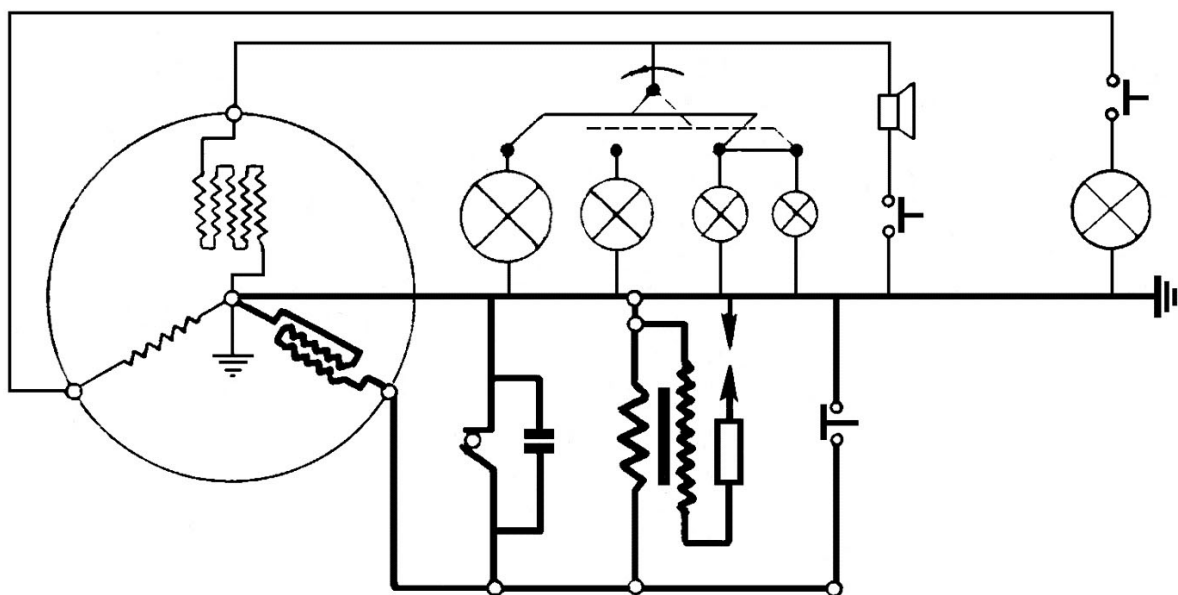


Р. Я. Лабковская

# Метрология и электрорадиоизмерения



Санкт-Петербург  
2013



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**Р.Я. Лабковская**

**МЕТРОЛОГИЯ И  
ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЯ**

**Учебное пособие**



**Санкт-Петербург  
2013**

Лабковская Р.Я. «Метрология и электрорадиоизмерения». Учебное пособие.  
– СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 140 с.

В учебном пособии рассмотрены основные понятия метрологии и электрорадиоизмерений. Теория воспроизведения единиц физических величин и передача их размеров, теория погрешностей и средства электрорадиоизмерений.

Предназначено для обучения студентов в рамках общепрофессиональных дисциплин ОПД.Ф.05 «Метрология, стандартизация и сертификация», ОПД.Ф.05.01 «Метрология, стандартизация и технические измерения» и ОПД.Ф.06 «Метрология и электрорадиоизмерения» учебного плана подготовки специалистов по направлениям 090104 – «Комплексная защита объектов информатизации», 090900 – «Информационная безопасность», 200100 – «Приборостроение», 210202 – «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств», 210400 – «Телекоммуникации», 210401 – «Физика и техника оптической связи», 211000 – «Конструирование и технология электронных средств».

Рекомендовано к печати по решению Ученого совета факультета КТиУ НИУ ИТМО от 19.02.2013 (протокол № 2).



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики, 2013  
© Лабковская Р.Я., 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>6</b>
<b>ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕТРОЛОГИИ.....</b>	<b>8</b>
1.1. Предмет метрологии .....	8
1.2. Физические величины .....	9
1.3. Международная система единиц (СИ).....	9
1.4. Кратные и дольные единицы .....	12
1.5. Понятие измерения .....	12
<b>ГЛАВА 2. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ .....</b>	<b>17</b>
2.1. Понятие погрешности.....	17
2.2. Классификация погрешностей.....	18
2.3. Систематические случайные погрешности и их математическое описание.....	24
2.3.1. Математическое описание случайной погрешности.....	27
<b>ГЛАВА 3. НОРМИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ .....</b>	<b>29</b>
3.1. Нормирование погрешностей средств измерений.....	29
3.1. Классы точности средств измерений .....	30
<b>ГЛАВА 4. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА.....</b>	<b>35</b>
4.1. Понятие о единстве измерений.....	35
4.2. Эталоны единиц физических величин .....	36
4.3. Поверочные схемы.....	38
4.4. Понятие, виды и методы поверки .....	40
<b>ГЛАВА 5. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СРЕДСТВАХ РАДИОИЗМЕРЕНИЙ .....</b>	<b>42</b>
5.1. Средства радиоизмерений. Меры.....	42
<b>ГЛАВА 6. ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ.....</b>	<b>47</b>
6.1. Измерения в цепях постоянного тока .....	47
6.2. Измерения в цепях промышленной частоты.....	50
6.3. Омметры.....	52
6.3.1. Однорамочные омметры.....	52
6.3.2. Двухрамочные омметры .....	53
6.3.3. Электронные тераомметры.....	54

<b>ГЛАВА 7. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.....</b>	<b>55</b>
7.1. Общие сведения .....	55
7.2. Метод вольтметра и амперметра.....	55
7.3. Мостовой метод.....	58
7.4. Резонансный метод .....	59
7.5. Метод дискретного счета .....	63
<b>ГЛАВА 8. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ.....</b>	<b>65</b>
8.1. Измерение мощности в цепях постоянного тока и переменного промышленной частоты .....	65
8.2. Измерение мощности с использованием эффекта Холла .....	68
8.3. Методы измерения мощности на высоких и сверхвысоких частотах.....	70
<b>ГЛАВА 9. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ.....</b>	<b>76</b>
9.1. Определения. Методы измерения .....	76
9.2. Метод перезарядки конденсатора .....	78
9.3. Резонансный метод .....	80
9.3.1. Резонансные частотомеры с сосредоточенными параметрами...80	
9.3.2. Резонансные частотомеры с распределенными параметрам. ....81	
9.4. Метод сравнения .....	84
9.5. Метод дискретного счета .....	87
9.6. Меры частоты .....	88
9.7. Прецизионное измерение частоты .....	90
<b>ГЛАВА 10. ИЗМЕРЕНИЕ ФОРМЫ И СПЕКТРА СИГНАЛОВ .....</b>	<b>92</b>
10.1. Общие сведения .....	92
10.2. Анализаторы гармоник.....	94
10.3. Анализаторы спектра.....	96
10.4. Измерение нелинейных искажений .....	98
10.5. Измерение параметров модулированных сигналов .....	99
10.6. Измерение параметров импульсных сигналов.....	102
<b>ГЛАВА 11. ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА .....</b>	<b>106</b>
11.1. Осциллографический метод.....	107
11.1.1. Метод линейной развертки.....	107
11.1.2. Метод синусоидальной развертки.....	107
11.1.3. Метод круговой развертки.....	109
11.2. Компенсационный метод .....	110

11.3. Метод дискретного счета .....	111
11.4. Фазовращатели .....	113
<b>ГЛАВА 12. АВТОМАТИЗАЦИЯ РАДИОИЗМЕРЕНИЙ .....</b>	<b>118</b>
12.1. Классификация автоматизированных средств измерений .....	118
12.2. Интерфейс МЭК 625.1 .....	120
12.3. Микропроцессорные средства измерений.....	123
12.3.1. Пример структурной схемы микропроцессорного прибора..	124
12.4. Компьютерно-измерительные системы.....	125
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....</b>	<b>130</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....</b>	<b>131</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....</b>	<b>132</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....</b>	<b>133</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....</b>	<b>134</b>
<b>ИСТОРИЯ КАФЕДРЫ.....</b>	<b>135</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>139</b>

# ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие разработано в рамках общепрофессиональных дисциплин ОПД.Ф.05 «Метрология, стандартизация и сертификация», ОПД.Ф.05.01 «Метрология, стандартизация и технические измерения» и ОПД.Ф.06 «Метрология и электрорадиоизмерения» учебного плана по ряду специальностей и направлений подготовки дипломированных специалистов и подготовки бакалавров и магистров в соответствии с требованиями Государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования.

Задачей дисциплины является формирование у студентов достаточных знаний в области основ метрологии и электрорадиоизмерений, позволяющих использовать современные измерительные технологии, которые представляют собой последовательность действий, направленных на получение измерительной информации требуемого качества.

Электрорадиотехнические измерения сегодня широко применяются во всех отраслях промышленности, а также в различных научных исследованиях. По мере развития науки и техники измерения становятся все более разнообразными, а их роль и значение постоянно возрастают. В нашей стране ежедневно производится свыше 20 миллиардов различных измерений, которые стали неотъемлемой частью многих трудовых процессов. Обусловлено это тем, что в эпоху научно-технического прогресса средства и методы радиоэлектроники стали все более широко применяться в космонавтике, ядерной физике, вычислительной технике, медицине, во многих отраслях промышленности для управления и контроля технологических процессов. И во всех случаях для выполнения измерений используются разнообразные и многочисленные электро- и радиоизмерительные приборы. Кроме того, электрорадиоизмерения позволяют определять значения неэлектрических величин – линейных размеров, температуры, давления, влажности, расхода жидкостей и газов и др.

Производство средств электрорадиоизмерений составляет существенную часть затрат отраслей промышленности, создающих радиоэлектронные устройства. Ежегодно в народное хозяйство поступают сотни тысяч современных радиоизмерительных приборов. Особенностью производства радиоизмерительных приборов является то, что они по своим характеристикам должны в определенной степени опережать создание тех или иных технических устройств.



Действительно, трудно создать, например, радиостанцию в новом, не применявшемся до этого диапазоне частот, если невозможно измерить в данном диапазоне ее параметры: мощность колебаний, модуляционные характеристики, длину волны и т. д.

Современный парк радиоизмерительных приборов и диагностирующей аппаратуры насчитывает сотни видов и типов приборов и, в зависимости от точности, классифицируется на две группы. В первую группу входят рабочие средства измерений, вторая группа объединяет образцовые средства измерений и эталоны единиц радиотехнических величин, предназначенные для метрологического обеспечения (аттестации и поверки) рабочих средств измерений.

В данном методическом пособии приводятся основные метрологические понятия об измерениях и средствах измерений, погрешностях и обработке результатов измерений, а также содержатся основные сведения о принципах действия, устройстве и применении электрических и радиотехнических измерительных приборов.

Учебное пособие состоит из двенадцати глав, разделенных на два раздела. В первом разделе «Элементы теории погрешностей» рассмотрены основные понятия метрологии, связанные с проведением измерений, расчетом и классификацией погрешностей, а также их нормированием. В заключение раздела рассматриваются вопросы, посвященные понятиям единства измерений, эталонов единиц, поверочных схем. Во втором разделе «Основные сведения об электрорадиоизмерениях» рассматриваются основные средства электрорадиоизмерений и их применение для измерений тока, напряжения, параметров электрических и радиотехнических цепей, мощности, частоты, формы и спектра сигнала, а также фазового сдвига. Завершает раздел глава, посвященная автоматизации радиоизмерений, в которой представлены основные микропроцессорные средства и компьютерно-измерительные системы, предназначенные для автоматизации измерений.

Учебное пособие предназначается для применения, как в учебном процессе, так и при выполнении научно-исследовательских работ.

# ГЛАВА 1

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕТРОЛОГИИ

---

### 1.1. Предмет метрологии

Наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности называется метрологией (греческое слово «метрология» образовано от слов «метрон» – мера и «логос» – учение). К основным направлениям метрологии относят:

- 1) общую теорию измерений;
- 2) единицы физических величин и их системы;
- 3) методы и средства измерений;
- 4) методы определения точности измерений;
- 5) основы обеспечения единства измерений и единообразия средств измерений;
- 6) эталоны и образцовые средства измерений;
- 7) методы передачи размеров единиц от эталонов или образцовых средств измерений рабочим средством измерений.

Метрологию подразделяют на теоретическую, прикладную и законодательную. Теоретическая метрология занимается вопросами фундаментальных исследований, созданием системы единиц измерений, физических постоянных, разработкой новых методов измерения. Прикладная (практическая) метрология занимается вопросами практического применения в различных сферах деятельности результатов теоретических исследований в рамках метрологии. Законодательная метрология включает совокупность взаимообусловленных правил и норм, направленных на обеспечение единства измерений, которые возводятся в ранг правовых положений (уполномоченными на то органами государственной власти), имеют обязательную силу и находятся под контролем государства.

