множитель, который из-за малости систематических погрешностей обычно близок по значению к единице. Полагается, что поправки и поправочные множители предварительно определены при поверке средств измерений.

Раздел 9. Автоматизация электротехнических измерений

Усложнение современных объектов исследований, рост числа и диапазонов измеряемых параметров, повышение требований к точности измерений и их быстродействию диктуют новые подходы к организации измерений и контроля параметров. Решение этих задач возможно только путем автоматизации электротехнических измерений. К тому же автоматизация измерений позволяет разгрузить оператора.

Первой ступенью автоматизации измерений считаются **автономные непрограммируемые цифровые приборы (АНП)**, которые работают по жесткой программе и используются для измерений определенных параметров и характеристик. В них автоматически выполняется некоторая часть измерительных операций: определение полярности сигнала, выбор предела измерения, собственно измерение.

Информационно-измерительные системы.

Вторая ступень автоматизации — создание **гибких измерительных систем (ГИС)** на основе цифровой техники. В ГИС программным (soft) способом перестраивают систему, способную измерять различные параметры и менять режим измерений без изменения аппаратной (hard) части системы. Такие системы — **измерительно-информационные системы (ИИС)** — представляют собой совокупность средств измерения нескольких физических величин и вспомогательных устройств. Задача ИИС заключается в получении измерительной информации об исследуемом объекте в динамике (в условиях функционирования или хранения). ИИС предназначены для целевого оптимального проведения измерений и обеспечивают достоверной информацией смежные системы высшего уровня. В их задачу входит:

- получение измерительной информации об исследуемом объекте,
- преобразование входной информации в выходную,
- передача и представление полученной информации оператору (компьютеру),
- отображение, запоминание и формирование управляющих воздействий.

По назначению ИИС разделяются на несколько групп:

- системы сбора измерительной информации по исследуемому объекту — измерительные системы;
- системы автоматического контроля за работой узлов, технологических процессов, агрегатов;
- системы диагностики и выявления неисправностей изделий;
- системы телеметрии, обеспечивающие сбор измерительной информации с удаленных объектов.

По структуре ГИС разделяются на интерфейсные, микропроцессорные и компьютерно-измерительные.

Современные ИИС строятся по агрегатному принципу, что позволяет значительно сократить время разработки системы и ввода ее в действие. В процессе эксплуатации система легко перенастраивается при изменении требований к ней. При агрегатном построении ИИС упрощается замена функциональных узлов на более совершенные.

По способу обмена сигналами взаимодействия, обеспечивающими согласованное преобразование информации всеми функциональными узлами системы, по способу управления и по структуре построения ИИС разделяются на децентрализованные и централизованные.

Децентрализованные ИИС имеют постоянный состав функциональных узлов и режим их работы. Возможности таких систем ограничены, но они отличаются простотой, малыми габаритными размерами и низкой стоимостью. В настоящее время децентрализованные ИИС практически не применяются.

Централизованные ИИС содержат центральное устройство управления (контроллер), задающее режим работы функциональных узлов путем изменения их состава, количества и связей между ними, в результате чего изменяются функциональные возможности системы.

Централизованные ИИС весьма разнообразны и по структуре подразделяются на радиальные (рис. 9.1, а), магистральные (рис. 9.1, б), радиально-цепочечные и радиально-магистральные.

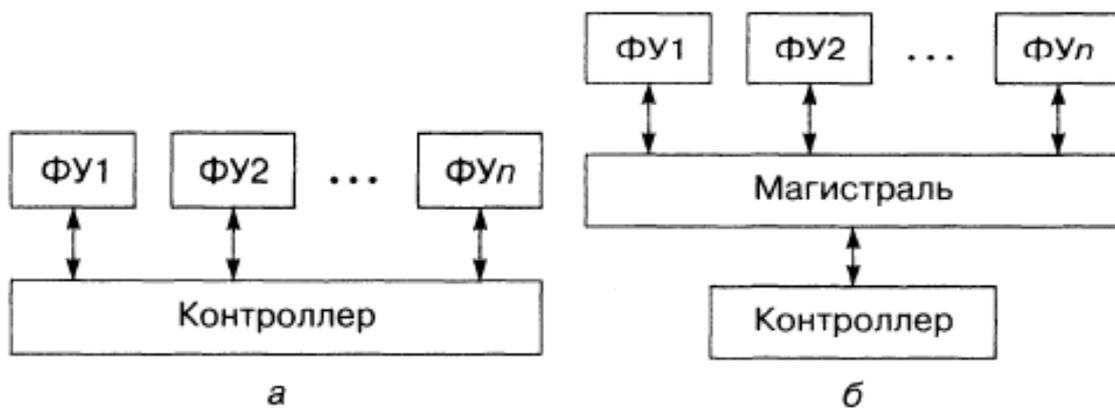


Рис. 9.1. Схемы ИИС радиальной (а) и магистральной (б) структуры

Через контроллер осуществляется обмен сигналами взаимодействия между функциональными узлами (ФУ), что позволяет программировать их путем подачи соответствующих сигналов от контроллера и изменять порядок обработки информации. В ИИС радиальной структуры каждый ФУ подключается к контроллеру с помощью индивидуальных шин. Недостатком радиальной структуры являются трудности в наращивании функциональных узлов из-за усложнения контроллера. Поэтому более широкое применение нашли ИИС магистральной структуры.