С января 2001 года на территории России и стран СНГ взамен ГОСТ 16263-70 «ГСИ. Метрология. Термины и определения» введены рекомендации РМГ 29-99, содержащие основные термины и определения в области метрологии, согласованные с международными стандартами ИСО 31(0-13) и ИСО 1000.

Предметом метрологии является извлечение количественной информации о свойствах объектов и процессов с заданной точностью и достоверностью. Средства метрологии – это совокупность средств

измерений и метрологических стандартов, обеспечивающих их рациональное использование.

## 1.2. Физические величины

Основным объектом измерения в метрологии являются физические величины. Физическая величина – одно из свойств физического объекта (явления, процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

Физическая величина (краткая форма термина – «величина») применяется для описания материальных систем и объектов (явлений, процессов и т. п.), изучаемых в любых науках (физике, химии и др.).

Существуют основные и производные величины. В качестве основных выбирают величины, которые характеризуют фундаментальные свойства материального мира. ГОСТ 8.417 устанавливает семь основных физических величин: длина, масса, время, термодинамическая температура, количество вещества, сила света, сила электрического тока, – с помощью которых создается все разнообразие производных физических величин и обеспечивается описание любых свойств физических объектов и явлений.

Важной характеристикой физической величины является ее размерность  $\dim(Q)$  – выражение в форме степенного многочлена, отражающего связь данной величины с основными ФВ системы, в котором коэффициент пропорциональности принят равным единице:

$$\dim(Q) = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} \dots ,$$

где  $L$ ,  $M$ ,  $T$ , ... – условные обозначения физических величин данной системы, единицы которых приняты за основные ( $L$  – длина,  $M$  – масса,  $T$  – время),  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , ... – показатели степени, с которой основная величина входит в уравнение при определении производной величины. Например, для плотности  $\dim(\rho) = L^{-3}M$ , для силы электрического тока  $\dim(I) = I$ , для ускорения  $\dim(a) = LT^{-2}$ .

## 1.3. Международная система единиц (СИ)

Совокупность основных и производных единиц, относящихся к некоторой системе величин и построенная в соответствии с принятыми принципами, образует систему единиц. На сегодняшний день Международная система единиц физических величин включает семь основных единиц (табл. 1.1).

Таблица 1.1.  
Основные единицы СИ

Наименование	Единица измерений	Обозначение		Размерность
		международное	российское	
Длина	Метр	m	м	$L$
Масса	Килограмм	kg	кг	$M$
Время	Секунда	S	с	$T$
Сила электрического тока	Ампер	A	А	$I$
Термодинамическая температура	Кельвин	K	К	$\theta$
Количество вещества	Моль	mol	моль	$N$
Сила тока	Кандела	kd	кд	$J$

Решениями Генеральной конференции по мерам и весам приняты такие определения основных единиц измерения физических величин:

1. Метр считается длиной пути, который проходит свет в вакууме за  $1/299\,792\,458$  долю секунды;
2. Килограмм считается приравненным к существующему международному прототипу килограмма;
3. Секунда равна  $919\,2631\,770$  периодам излучения, соответствующего тому переходу, который происходит между двумя так называемыми сверхтонкими уровнями основного состояния атома  $Cs^{133}$ ;
4. Ампер считается мерой той силы неизменяющегося тока, вызывающего на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия при условии прохождения по двум прямолинейным параллельным проводникам, обладающим такими показателями, как ничтожно малая площадь кругового сечения и бесконечная длина, а также расположение на расстоянии в 1 м друг от друга в условиях вакуума;
5. Кельвин равен  $1/273,16$  части термодинамической температуры, так называемой тройной точки воды;
6. Моль равен количеству вещества системы, в которую входит такое же количество структурных элементов, что и в атомы в  $C^{12}$  массой 0,012 кг;
7. Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет  $1/683$  Вт/ср.

Кроме того, Международная система единиц содержит две достаточно важные дополнительные единицы, необходимые для измерения плоского и телесного углов. Так, единица плоского угла – это

радиан, или сокращенно рад, представляющий собой угол между двух радиусов окружности, длина дуги между которыми равняется радиусу окружности. Если речь идет о градусах, то радиан равен  $57^{\circ}17'48''$ . Стерadian, или *ср*, принимаемый за единицу телесного угла, представляет собой телесный угол, расположение вершины которого фиксируется в центре сферы, а площадь, вырезаемая данным углом на поверхности сферы, равна площади квадрата, сторона которого равна длине радиуса сферы. Другие дополнительные единицы СИ используются для формирования единиц угловой скорости, а также углового ускорения и т. д. Радиан и стерадиан используются для теоретических построений и расчетов, поскольку большая часть значимых для практики значений углов в радианах выражаются трансцендентными числами. К внесистемным единицам относятся:

- 1) за логарифмическую единицу принята десятая часть бела, децибел (дБ);
- 2) диоптрия – сила света для оптических приборов;
- 3) реактивная мощность – Вар (ВА);
- 4) астрономическая единица (а. е.) – 149,6 млн км;
- 5) световой год, под которым понимается такое расстояние, которое луч света проходит за 1 год;
- 6) вместимость – литр;
- 7) площадь – гектар (га).

Универсальность СИ обеспечивается тем, что 7 основных единиц, положенных в ее основу, являются единицами физических величин, отражающих основные свойства материального мира, и дают возможность образовывать производные единицы для любых физических величин во всех отраслях науки и техники. Этой же цели служат и дополнительные единицы, необходимые для образования производных единиц, зависящих от плоского и телесного углов.

Выделяют следующие преимущества СИ перед другими системами единиц:

- 1) СИ является универсальной, охватывая все области науки, техники, производства;
- 2) построенная таким образом система единиц и входящие в нее единицы называются когерентными (связанными, согласованными), коэффициенты пропорциональности в физических уравнениях, определяющих единицы производных величин, равны безразмерной единице;
- 3) в СИ устранена множественность единиц (унификация единиц для всех видов измерений) для выражения величин одного и того же ряда;
- 4) установление для каждой физической величины своей единицы позволило разграничить понятие массы (кг) и веса (Н).

Международная система единиц, благодаря своим преимуществам, получила широкое распространение в мире. Так, все страны Европейского Союза перешли на единицы СИ. Страны, где ранее традиционно применялась английская система мер (Великобритания, Австралия, Канада, США и др.) также внедряют единицы СИ.

#### 1.4. Кратные и дольные единицы

Наиболее прогрессивным способом образования кратных и дольных единиц является принятая в метрической системе мер десятичная кратность между большими и меньшими единицами.

В таблице 1.2 приводятся множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования.

Следует учитывать, что при образовании кратных и дольных единиц площади и объема с помощью приставок может возникнуть двойственность прочтения в зависимости от того, куда добавляется приставка. Так, сокращенное обозначение  $1 \text{ км}^2$  можно трактовать и как 1 квадратный километр, и как 1000 квадратных метров, что не одно и то же ( $1 \text{ квадратный километр} = 1\,000\,000 \text{ квадратных метров}$ ). В соответствии с международными правилами, кратные и дольные единицы площади и объема следует образовывать, присоединяя приставки к исходным единицам. Таким образом, степени относятся к тем единицам, которые получены в результате присоединения приставок. Поэтому  $1 \text{ км}^2 = 1(\text{км})^2$ .

Таблица 1.2.  
Кратные и дольные единицы

Кратные				Дольные			
величина	название	обозначение		величина	название	обозначение	
$10^1 \text{ м}$	декаметр	<i>дам</i>	<i>dam</i>	$10^{-1} \text{ м}$	дециметр	<i>дм</i>	<i>dm</i>
$10^2 \text{ м}$	гектометр	<i>гм</i>	<i>hm</i>	$10^{-2} \text{ м}$	сантиметр	<i>см</i>	<i>cm</i>
$10^3 \text{ м}$	километр	<i>км</i>	<i>km</i>	$10^{-3} \text{ м}$	миллиметр	<i>мм</i>	<i>mm</i>
$10^6 \text{ м}$	мегаметр	<i>Мм</i>	<i>Mm</i>	$10^{-6} \text{ м}$	микрометр	<i>мкм</i>	<i>μm</i>
$10^9 \text{ м}$	гигаметр	<i>Гм</i>	<i>Gm</i>	$10^{-9} \text{ м}$	нанометр	<i>нм</i>	<i>nm</i>
$10^{12} \text{ м}$	тераметр	<i>Тм</i>	<i>Tm</i>	$10^{-12} \text{ м}$	пикометр	<i>пм</i>	<i>pm</i>
$10^{15} \text{ м}$	петаметр	<i>Пм</i>	<i>Pm</i>	$10^{-15} \text{ м}$	фемтометр	<i>фм</i>	<i>fm</i>
$10^{18} \text{ м}$	эксаметр	<i>Эм</i>	<i>Em</i>	$10^{-18} \text{ м}$	аттометр	<i>ам</i>	<i>am</i>
$10^{21} \text{ м}$	зеттаметр	<i>Зм</i>	<i>Zm</i>	$10^{-21} \text{ м}$	zeptометр	<i>зм</i>	<i>zm</i>
$10^{24} \text{ м}$	йоттаметр	<i>Им</i>	<i>Ym</i>	$10^{-24} \text{ м}$	йоктометр	<i>им</i>	<i>ym</i>

#### 1.5. Понятие измерения

Основное понятие метрологии – измерение. Под измерением понимают познавательный информационный процесс, заключающийся в

сравнении путем физического эксперимента данной физической величины с известной физической величиной, принятой за единицу измерения. Найденное значение называют результатом измерения.

Для выполнения измерений необходимо воспроизвести единицу физической величины, сравнить с ней искомое значение и зафиксировать результат сравнения. При измерении электрорадиосигналов операции сравнения часто предшествует преобразование сигнала к виду, удобному для сравнения. Таким образом, четыремя основными слагаемыми измерения являются:

- 1) воспроизведение единицы физической величины,
- 2) преобразование исследуемого сигнала,
- 3) сравнение значения измеряемой физической величины с единицей, воспроизводимой мерой,
- 4) фиксация результата сравнения.

Различают прямые, косвенные, совокупные и совместные измерения. На практике экспериментатор наиболее часто встречается с первыми двумя видами.

Прямым называют измерение, при котором искомое значение физической величины находят непосредственно из опытных данных. Например, измерение напряжения вольтметром, фазового сдвига фазометром и т.п. Косвенное измерение характеризуется тем, что искомое значение физической величины находят по известной математической зависимости между этой величиной и физическими величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Иначе говоря, искомое значение данной физической величины определяется косвенным путем – вычисляется по результатам прямых измерений других физических величин.

Если физическая величина  $z$ , значение которой нужно измерить, представляет собой функцию

$$z = f(x_1, x_2, \dots, x_q),$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_q$  – физические величины, подвергаемые прямым измерениям, и  $B_1, B_2, \dots, B_q$  – результаты прямых измерений физических величин  $x_1, x_2, \dots, x_q$ , то результат  $A$  косвенного измерения находят из выражения

$$A = f(B_1, B_2, \dots, B_q).$$

Например, коэффициент усиления усилителя вычисляют по измеренным значениям входного и выходного напряжений:

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}.$$

Под совокупными понимают производимые одновременно измерения нескольких одноименных физических величин, причем искомые значения величин находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин.

Совместными называют выполняемые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных физических величин для установления зависимости между ними.

Технические средства, применяемые в измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики, называют средствами измерений. В число средств измерений входят меры, измерительные приборы, измерительные установки, измерительные системы и преобразователи, стандартные образцы состава и свойств различных веществ и материалов.

По временным характеристикам измерения подразделяются на:

- 1) статические, при которых измеряемая величина остается неизменной во времени;
- 2) динамические, в процессе которых измеряемая величина изменяется.

По способу выражения результатов измерения подразделяются на:

1) абсолютные, которые основаны на прямых или косвенных измерениях нескольких величин и на использовании констант и в результате которых получается абсолютное значение величины в соответствующих единицах,

2) относительные, которые не позволяют непосредственно выразить результат в узаконенных единицах, но позволяют найти отношение результата измерения к какой-либо одноименной величине с неизвестным в ряде случаев значением. Например, это может быть относительная влажность, относительное давление, удлинение и т. д.

Основными характеристиками измерений являются: принцип измерения, метод измерения, погрешность, точность, достоверность и правильность измерений.

Принцип измерений – физическое явление или их совокупность, положенные в основу измерений. Например, масса может быть измерена, опираясь на гравитацию, а может быть измерена на основе инерционных свойств. Температура может быть измерена по тепловому излучению тела или по ее воздействию на объем какой-либо жидкости в термометре и т. д.



Метод измерений – совокупность принципов и средств измерений. В рассматриваемом выше примере с измерением температуры измерения по тепловому излучению относят к неконтактному методу термометрии, измерения термометром есть контактный метод термометрии.

Погрешность измерений – разность между полученным при измерении значением величины и ее истинным значением. Погрешность измерений связана с несовершенством методов и средств измерений, с недостаточным опытом наблюдателя, с посторонними влияниями на результат измерения. Подробно причины погрешностей и способы их устранения или минимизации рассмотрены в главе 2, поскольку оценка и учет погрешностей измерений являются одним из самых важных разделов метрологии.

Точность измерений – характеристика измерения, отражающая близость их результатов к истинному значению измеряемой величины. Количественно точность выражается величиной, обратной модулю относительной погрешности, т. е.

$$\varepsilon = \frac{|Q|}{|\Delta|},$$

где  $Q$  – истинное значение измеряемой величины,  $\Delta$  – погрешность измерения, равная

$$\Delta = X - Q,$$

где  $X$  – результат измерения. Например, если относительная погрешность измерения равна  $10^{-2}\%$ , то точность будет равна  $10^4$ .

Достоверность измерений – характеристика качества измерений, разделяющая все результаты на достоверные и недостоверные в зависимости от того, известны или неизвестны вероятностные характеристики их отклонений от истинных значений соответствующих величин. Результаты измерений, достоверность которых неизвестна, могут служить источником дезинформации.

Правильность измерений – качество измерений, отражающее близость к нулю систематических погрешностей, т. е. погрешностей, которые остаются постоянными или закономерно изменяются в процессе измерения. Правильность измерений зависит от того, насколько верно (правильно) были выбраны методы и средства измерений.

## Контрольные вопросы

1. Определите основное понятие и предмет метрологии.
2. Укажите три раздела метрологии. По какому признаку проводится классификация разделов метрологии?
3. Что отличает метрологию от других естественных наук (физики, химии)?
4. Дайте определение физической величины. Приведите примеры физических величин, относящихся к механике, оптике, электричеству,
5. магнетизму.
6. Что является качественной характеристикой физической величины?
7. Что является количественной характеристикой физической величины?
8. Используя основное уравнение измерения, объясните, почему значение физической величины не зависит от выбора единиц измерений?
9. Дайте определение системы единиц ФВ.
10. Проведите классификацию ФВ по степени условной независимости от других величин данной группы ФВ.
11. Приведите примеры основных и производных ФВ.
12. Дайте определение кратных и дольных единиц. Приведите примеры.

## ГЛАВА 2

### ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

---

#### 2.1. Понятие погрешности

При любой степени совершенства и точности измерительной аппаратуры, рационально спланированной методике измерений, тщательности выполнения измерительных операций результат измерений отличается от истинного значения физической величины.

Иначе говоря, при всяком измерении неизбежны обусловленные разнообразными причинами отклонения результата измерения ( $x$ ) от истинного значения измеряемой величины ( $X$ ). Эти отклонения называют погрешностями измерений.

$$\Delta = x - X$$

Это соотношение служит исходным для теоретического анализа погрешностей. На практике же из-за невозможности определить истинное значение вместо него берут действительное значение измеряемой величины, например, среднеарифметическое результатов наблюдений при измерениях с многократными наблюдениями.

*Истинным* называется значение ФВ (физической величины), идеальным образом характеризующее свойство данного объекта, как в количественном, так и качественном отношении. Оно не зависит от средств нашего познания и является той абсолютной истиной, к которой мы стремимся, пытаясь выразить её в виде числовых значений.

*Действительным* называется значение ФВ, найденное экспериментально и настолько близкое к истинному, что в поставленной измерительной задаче оно может быть использовано вместо него.

Погрешность измерений иногда удобно характеризовать ее относительным значением:

$$\delta = \Delta/x \text{ или } \delta = \Delta/x \cdot 100 \%$$

Следует также различать погрешность результата измерения и погрешность средства измерений (СИ). Эти два понятия во многом близки друг к другу и классифицируются по одинаковым признакам.

Погрешность средства измерений – разность между показанием СИ и истинным (действительным) значением измеряемой ФВ. Она характеризует точность средства измерений (характеристику качества СИ, отражающую близость его погрешности к нулю).

Величину, обратную относительной погрешности, называют точностью:

$$T = 1/\delta = x/\Delta$$

Чем выше точность, тем с меньшей погрешностью произведено измерение. Обычно понятие точности используют для сравнительной характеристики различных измерений или средств измерений.

Правильное количественное представление о качестве измерений получают путем указания погрешности или точности. Соответствующие формулировки будут:

- 1) с погрешностью до 1 мВ;
- 2) с относительной погрешностью до 0,1%;
- 3) с точностью 1000.

Точность 1000 соответствует относительной погрешности 0,1%, точность 25 – относительной погрешности 4%.

## 2.2. Классификация погрешностей

Чтобы правильно оценивать погрешность, следует ясно представлять ее происхождение, понимать, к какому виду относится данная составляющая погрешности измерений. Это диктует необходимость рассмотрения классификации погрешностей. Их можно классифицировать по многим признакам, но мы постараемся сделать это наиболее полным образом.

**По характеру проявления** погрешности делятся на случайные, систематические, прогрессирующие и промахи, или грубые погрешности.

*Случайная погрешность* – составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) в серии повторных измерений одного и того же размера физической величины, проведенных с одинаковой тщательностью в одних и тех же условиях.

В появлении таких погрешностей, изображенных на рис. 2.1(а), не наблюдается какой-либо закономерности, они обнаруживаются при повторных измерениях одной и той же величины в виде некоторого разброса получаемых результатов. Случайные погрешности неизбежны, неустранимы и всегда присутствуют в результате измерения, однако их можно существенно уменьшить, увеличив число наблюдений.

*Систематическая погрешность* – составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно меняющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины. Постоянная и переменная систематические погрешности показаны на рис. 2.1(б). Их отличительный признак заключается в том, что они могут

быть предсказаны, обнаружены и благодаря этому почти полностью устранены введением соответствующей поправки.

*Прогрессирующая (дрейфовая) погрешность* – это непредсказуемая погрешность, медленно меняющаяся во времени. Прогрессирующие погрешности могут быть скорректированы поправками только в данный момент времени, а далее вновь непредсказуемо изменяются. Их изменение во времени представляет собой нестационарный случайный процесс, поэтому в рамках хорошо разработанной теории стационарных случайных процессов они могут быть описаны лишь с известными оговорками.

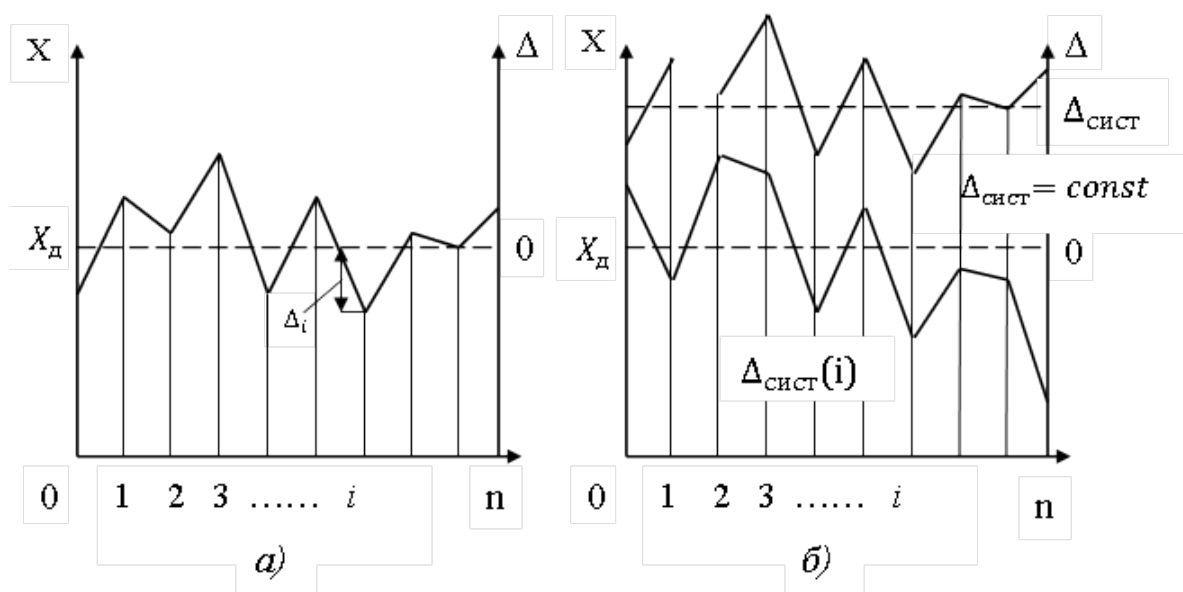


Рис. 2.1. Изменение: а – случайной, б – постоянной и переменной систематических погрешностей от измерения к измерению

Прогрессирующая погрешность – это понятие, специфичное для нестационарного случайного процесса изменения погрешности во времени, оно не может быть сведено к понятиям случайной и систематической погрешностей.

**По способу выражения** разделяют абсолютные, относительные и приведенные погрешности.

Алгебраическую разность измеряемого значения величины  $x$  и действительного ее значения  $a$  называют *абсолютной погрешностью* измерения  $\Delta$ :

$$\Delta = x - a .$$

Отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины (безразмерная величина), выраженное в относительных единицах или процентах, называют *относительной погрешностью*:

$$\delta = \Delta/a \text{ или } \delta = \Delta/a \cdot 100 \%$$

Отношение абсолютной погрешности к максимальному возможному значению измеряемой величины  $a_m$  (например, к верхнему пределу измерений прибора или к диапазону измерений) называется *приведенной погрешностью*  $\delta_{пр}$ :

$$\delta_{пр} = (x - a)/a_m \cdot 100 = \Delta/a_m \cdot 100\%.$$

В зависимости от **причин возникновения** различают инструментальные погрешности измерения, погрешности метода измерений, погрешности из-за изменения условий измерения и субъективные погрешности измерения.

*Инструментальная погрешность* измерения обусловлена погрешностью применяемого СИ. Иногда эту погрешность называют *аппаратурной*.

*Погрешность метода измерений* – составляющая систематической погрешности измерений из-за несовершенства принятого метода измерений, эта погрешность обусловлена:

- отличием принятой модели объекта измерения от модели, адекватно описывающей его свойства, которое определяется путем измерения;
- влиянием способов применения СИ. Это имеет место, например, при измерении напряжения вольтметром с конечным значением внутреннего сопротивления. В таком случае вольтметр шунтирует участок цепи, на котором измеряется напряжение, и оно оказывается меньше, чем было до присоединения вольтметра;
- влиянием алгоритмов (формул), по которым производятся вычисления результатов измерений. Вследствие упрощений, принятых в уравнениях для измерений, нередко возникают существенные погрешности, для компенсации действия которых следует вводить поправки. Иногда погрешность метода называют теоретической погрешностью;
- влиянием других факторов, не связанных со свойствами используемых СИ.

Отличительной особенностью погрешностей метода является то, что они не могут быть указаны в документации на используемое СИ, поскольку от него не зависят; их должен определять оператор в каждом конкретном случае. В связи с этим оператор должен четко различать фактически измеряемую им величину и величину, подлежащую измерению. Иногда погрешность метода может проявляться как случайная.

*Погрешность (измерения) из-за изменения условий измерения* – это составляющая систематической погрешности измерения, являющаяся

следствием неучтенного влияния отклонения в одну сторону какого-либо из параметров, характеризующих условия измерений, от установленного значения.

Этот термин применяют в случае неучтенного или недостаточно учтенного действия той или иной влияющей величины (температуры, атмосферного давления, влажности воздуха, напряженности магнитного поля, вибрации и др.); неправильной установки средств измерений, нарушения правил их взаимного расположения и др.

*Субъективная* (личная) погрешность измерения обусловлена погрешностью отсчета оператором показаний по шкалам СИ, диаграммам регистрирующих приборов. Она вызвана состоянием оператора, его положением во время работы, несовершенством органов чувств, эргономическими свойствами СИ.

**По зависимости абсолютной погрешности от значений измеряемой величины** различают погрешности: аддитивные  $\Delta_A$ , не зависящие от измеряемой величины; мультипликативные  $\Delta_M$ , которые прямо пропорциональны измеряемой величине, и нелинейные  $\Delta_H$ , имеющие нелинейную зависимость от измеряемой величины.

Эти погрешности применяют в основном для описания метрологических характеристик средств измерений. Такое их разделение весьма существенно при решении вопроса о нормировании и математическом описании погрешностей СИ.