Наличие однопроводной или многопроводной шины (магистральной) является общей чертой всех ФУ. По магистрали передаются сигналы взаимодействия, причем каждый такой сигнал адресуется к конкретному ФУ. В магистральной структуре легко наращивать количество ФУ в системе, что позволяет использовать ее для решения задач по автоматизации различных экспериментальных исследований.

Использование современных цифровых средств привело к изменению структуры ИИС, позволяющем максимально перенести обработку измерительной информации к месту ее формирования. Такое решение получило название конвейерной обработки измерительной информации в ИИС.

ИИС включает в себя комплекс первичных преобразователей, устройства сбора и обработки информации, устройства вторичной обработки информации, средства управления и контроля, средства связи с другими системами, накопители информации.

Работа ИИС основана на использовании систем нескольких видов: с заранее заданным алгоритмом работы (жесткая система),

программируемые (гибкая система), адаптивные, виртуальные, интеллектуальные.

Любая ИИС с вычислительными комплексами включает в себя математическое, программное и информационное обеспечение, а также метрологическое обеспечение, обслуживающее всю измерительную систему

Определяющими в эксплуатации ИИС являются эргономические показатели дисплея и управляющих элементов — интерфейсов пользователя. Интерфейс пользователя — это устройство сопряжения, осуществляющее взаимодействие персонального компьютера (ПК) со средствами измерений и другими внешними техническими системами.

Измерительно-вычислительные комплексы.

Важнейшей разновидностью ГИС являются **измерительно-вычислительные комплексы (ИВК)**, представляющие собой автоматизированные средства измерений и обработки измерительной информации. ИВК используются для измерения параметров сложных объектов.

Отличительными особенностями ИВК являются наличие свободно программируемой ЭВМ (для обработки результатов измерений и управления собственно процессом измерений, а также для управления воздействием на объект исследования), нормирование метрологических характеристик, программное управление измерительными средствами, блочно-модульная структура.

ИВК применяются для реализации прямых, косвенных, совместных и совокупных методов измерений физических величин; для представления результатов измерений оператору в необходимом (удобном) виде; для управления процессом измерений и воздействия на объект измерений.

Компьютерно-измерительные системы.

В настоящее время сформировалось новое направление в измерительной технике — компьютерно-измерительные системы (КИС) и их разновидность — **виртуальные измерительные приборы** (виртуальные приборы). В КИС обязательно входит компьютер, работающий в режиме онлайн.

КИС на базе персонального компьютера позволяет заменить стандартные измерительные приборы (вольтметры, осциллографы, анализаторы спектра генераторы и другое) на системы виртуальных приборов. При этом ряд приборов могут быть активизированы (воспроизведены) на одном компьютере одновременно.

КИС может быть построена с последовательной или параллельной архитектурой. В КИС с последовательной архитектурой входят части системы, преобразующие анализируемые сигналы, которые обрабатывают в последовательном режиме, поэтому вся электроника размещается на слотах компьютера. Достоинство такой архитектуры построения КИС очевидно – благодаря использованию принципа разделения обработки по времени стоимость системы невелика. В КИС с параллельной архитектурой содержится ряд параллельных каналов измерения и каждый канал имеет собственные узлы преобразования анализируемых сигналов, и только процессор компьютера работает в режиме мультиплексирования (т.е. объединения сигналов). В этой системе преобразование сигналов выполняется локально вместе с расположением источника исследуемого сигнала, что позволяет передавать сигналы от измеряемого объекта в цифровой форме.

ЛИТЕРАТУРА

1. З.А. Хрусталева. «Электротехнические измерения», М., КноРус, 2011.
2. З.А. Хрусталева, С.В. Парфенов «Электрические и электронные измерения в задачах, вопросах и упражнениях», Академия, 2009.
3. В.Ю. Шишмарев, В.И. Шанин «Электрорадиоизмерения: учебник для среднего профессионального образования», «Академия», 2009.

Учебное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Курс лекций

Составитель: Алла Владимировна Костантиновская

Усл. печ. л. 4,1

Тираж 15 экз., отпечатано на принтере

Тирасполь, ПГУ, ИТИ