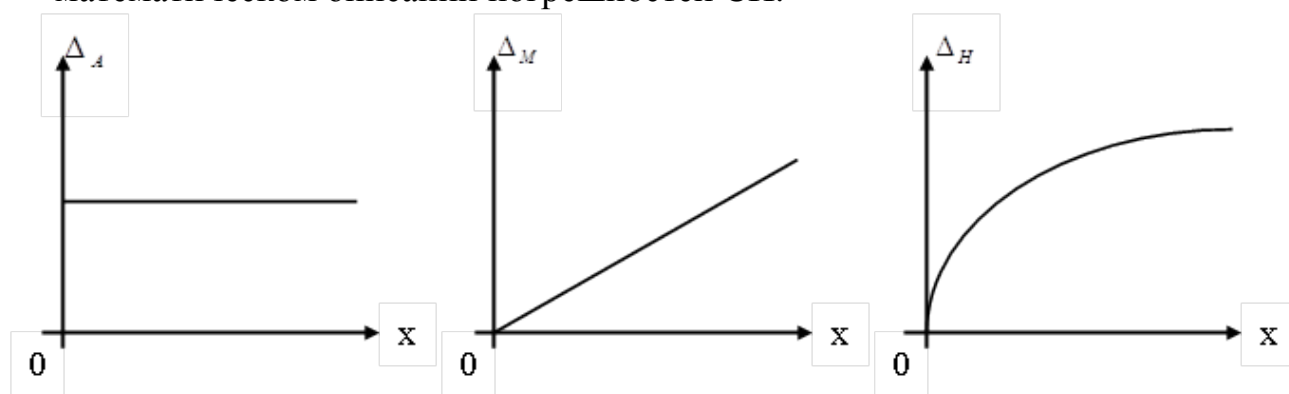
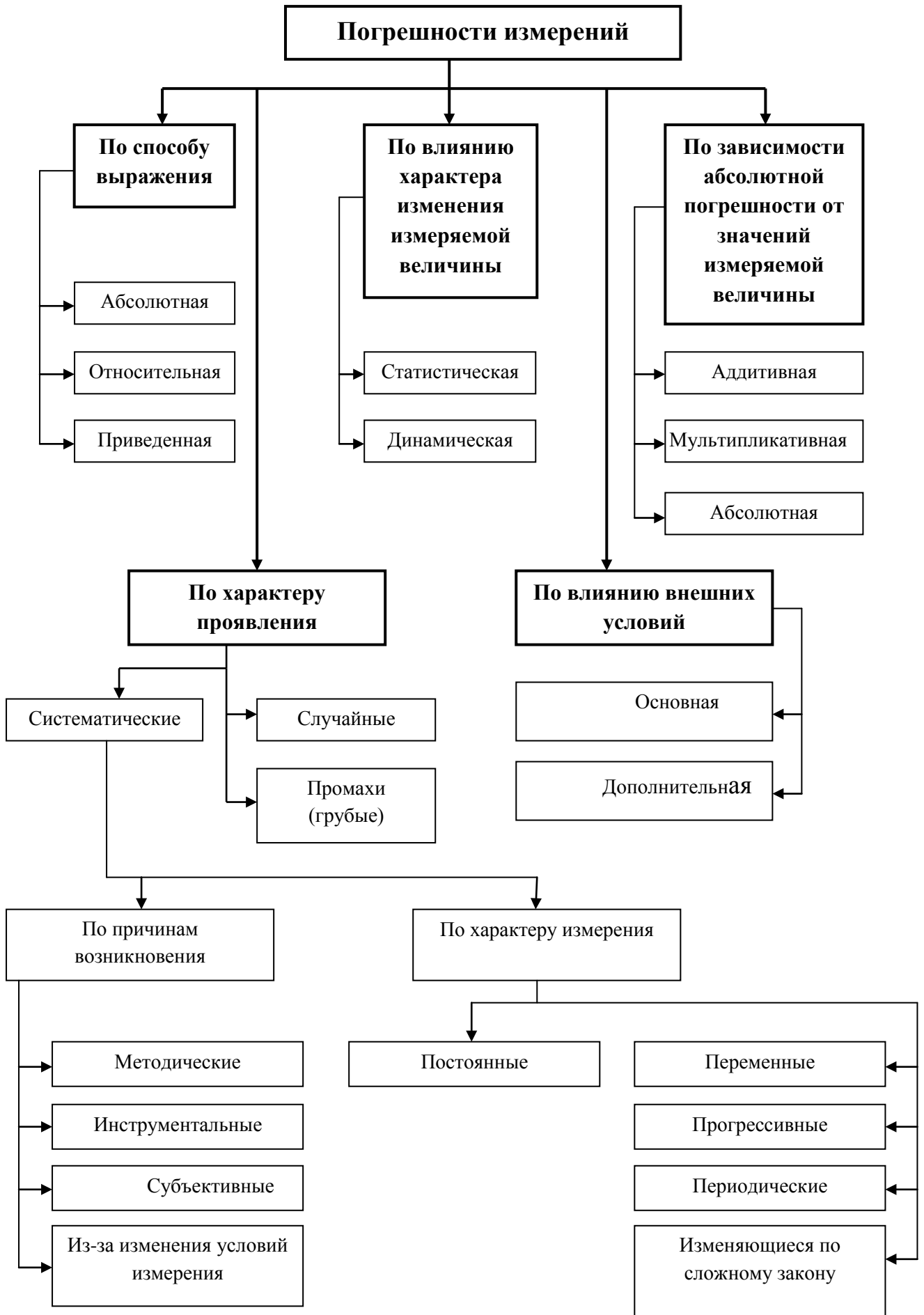


Рис. 2.2. Аддитивная (а), мультипликативная (б) и нелинейная (в) погрешности

**По влиянию внешних условий** различают основную и дополнительную погрешности средств измерений. *Основная погрешность средства измерений* – погрешность СИ, применяемого в нормальных условиях. Для каждого средства оговариваются условия эксплуатации, при которых нормируется его погрешность. *Дополнительная погрешность средства измерений* – составляющая погрешности СИ, возникающая дополнительно к основной погрешности, вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений.

**В зависимости от влияния характера изменения измеряемых величин** погрешности СИ делят на статические и динамические. *Статической* называется погрешность средства измерений, применяемого для измерения ФВ, принимаемой за неизменную. *Динамической* называется погрешность СИ, возникающая дополнительно при измерении изменяющейся (в процессе измерений) ФВ. Динамическая погрешность СИ обусловлена несоответствием его реакции на скорость (частоту) изменения измеряемого сигнала.





### 2.3. Систематические случайные погрешности и их математическое описание

Погрешность измерений описывают нестационарным случайным процессом, статистические характеристики которого меняются во времени. Типичная реализация такого процесса – зависимость погрешности конкретного средства измерений от времени (рис. 2.3). Эту зависимость  $\Delta(t)$  в большинстве случаев можно представить в виде суммы быстро изменяющейся флуктуационной составляющей  $\varepsilon(t)$  и медленно меняющегося среднего значения  $\theta(t)$ .

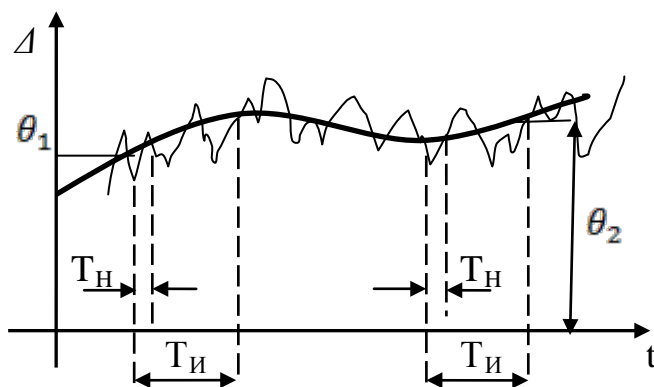


Рис. 2.3. Зависимость погрешности средства измерений от времени

Если измерения с многогранными наблюдениями провести через некоторое время, в течение которого среднее значение успеет существенно измениться, то погрешность примет новое значение, например  $\theta_2$ . Таким образом, при проведении измерений, разделенных большими интервалами времени, проявляется изменчивость погрешности  $\theta(t)$ .

Как уже указывалось, систематическая погрешность складывается из нескольких составляющих. Анализ причин, вызывающих возникновение отдельных составляющих, позволит установить приближенные математические модели, пригодные для оценки систематической погрешности.

Методические погрешности в некоторых случаях постоянны и могут быть рассчитаны и исключены. Постоянными являются и инструментальные погрешности, вызванные неточностью регулировки средств измерений при их выпуске или поверке.

Систематические погрешности, зависящие от влияющих величин, как правило, меняются во времени, поскольку сами влияющие величины не остаются постоянными. На параметры электронных измерительных приборов влияют влажность воздуха и температура окружающей среды, атмосферное давление, напряжение питающей сети, возможная

вибрация, возникающая при эксплуатации средств измерений на подвижных объектах.

В лабораторных условиях наибольшее влияние на погрешность средств измерений оказывает температура элементов их схем. Характеристики большинства полупроводниковых приборов имеют сильно выраженную температурную зависимость, а параметры катушек индуктивности, конденсаторов и резисторов хотя и в меньшей мере, но также зависят от температуры. Изменения температуры элементов средств измерений вызваны двумя главными причинами: изменением рассеиваемой на этих элементах мощности и колебаниями температуры внешней среды - помещения, в котором размещены средства измерений.

После включения средства измерений в сеть на его элементах начинает рассеиваться практически вся потребляемая мощность, что вызывает значительные изменения температуры всего устройства. Характер и скорость нарастания температуры зависят от термодинамических характеристик элементов схемы: теплоемкости, характера теплообмена с внешней средой, причем элементы схемы нагреваются неравномерно. Однако общий характер нарастания некоторой средней температуры устройства приближенно может быть описан экспоненциальной зависимостью. Подобным же образом меняется и систематическая составляющая погрешности  $\theta_n(t)$ , обусловленная прогревом средства измерений после его включения в сеть. На рис. 2.4 показана возможная зависимость погрешности установки частоты  $f(x)$  измерительного генератора от времени, аппроксимированная функцией

$$\theta_n(t) = f(t) - f_H = f_1 - f_H + (f_0 - f_1) \exp[-(t - t_B)/\tau_T],$$

где  $f_H$  – номинальное значение частоты, устанавливаемое по шкале прибора,  $f_0$  – значение частоты в момент включения,  $f_1$  – установившееся значение частоты,  $\tau_T$  – эквивалентная тепловая постоянная времени,  $t_B$  – момент включения прибора в сеть.

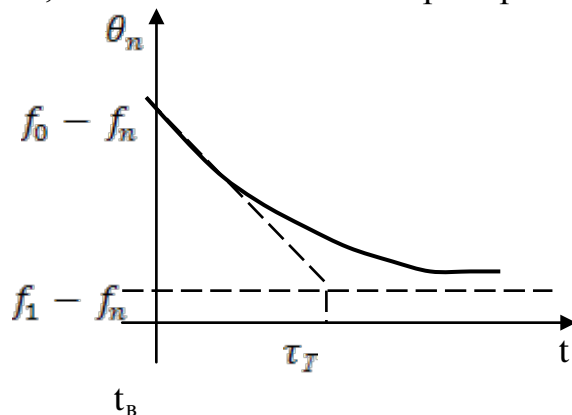


Рис. 2.4. Зависимость погрешности установки частоты  $f(x)$  измерительного генератора от времени  $t$

Экспериментальная зависимость  $\theta_n(t)$  может описываться и более сложным образом, например суммой нескольких экспонент и линейной функции.

Изменение средней температуры средства измерений при его прогреве может достигать нескольких десятков градусов, что приводит к значительным изменениям систематической погрешности. Если измерения необходимо производить до окончания прогрева средства измерений, то систематическую погрешность можно учесть с помощью ранее полученной зависимости  $\theta_n(t)$  для данного средства измерений. Как правило, эти зависимости для разных экземпляров средств измерений имеют значительный разброс, поэтому использовать некоторую среднюю зависимость для любого экземпляра средств измерений данного типа обычно нецелесообразно.

В большинстве случаев измерения рекомендуют производить по окончании полного прогрева средств измерений. Необходимое время прогрева указывают в паспортных данных.

Изменения внешней температуры также вызывают появление систематической погрешности. Из-за большой тепловой постоянной времени прибора, которая может достигать десятков минут, он оказывает сглаживающее действие по отношению к колебаниям внешней температуры. Быстрые изменения фильтруются и не влияют на среднюю температуру прибора, а медленные колебания температуры среды изменяют его среднюю температуру и, следовательно, вызывают изменение систематической погрешности.

Влияние медленных колебаний температуры на систематическую погрешность можно учесть с помощью приближенного соотношения:

$$\theta_T \approx K_T (T^0 - T_H^0)$$

где  $K_T$  – постоянный коэффициент;  $T^0$  – значение температуры в данный момент;  $T_H^0$  – номинальное значение температуры, при которой температурная погрешность  $\theta_T$  отсутствует.

Прогрессирующая во времени систематическая погрешность  $\theta_{np}(t)$  обусловлена постепенным изменением параметров элементов схемы вследствие старения. Это медленный процесс, приближенно описываемый линейной зависимостью

$$\theta_{np}(t) = K_c (t - t_n)$$

где  $K_c$  – постоянный коэффициент;  $t$  – время;  $t_n$  – время проведения последней проверки средства измерений, при которой систематическая погрешность была исключена. Исходя из допустимого значения погрешности  $\theta_{np}$  и скорости ее изменения, выбирают периодичность поверки.

### 2.3.1. Математическое описание случайной погрешности

Быстрые флуктуации  $\varepsilon(t)$  определяют случайную погрешность, которую приближенно описывают эргодическим случайным процессом с нулевым математическим ожиданием. При проведении измерений с многократными наблюдениями эта составляющая проявляется в виде случайной величины, принимающей значения  $\varepsilon_i = \varepsilon(t_i)$  взятые в моменты  $t_i (i = 1, 2, \dots, n)$  проведения наблюдений. Значения  $\varepsilon_i$ , обычно можно считать статистически независимыми.

Отсчитываемые по прибору значения измеряемой величины, а следовательно, и значения  $\varepsilon_i$ , погрешности всегда содержат определенное число значащих цифр. Поэтому погрешность может принимать конечное число значений и, строго говоря, является дискретной случайной величиной. Однако математическое описание таких величин неудобно, и погрешность принято считать непрерывной случайной величиной.

Наиболее полной характеристикой случайной погрешности являются функции распределения. В дальнейшем будем использовать дифференциальную функцию распределения, называемую также плотностью распределения вероятностей  $p(\varepsilon)$  или сокращенно плотностью вероятности. По известной плотности вероятности можно определить вероятность пребывания случайной погрешности в заданных границах от  $\Delta_H$  до  $\Delta_B$ :

$$P_{\Delta} = P\{\Delta_H \leq \varepsilon \leq \Delta_B\} = \int_{\Delta_H}^{\Delta_B} p(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (2.1)$$

Для плотностей вероятности, описываемых симметричными относительно начала координат функциями, нижнюю  $\Delta_H$  и верхнюю  $\Delta_B$  границы погрешности также выбирают симметричными (рис. 2.5, а).

Симметричные границы обозначим одним символом  $\Delta_{BH}$  – положительной величиной. Верхняя и нижняя границы погрешности.  $\Delta_B = \Delta_{BH}$ ,  $\Delta_H = -\Delta_{BH}$  или  $\pm \Delta_{BH}$ . Для заданного закона распределения вероятность  $P_{\Delta}$  однозначно зависит от границ погрешности и возрастает с их увеличением.

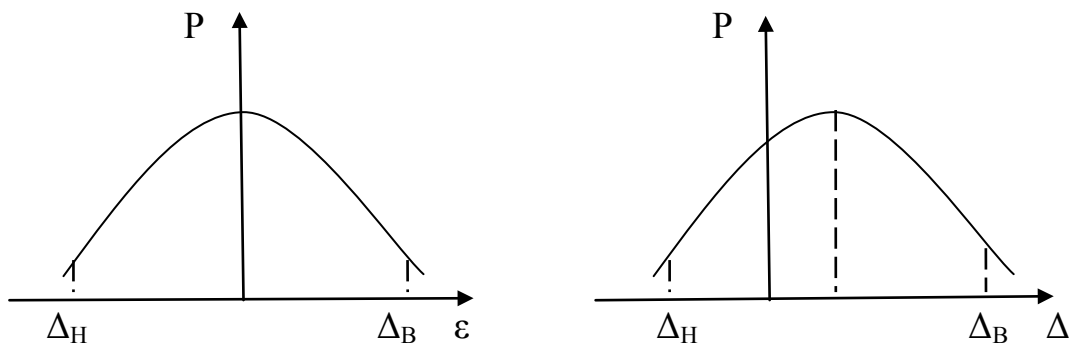


Рис. 2.5.

Если  $P_{\Delta} = 1$ , то реальные погрешности не могут превышать границ  $\Delta_B = \Delta_{\Pi}$   $\Delta_H = -\Delta_{\Pi}$  или  $\pm \Delta_{\Pi}$  погрешность  $\Delta_{\Pi}$  будем называть предельной.

По результату измерений и границам погрешности оценивают интервал, в котором с заданной вероятностью  $P_{\Delta}$  лежит истинное значение  $X$  измеряемой величины. Подставив в (2.1)  $\varepsilon = x - X$ , получим

$$P_{\Delta} = P\{x - \Delta_{BH} \leq X \leq x + \Delta_{BH}\}.$$

Следовательно, вероятность  $P_{\Delta}$  соответствует вероятности пребывания истинного значения на интервале от  $x - \Delta_{BH}$  до  $x + \Delta_{BH}$ . Поскольку общая погрешность  $\Delta = \theta + \varepsilon$ , то ее плотность вероятности можно определить, сместив график  $P(\varepsilon)$  на  $\theta$  (рис. 2.5,б). В данном случае нижнюю  $\Delta_H$ , и верхнюю  $\Delta_B$  границы интервала, в котором с вероятностью  $P_{\Delta}$  лежит погрешность, выбирают симметрично относительно математического ожидания, поэтому  $|\Delta_H| \neq \Delta_B$ .

К описанию погрешностей плотностью вероятности прибегают сравнительно редко, поскольку для получения  $P_{\Delta}$  приходится прибегать к интегрированию или использовать табличные интегралы, а само экспериментальное определение плотностей вероятности сопряжено со значительными затратами времени.

Числовые характеристики погрешности. Во многих случаях погрешности вычисляют по их числовым характеристикам: математическому ожиданию и центральным моментам.

### Контрольные вопросы

1. Можно ли определить истинное значение измеряемой величины?
2. Проведите классификацию погрешностей измерений в зависимости от характера проявления.
3. Отличаются ли признаки классификации погрешностей результатов измерений и погрешностей средств измерений?
4. Наблюдается ли какая-нибудь закономерность в появлении случайных погрешностей измерений?
5. Каким образом можно существенно уменьшить случайные погрешности измерений? Можно ли совсем устранить случайные погрешности?
6. Можно ли устранить систематические погрешности?
7. Может ли систематическая погрешность измерения изменяться при повторных измерениях одной и той же физической величины?

## ГЛАВА 3

# НОРМИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

---

Рассмотрим подробный порядок операций, выполняемых при обработке результатов измерений. Содержание всех описываемых действий рассмотрено в предыдущих разделах. Проводимые расчеты основываются на предположении о нормальном распределении погрешностей, когда систематические погрешности уже учтены на предыдущих этапах работы с экспериментальными данными.

### 3.1. Нормирование погрешностей средств измерений

Нормирование метрологических характеристик средств измерений и заключается в установлении границ для отклонений реальных значений параметров средств измерений от их номинальных значений.

Каждому средству измерений приписываются некоторые номинальные характеристики. Действительные же характеристики средств измерений не совпадают с номинальными, что и определяет их погрешности.

Обычно нормирующее значение принимают равным:

- 1) большему из пределов измерений, если нулевая отметка расположена на краю или вне диапазона измерения;
- 2) сумме модулей пределов измерения, если нулевая отметка расположена внутри диапазона измерения;
- 3) длине шкалы или её части, соответствующей диапазону измерения, если шкала существенно неравномерна (например, у омметра);
- 4) номинальному значению измеряемой величины, если таковое установлено (например, у частотомера с номинальным значением 50 Гц);
- 5) модулю разности пределов измерений, если принята шкала с условным нулём (например, для температуры), и т.д.

Чаще всего за нормирующее значение принимают верхний предел измерений данного средства измерений.

Отклонения параметров средств измерений от их номинальных значений, вызывающие погрешность измерений, не могут быть указаны однозначно, поэтому для них должны быть установлены предельно допускаемые значения.

Указанное нормирование является гарантией взаимозаменяемости средств измерений.

Нормирование погрешностей средств измерений заключается в установлении предела допускаемой погрешности.

Под этим пределом понимается наибольшая (без учёта знака) погрешность средства измерения, при которой оно может быть признано годным и допущено к применению.

Подход к нормированию погрешностей средств измерений заключается в следующем:

- 1) в качестве норм указывают пределы допускаемых погрешностей, включающие в себя и систематические, и случайные составляющие;
- 2) порознь нормируют все свойства средств измерений, влияющие на их точность.

Стандарт устанавливает ряды пределов допускаемых погрешностей. Этой же цели служит установление классов точности средств измерений.

### **3.1. Классы точности средств измерений**

Класс точности – это обобщенная характеристика СИ, выражаемая пределами допускаемых значений его основной и дополнительной погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность. Класс точности не является непосредственной оценкой точности измерений, выполняемых этим СИ, поскольку погрешность зависит еще от ряда факторов: метода измерений, условий измерений и т.д. Класс точности лишь позволяет судить о том, в каких пределах находится погрешность СИ данного типа. Общие положения деления средств измерений по классу точности устанавливает ГОСТ 8.401–80.

Пределы допускаемой основной погрешности, определяемые классом точности, – это интервал, в котором находится значение основной погрешности СИ.

Классы точности СИ устанавливаются в стандартах или технических условиях. Средство измерения может иметь два и более класса точности. Например, при наличии у него двух или более диапазонов измерений одной и той же физической величины ему можно присваивать два или более класса точности. Приборы, предназначенные для измерения нескольких физических величин, также могут иметь различные классы точности для каждой измеряемой величины.

Пределы допускаемых основной и дополнительной погрешностей выражают в форме приведенных, относительных или абсолютных погрешностей. Выбор формы представления зависит от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений, а также от условий применения и назначения СИ.




Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности устанавливаются по одной из формул:  $\Delta = \pm a$  или  $\Delta = \pm(a + bx)$ , где  $x$  – значение измеряемой величины или число делений, отсчитанное по шкале;

$a, b$  – положительные числа, не зависящие от  $x$ . Первая формула описывает чисто аддитивную погрешность, а вторая – сумму аддитивной и мультипликативной погрешностей.

В технической документации классы точности, установленные в виде абсолютных погрешностей, обозначают, например, «Класс точности М», а на приборе – буквой «М». Для обозначения используются прописные буквы латинского алфавита или римские цифры, причём меньшие пределы погрешностей должны соответствовать буквам, находящимся ближе к началу алфавита, или меньшим цифрам. Пределы допускаемой приведенной основной погрешности определяются по формуле  $\gamma = \Delta / x_N = \pm p$ , где  $x_N$  – нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и  $\Delta$ ;  $p$  – отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда значений:

$$(1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6) \cdot 10^n; \quad n = 1; 0; -1; -2; \dots$$

Нормирующее значение  $x_N$  устанавливается равным большему из пределов измерений (или модулей) для СИ с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой и для измерительных преобразователей, для которых нулевое значение выходного сигнала находится на краю или вне диапазона измерений. Для СИ, шкала которых имеет условный нуль,  $x_N$  равно модулю разности пределов измерений.

Для приборов с существенно неравномерной шкалой  $x_N$  принимают равным всей длине шкалы или ее части, соответствующей диапазону измерения. В этом случае пределы абсолютной погрешности выражают, как и длину шкалы, в единицах длины, а на средстве измерений класс точности условно обозначают, например, в виде значка , где 0,5 – значение числа  $p$  (рис. 3.1).

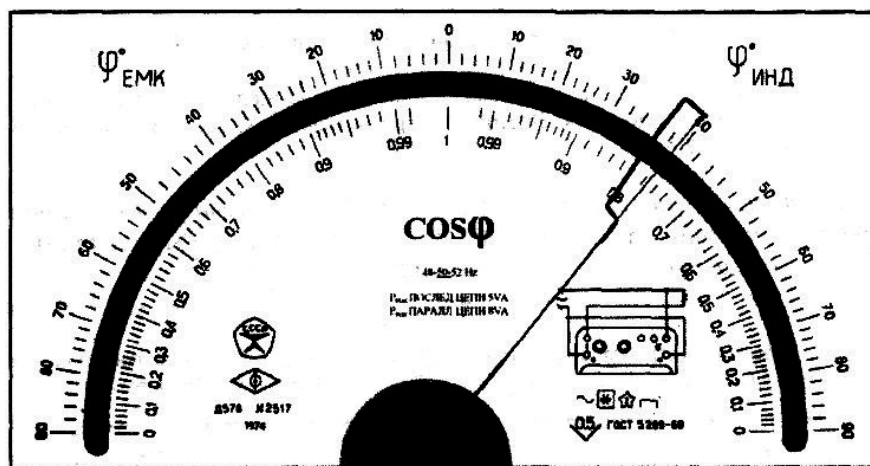


Рис. 3.1. Лицевая панель фазометра класса точности 0,5 с существенно неравномерной нижней шкалой

В остальных рассмотренных случаях класс точности обозначают конкретным числом  $p$ , например 1,5. Обозначение наносится на циферблат, щиток или корпус прибора (рис. 3.2).

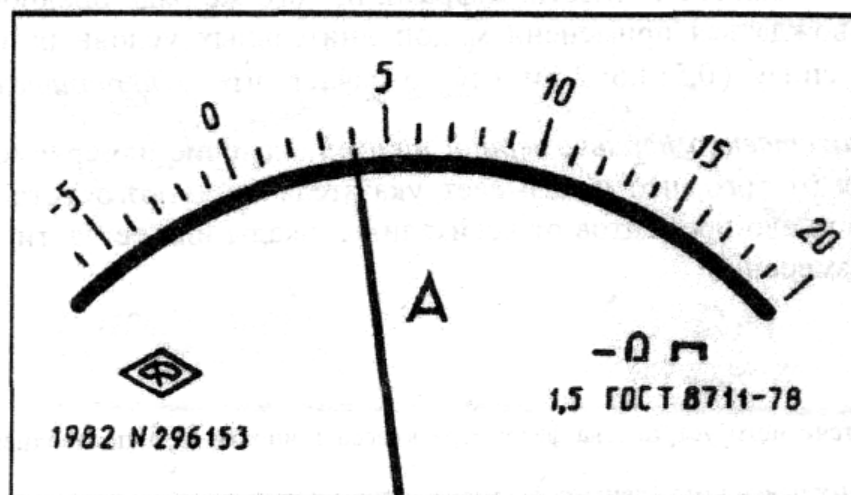


Рис 3.2. Лицевая панель амперметра класса точности 1,5 с равномерной шкалой

В том случае если абсолютная погрешность задается формулой  $\pm (a + bx)$ , пределы допускаемой относительной основной погрешности

$$\delta = \Delta / x = \pm [c + d(|x_k / x| - 1)] \quad (3.1)$$

где  $c, d$  – отвлеченные положительные числа, выбираемые из ряда:  $(1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6) \cdot 10^n$ ;  $n = 1; 0; -1; -2; \dots$ ;  $x_k$  – больший (по модулю) из пределов измерений. При использовании формулы 3.1 класс точности обозначается в виде «0,02/0,01», где числитель – конкретное значение числа  $c$ , знаменатель – числа  $d$  (рис. 3.3).

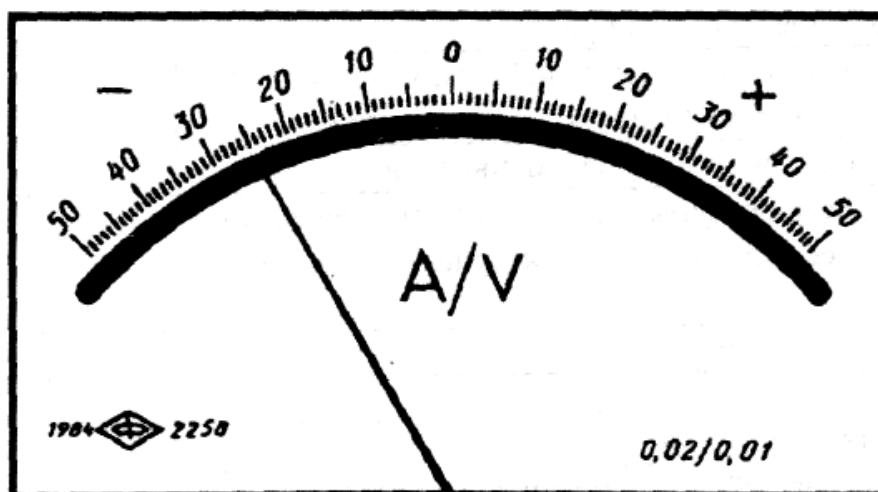


Рис. 3.3. Лицевая панель ампервольтметра класса точности 0,02/0,01 с равномерной шкалой

Пределы допускаемой относительной основной погрешности определяются по формуле  $\delta = \Delta x = \pm q$ , если  $\Delta = \pm a$ . Значение постоянного числа  $q$  устанавливается так же, как и значение числа  $p$ .

0.5

Класс точности на прибор обозначается в виде  $\text{0.5}$ , где 0,5 – конкретное значение  $q$  (рис. 3.4).

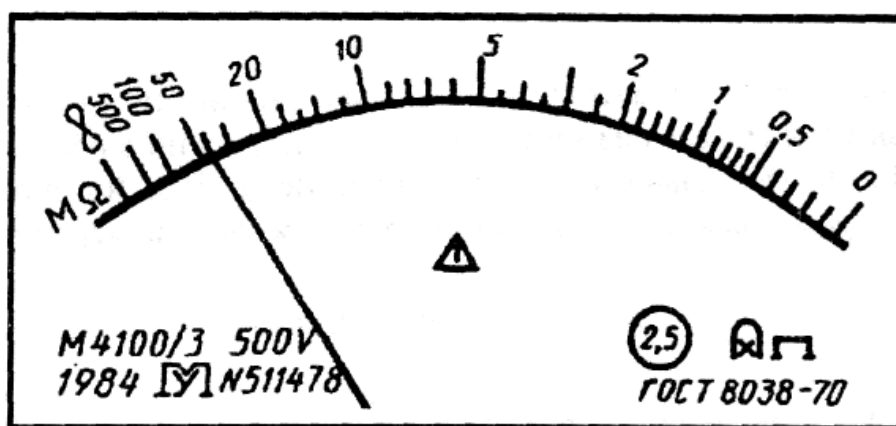
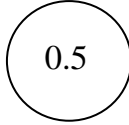


Рис. 3.4. Лицевая панель мегаомметра класса точности 2,5 с неравномерной шкалой

В стандартах и технических условиях на СИ указывается минимальное значение  $x_0$ , начиная с которого применим принятый способ выражения пределов допускаемой относительной погрешности. Отношение  $x_k / x_0$  называется динамическим диапазоном измерения.

Правила построения и примеры обозначения классов точности в документации и на средствах измерений приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1.  
Обозначение классов точности средств измерений

Формула для определения пределов допускаемой погрешности	Примеры пределов допускаемой основной погрешности	Обозначение класса точности	
		В документах	На средствах
Абсолютная погрешность			
$\Delta = \pm a$	$\Delta = \pm 2\Gamma_{ц}$	Класс точности М	М
$\Delta = \pm(a + bx)$	$\Delta = \pm(2 + 0,03f)\Gamma_{ц}$	Класс точности С	С
Приведенная погрешность			
$\gamma = \Delta / X = \pm p$	$\gamma = \pm 1,5\%$	Класс точности 1,5	1,5
	$\gamma = \pm 0,5\%$	Класс точности 0,5	$\nabla$ 0,5 (для СИ с неравномерной шкалой)
Относительная погрешность			
$\delta = \Delta / x = \pm q$	$\delta = \pm 0,5\%$	Класс точности 0,5	
$\delta = \Delta / x = \pm [c + d( x_k / x  - 1)]$	$\delta = \pm [0,02 + 0,01( x_k / x  - 1)]\%$	Класс точности 0,02/0,01	0,02/0,01

### Контрольные вопросы

1. Поясните, что такое класс точности СИ.
2. Является ли класс точности СИ непосредственной оценкой точности измерений, выполняемых этим СИ?
3. Перечислите основные принципы, лежащие в основе выбора нормируемых метрологических характеристик средств измерений.
4. Как нормируются приборы по классам точности?
5. Какие метрологические характеристики описывают погрешность средств измерений?
6. Как осуществляется нормирование метрологических характеристик средств измерений?

# ГЛАВА 4

## МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА

---

### 4.1. Понятие о единстве измерений

При проведении измерений необходимо обеспечить их единство.

Обеспечение единства измерений необходимо для достижения сопоставимых результатов измерений одних и тех же параметров, выполненных в разное время и в разных местах, с помощью разных методов и средств.

Под единством измерений понимается состояние измерений, заключающаяся в том, что их результаты выражаются в узаконенных единицах, они обеспечиваются с помощью единообразных средств измерений, а погрешности результатов измерений известны с заданной вероятностью и не выходят за установленные пределы (Закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений»).

На государственном уровне деятельность по обеспечению единства измерений регламентируется стандартами Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) или нормативными документами органов метрологической службы.

Для проверки соблюдения метрологических правил и норм Государственная метрологическая служба (ГМС) Российской Федерации осуществляет государственный метрологический контроль и надзор.

Объектами государственного метрологического контроля и надзора являются: средства измерений, эталоны, методики выполнения измерений, качество товаров, другие объекты, предусмотренные правилами законодательной метрологии.

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

Для обеспечения единства измерений необходима тождественность единиц, в которых проградуированы все существующие средства измерений одной и той же величины.

Это достигается точным воспроизведением и хранением в специализированных учреждениях установленных единиц физических величин и передач их размеров применяемым средствам измерений.

Воспроизведение единицы физической величины – это совокупность операций по материализации единицы физической

величины с наивысшей в стране точностью посредством государственного эталона или исходного образцового средства измерений.

Передача размера единицы – это приведение размера единицы физической величины, хранимой поверяемым средством измерений, к размеру единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, которое осуществляется при их поверке или калибровке.

Размер единицы передается «сверху вниз» – от более точных средств измерений к менее точным.

## 4.2. Эталоны единиц физических величин

Эталон – средство измерений (или комплекс средств измерений), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы физической величины с наивысшей точностью (для данного уровня развития измерительной техники) для передачи её размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений и утверждённое в качестве эталона в установленном порядке.

Классификацию, назначение и общие требования к созданию, хранению и применению эталонов устанавливает ГОСТ 8.057-80 «ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения».

Эталоны классифицируют в зависимости от метрологического назначения.

Это назначение предполагает оснащение метрологической службы первичными, специальными, государственными, национальными, международными и вторичными эталонами:

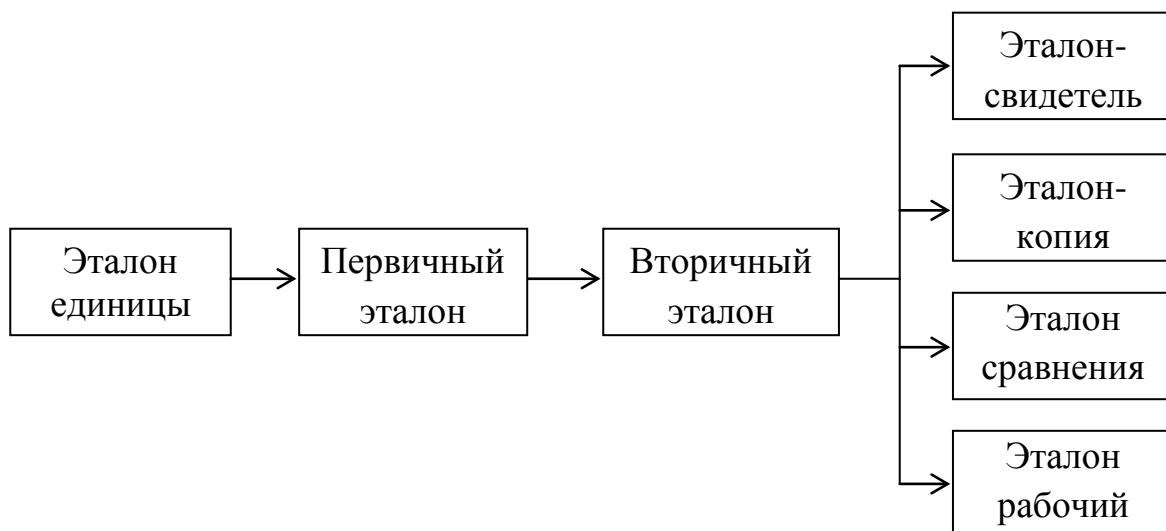


Рис. 4.1.

Различают следующие виды эталонов.

**Первичный эталон.** Обеспечивает воспроизведение и хранение единицы с наивысшей в стране точностью.

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

**Специальный эталон** обеспечивает воспроизведение единицы в особых условиях, в которых прямая передача размера единицы от первичного эталона с требуемой точностью не осуществима, и служит для этих условий первичным эталоном.

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

**Государственный эталон** – это первичный (или специальный) эталон, официально утвержденный в качестве исходного на территории государства.

Государственные эталоны подлежат периодическим сличениям с государственными эталонами других стран.

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

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

**Вторичный эталон** хранит размер единицы, полученной сличением с первичным эталоном соответствующей физической величины.

По метрологическому назначению вторичные эталоны делятся на следующие:

- **эталон-свидетель** – предназначен для проверки сохранности и неизменности государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты (в настоящее время только эталон килограмма имеет эталон-свидетель);

- **эталон-копия** – предназначен для передачи размера единицы рабочим эталонам (он создается для предохранения первичного или специального эталона от преждевременного износа при необходимости проведения большого количества поверочных работ);

- **эталон сравнения** – применяется для взаимного сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом (например, международные сличения эталонов);

- **рабочий эталон** – применяется для передачи размера единицы рабочим средствам измерений.

Рабочие эталоны при необходимости подразделяются на разряды 1, 2, и т.д., определяющие порядок их соподчинения в соответствии с поверочной схемой.

Метрологическая последовательность передачи размеров единиц физических величин от первичного эталона рабочим мерам и измерительным приборам:

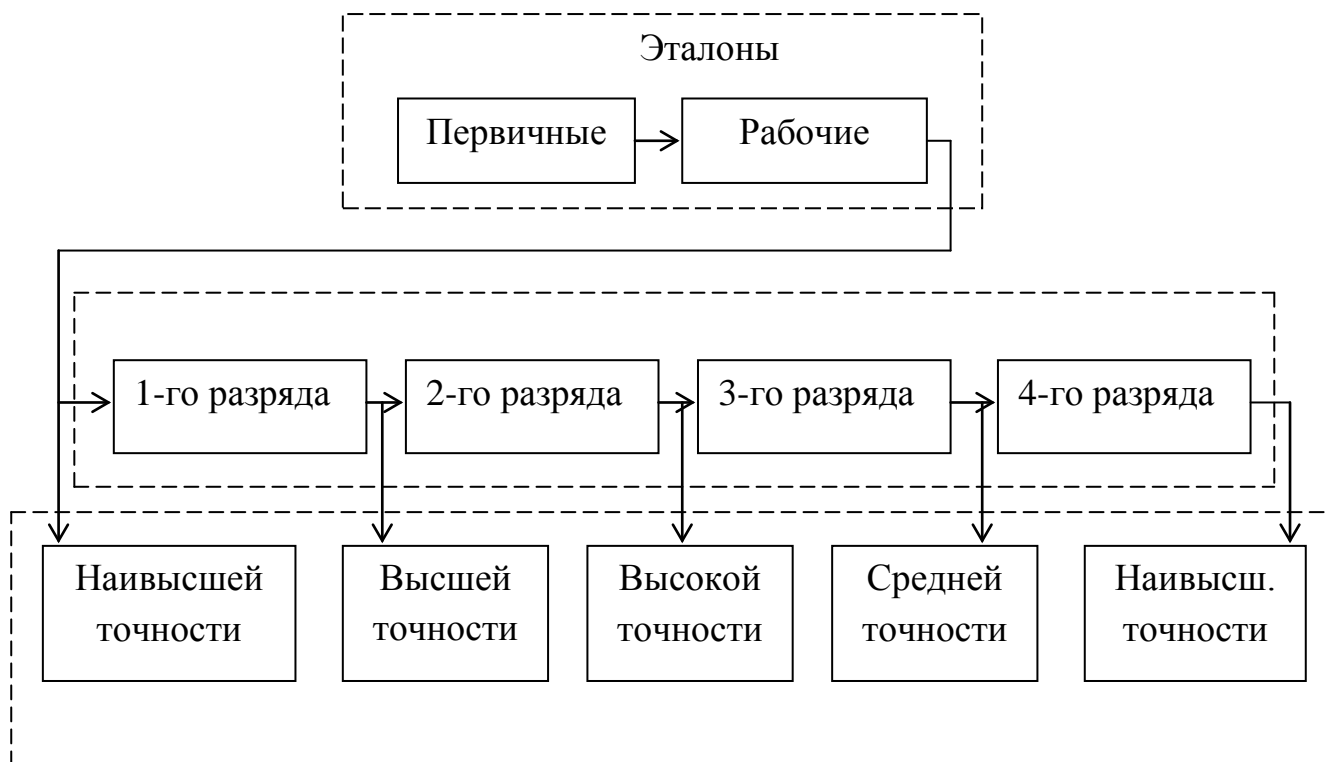


Рис. 4.2. Последовательность передачи

Совокупность всех перечисленных эталонов образует эталонную базу Российской Федерации.

### 4.3. Поверочные схемы

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

**Поверочная схема** – это нормативный документ, который устанавливает соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона к рабочим средствам измерений с указанием методов и погрешности, и утвержденный в установленном порядке.

Основные положения о поверочных схемах приведены в ГОСТ 8.061-80 «ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение».

Поверочные схемы делятся на государственные, ведомственные и локальные.

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

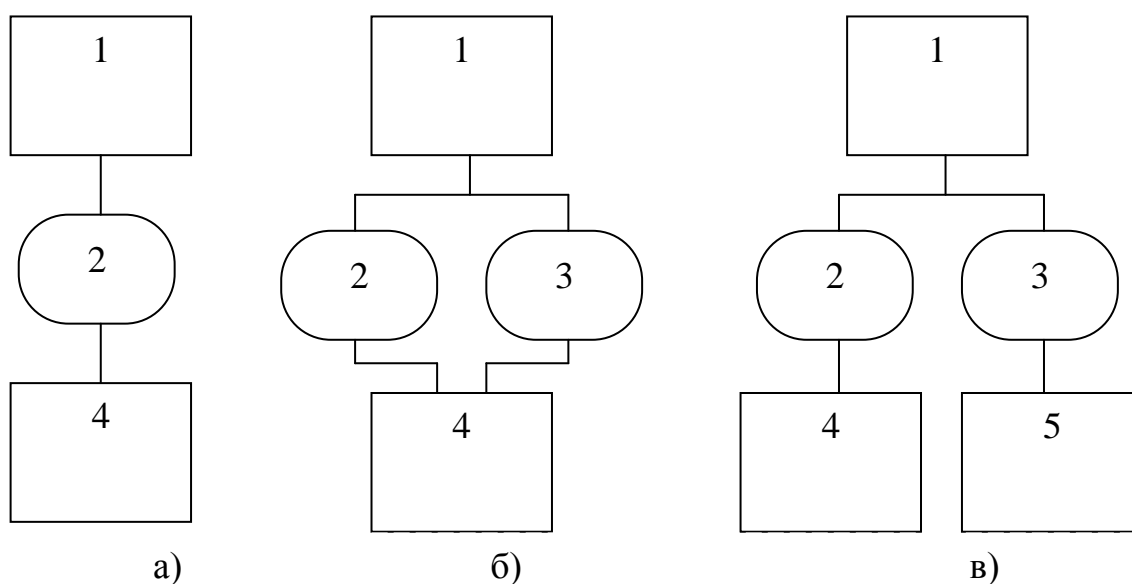


Она разрабатывается в виде государственного стандарта, состоящего из чертежа поверочной схемы и текстовой части, содержащей пояснения к чертежу.

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

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

Ведомственная и локальная поверочные схемы оформляют в виде чертежа, элементы которого приведены на рисунке 4.3:



*Рис. 4.3. Поверочные схемы*

- а) передача размера от эталона 1 к объекту 4 методом 2;
- б) передача размера от эталона 1 к объекту поверки 4 методом 2 или 3;
- в) передача размера от эталона 1 к объекту поверки 4 методом 2 и объекту поверки 5 методом 3.

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

На чертежах поверочной схемы должны быть указаны:

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

Поверочная схема должна состоять не менее чем из двух ступеней передачи размера единицы физической величины.

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

#### **4.4. Понятие, виды и методы поверки**

**Поверка** – это операция, заключающаяся в установлении пригодности средства измерений к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и контроля их соответствия предъявляемым требованиям.

Основной метрологической характеристикой, определяемой при поверке средства измерений, является его погрешность. Она находится на основании сравнения поверяемого средства измерений с более точным средством измерений - рабочим эталоном.

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

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

Поверка выполняется метрологическими службами, которым дано на это право.

Средство измерений, признанное годным к применению, оформляется выдачей свидетельства о поверке, нанесением поверительного клейма или иными способами, устанавливаемыми нормативно-техническими документами.

Поверка измерительных приборов проводится:

1) методом непосредственного сравнения измеряемых величин и величин, воспроизводимых образцовыми мерами соответствующего класса точности. Наибольшая разность между результатами измерения и соответствующими им размерами мер является в этом случае основной погрешностью прибора;

2) методом непосредственного сличения показаний поверяемого и некоторого образцового прибора при измерении одной и той же величины. Разность показаний этих приборов равна абсолютной погрешности поверяемого средства измерений.

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

Важным при поверке является выбор оптимального соотношения между допускаемыми погрешностями образцового и поверяемого средства измерений.

Обычно, когда при поверке вводят поправки на показания образцовых средств измерений, это соотношение принимается равным 1:3.

Если же поправки не вводят, то образцовые средства измерений выбираются из соотношения 1:5.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие системы обеспечения единства измерений существуют в сфере связи и информатизации?
2. Основные цели системы обеспечения единства измерений РФ.
3. Перечислите основные задачи системы обеспечения единства измерений РФ.
4. Структура Государственной метрологической службы.
5. Цели и задачи системы обеспечения единства измерений в сфере связи и информатизации.
6. Существующая структура системы обеспечения единства измерений в сфере связи и информатизации

# ГЛАВА 5

## ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СРЕДСТВАХ РАДИОИЗМЕРЕНИЙ

### 5.1. Средства радиоизмерений. Меры

**Средства измерений** – технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики.

**Метрологические характеристики** – такие свойства средств измерений, которые позволяют судить об их пригодности для измерений определённой физической величины в заданном диапазоне её значений и с заданной точностью.

Принципиальное отличие средств измерений от других технических средств, используемых при измерениях, состоит в том, что погрешность, с которой они выполняют свои функции, лимитирована. По характеру участия в процессе измерения все средства измерений можно разделить на пять групп:

- 1) меры;
- 2) измерительные преобразователи;
- 3) измерительные приборы;
- 4) измерительные установки;
- 5) измерительные системы (информационно-измерительные системы).

**Мера** – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины данного размера.

**Например:** образцовая катушка сопротивления, гиря, нормальный элемент



Рис. 5.1. Примеры мер

Меры делятся на:

- однозначные;
- многозначные;
- наборы мер.

Однозначные меры воспроизводят либо единицы измерения, либо их кратные или дольные значения.

Из однозначных мер образуются наборы и магазины, различные комбинации которых позволяют получить необходимые кратные или дольные значения единиц измерений в заданных пределах.

Если каждая мера из совокупности используется отдельно и независимо от других, то такие меры образуют набор мер (например, набор гирь, набор концевых мер длины и т.д.).

Если все меры из данной совокупности соединены конструктивно в одно целое так, что каждая в отдельности использоваться не может, то они образуют магазины мер (например, магазины электрических сопротивлений, индуктивностей, емкостей и т.д.).

Многозначные меры или меры с переменным значением воспроизводят любые кратные или дольные значения единицы измерения в определённом диапазоне (например, измерительный конденсатор переменной ёмкости, проволочный реохорд и т.д.).

Меры подразделяют на рабочие и образцовые.

**Измерительный преобразователь (ИП)** – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и/или хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

Измерительный преобразователь не позволяет непосредственно получить результат измерений, а осуществляет преобразование одной физической величины (входной) в другую (выходную).

Измерительные преобразователи являются основой для построения более сложных средств измерений: измерительных приборов, измерительных установок, измерительных систем.

Сложные средства измерений обычно включают в себя целый ряд взаимосвязанных измерительных преобразователей, обеспечивающих получение численного результата измерений.

Измерительные преобразователи 1-4 образуют измерительную цепь.

В зависимости от положения преобразователя в измерительной цепи различают первичные и промежуточные измерительные преобразователи.

К первичному измерительному преобразователю (ПП, ПИП) подводится измеряемая величина.

При измерениях неэлектрических величин ПИП иногда называют датчиком, хотя под датчиком в общем случае следует понимать

конструктивную совокупность ряда измерительных преобразователей, размещаемых непосредственно у объекта исследований.

Измерительные преобразователи отличаются большим разнообразием.

**Измерительный прибор** – это средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

В отличие от измерительного преобразователя, измерительный прибор всегда имеет устройство, позволяющее человеку воспринимать информацию о числовом значении измеряемой величины.

- По физическим явлениям, положенным в основу работы, измерительные приборы можно разделить на электроизмерительные (электромеханические, электротепловые, электрохимические и др.) и электронные.
- По назначению их подразделяют на приборы для измерения электрических и неэлектрических (магнитных, тепловых, химических и др.) физических величин.
- По способу представления результатов их делят на показывающие и регистрирующие.
- По методу преобразования измеряемой величины – на приборы непосредственной оценки (прямого преобразования) и приборы сравнения.

Действие наиболее распространенных электроизмерительных приборов непосредственной оценки основано на возникновении в процессе измерений вращающего момента и вызванного им поворота подвижной части прибора. Особенности физических процессов, вызывающих появление вращающего момента, определяют деление приборов на магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические и др.

В магнитоэлектрическом приборе вращающий момент возникает в результате взаимодействия тока в катушке прибора с магнитным полем постоянного магнита. Перемещающийся элемент прибора – катушка.

В приборах электромагнитной системы отклонение стрелки от положения равновесия возникает в результате взаимодействия магнитного поля катушки, по которой проходит ток, и железного сердечника. Катушка прибора может быть плоской или круглой. Наибольшее распространение получили приборы с плоской катушкой. Катушку наматывают из медного провода. На специальной оси, торцы которой упираются в подпятники, закреплен сердечник. Когда по катушке прибора проходит ток, сердечник намагничивается и втягивается внутрь катушки. Ось поворачивается, закручивает пружину, и стрелка устанавливается в определенном положении.

С осью подвижной системы прибора соединен алюминиевый лепесток. При повороте оси он перемещается в магнитном поле небольшого магнита. В лепестке наводится ток. Взаимодействие этого

тока с магнитным полем создает тормозящий момент, что предотвращает колебания вращающейся системы.

Стрелка электромагнитного прибора отклоняется также в том случае, когда по катушке проходит переменный ток.

Электромагнитные приборы имеют невысокую чувствительность, неравномерную шкалу и невысокий класс точности.

Электродинамические приборы пригодны для измерений тока, напряжения, мощности и других величин как в цепях постоянного тока, так и в цепях переменного тока. На точность показаний приборов этой системы сильное влияние оказывают внешние магнитные поля.

Электромагнитные и электродинамические приборы являются основными, применяемыми для измерения токов, напряжений, мощности и других электрических величин в цепях переменного тока промышленной частоты (50 Гц). Специальные разновидности этих приборов могут быть использованы при частотах токов до 2000 Гц. Однако такие приборы применяют сравнительно редко.

Приборы сравнения предназначены для непосредственного сравнения измеряемой величины с величиной, значение которой известно (с мерой). Приборы сравнения могут работать в двух режимах: в равновесном режиме и в неравновесном режиме. Структурные схемы приборов сравнения приведены на рисунке:

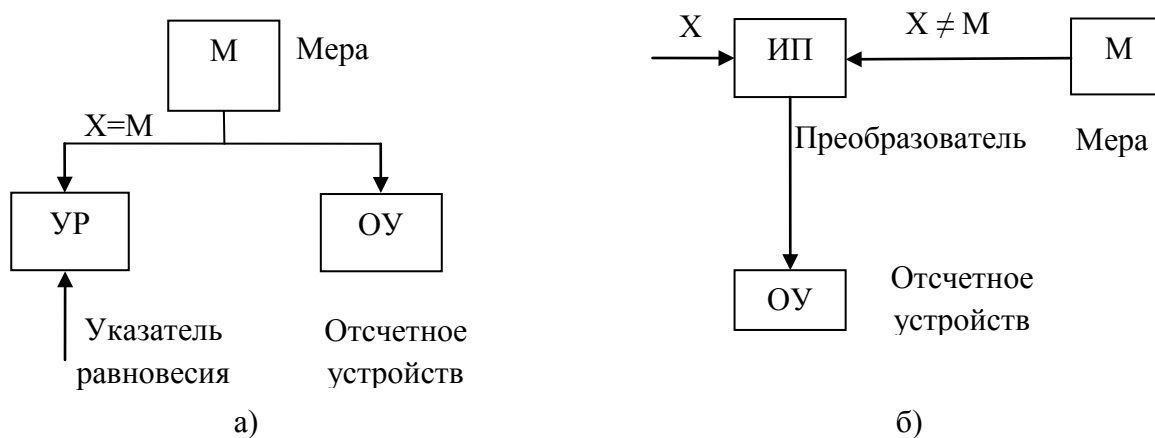


Рис. 5.1. Структурные схемы приборов сравнения

При работе в равновесном режиме (рис. 5.1 а) измеряемая величина  $X$  полностью компенсируется воздействием меры. Значение меры или ее части, необходимой для компенсации величины  $X$ , в процессе измерения определяется по отсчетному устройству.

В неравновесном режиме разность показаний между мерой и измеряемой величиной измеряется в отсчетном устройстве, шкала которого градуирована в единицах измеряемой величины.

- По способу применения и конструкции – на щитовые, переносные и стационарные.

- По защищенности от воздействия внешних условий измерительные приборы подразделяют на обыкновенные, влаго-, газо- и пылезащищенные, герметичные, взрывобезопасные и др.
- Все измерительные приборы могут быть разделены на аналоговые и цифровые.

В аналоговом измерительном приборе показания являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины.

Цифровой измерительный прибор автоматически вырабатывает дискретные сигналы измерительной информации, а его показания представлены в цифровой форме.

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

Например, поверочные установки, установки для испытаний электротехнических, магнитных и других материалов, лабораторные установки для исследования характеристик электродвигателей, стенды для поверки электрических счётчиков и т.п.

Измерительная установка позволяет предусмотреть определённый метод измерения и заранее оценить погрешность измерения.

Отличие измерительной установки от измерительной системы заключается в её локальности, компактности размещения.

**Измерительная система (ИС)** – совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединённых между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, хранения, передачи и (или) использования в автоматических системах управления.

Например, многоканальный пространственно распределённый информационно-измерительный комплекс в составе системы управления производством.

Частными случаями измерительных систем являются измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) и информационно-измерительные системы (ИИС). К последним относятся системы автоматического контроля, системы технической диагностики, системы распознавания образов и др.

Измерительные системы – это наиболее современные и сложные средства измерений.

Очевидно, что различные типы средств измерений и их конкретные экземпляры отличаются друг от друга по свойствам. В связи с этим возможности и качество средств измерений определяются совокупностью ряда характеристик.



# ГЛАВА 6

## ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

---

### 6.1. Измерения в цепях постоянного тока

Измерения постоянного тока и напряжения производятся с помощью приборов магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической систем, напряжение измеряется также электростатическими и электронными вольтметрами. Кроме этого, для более точных измерений используются компенсаторы постоянного тока.

Магнитоэлектрические измерительные механизмы непосредственно являются микро- и миллиамперметрами или милливольтметрами, а в сочетании с шунтами и добавочными сопротивлениями – соответственно амперметрами и вольтметрами.

Для измерения и обнаружения малых токов ( $10^{-11}$  -  $10^{-5}$  А) и напряжений (меньших  $10^{-4}$  В) применяют гальванометры – высокочувствительные измерительные механизмы обычно магнитоэлектрической системы. В отличие от приборов, шкалы которых градуируются в измеряемых величинах, гальванометры имеют неименованную шкалу, цена деления которой указывается в паспортных данных прибора или определяется экспериментально.

Измерение постоянных токов и напряжений можно производить с помощью амперметров и вольтметров электромагнитной и электродинамических систем. Они применяются в основном для измерений в цепях переменного тока.

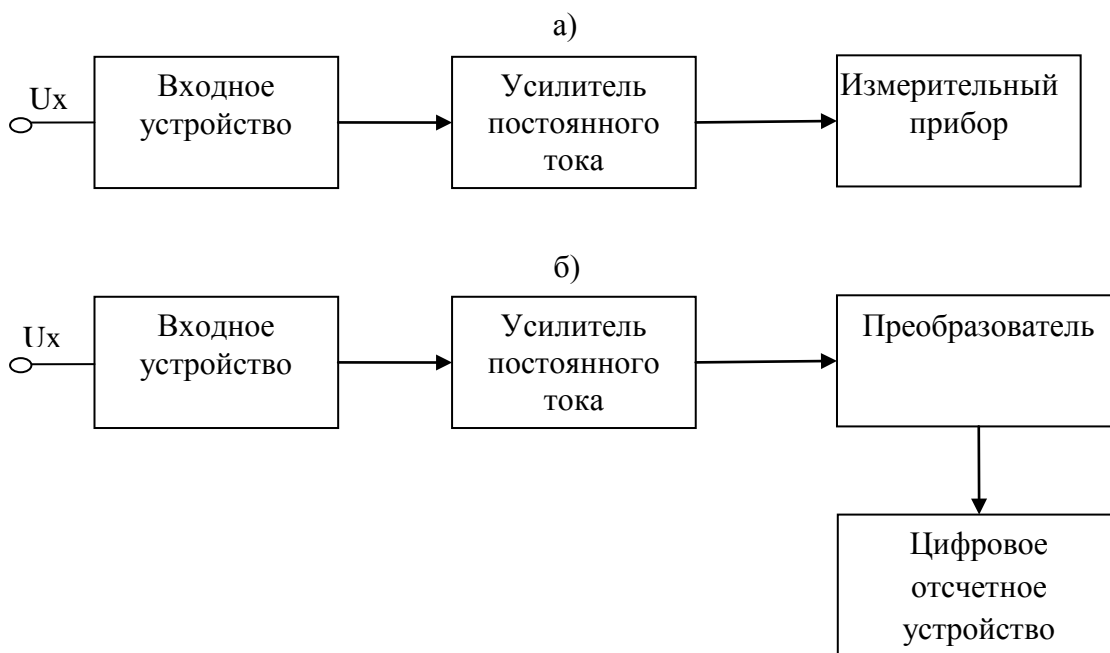
Электростатические измерительные механизмы являются электростатическими вольтметрами, так как они могут непосредственно измерять напряжение. Диапазон измеряемых ими напряжений находится в пределах от десятка вольт до сотен киловольт. Для измерения напряжений до 3 кВ используют измерительные механизмы с изменяющейся активностью поверхности электродов. Изготавливают вольтметры однопредельными и многопредельными, переносными (до 30 кВ) и стационарными (для измерения высоких напряжений, свыше 30 кВ).

Класс точности современных электростатических вольтметров достигает 0,1 и даже 0,05 (С-71), однако чаще всего изготавливают приборы классов 1,5; 2 и 2.5. Для уменьшения влияния внешних электростатических полей применяют электростатическое экранирование. Пределы измерений расширяют с помощью резисторных делителей напряжения.

Основными достоинствами электростатических вольтметров являются: очень малое собственное потребление мощности (большое

входное сопротивление,  $10^{10}$  Ом), способность измерять постоянные и переменные напряжения, возможность непосредственно измерять большие напряжения. К недостаткам относятся малая чувствительность и неравномерность шкалы.

Измерение постоянных напряжений от долей вольта до нескольких киловольт может осуществляться с помощью электронных вольтметров, которые содержат измерительный механизм и ламповый или транзисторный усилитель постоянного тока. Существует несколько разновидностей электронных вольтметров постоянного тока, однако все они характеризуются структурной схемой, показанной на рисунке 6.1.



*Рис. 6.1. Структурная схема электронного вольтметра постоянного напряжения: а) со стрелочным отсчетом; б) с цифровым отсчетом*

Входное устройство (делитель напряжения), на которое подается напряжение  $U_x$ , позволяет изменять пределы измерения и обеспечивает высокое входное сопротивление прибора.

В качестве измерительного механизма используют обычно магнитоэлектрический микроамперметр с пределами измерения 50-500 мкА.

Усилители постоянного тока предназначаются для повышения чувствительности прибора, увеличения мощности измеряемого сигнала до уровня, при котором обеспечивается требуемое отклонение указателя измерительного механизма. Усилители имеют высокое входное и малое выходное сопротивление. Это обеспечивает согласование входного сопротивления вольтметра (10 - 20 МОм) с малым внутренним сопротивлением микроамперметра. Наиболее часто усилители выполняются в виде мостовых схем с обратной связью.

Электронные вольтметры со стрелочным отсчетом имеют следующие особенности: большое входное сопротивление и, следовательно, малое потребление мощности от объекта измерения; высокую чувствительность при большом диапазоне измерения; способность выдерживать перегрузки; сравнительно небольшую скорость измерений (из-за инерционности магнитоэлектрического измерительного механизма); непроходимость питания (от сети или батареи); большие погрешности (основная приведенная погрешность 2 - 3 %).

В настоящее время, конечно, большее распространение получили цифровые вольтметры – приборы с цифровым отсчетным устройством и аналого-цифровым преобразователем, в котором напряжение (или другие физические величины; частота, сдвиг фаз и т.д.) автоматически преобразуются в цифровой код. Такие приборы имеют ряд преимуществ перед стрелочными: обладают широким диапазоном измеряемых напряжений (от 1 мВ до 1000 В), быстродействием, позволяют проводить измерения с малыми погрешностями (0,01 - 0,005), так как принцип действия большинства приборов основан на методе сравнения, а цифровой отсчет исключает погрешность считывания. Цифровые вольтметры позволяют также вводить данные измерений непосредственно в вычислительные машины, что позволяет в дальнейшем обрабатывать полученные данные более оперативно.

К недостаткам можно отнести сложность устройства, меньшую надежность и высокую стоимость.

Существуют различные принципы построения цифровых вольтметров постоянного тока:

- По типу используемых элементов в схемах они делятся на:
  - электромеханические;
  - электронные;
  - комбинированные.
- По способу аналого-цифровых преобразований подразделяются на приборы с:
  - пространственным кодированием;
  - промежуточным преобразованием (в интервал времени, частоту, фазу и т.д.);
  - уравновешенным образцовым напряжением (наиболее точные).

Обобщенная структурная схема электронного цифрового вольтметра представлена на рисунке 6.2.

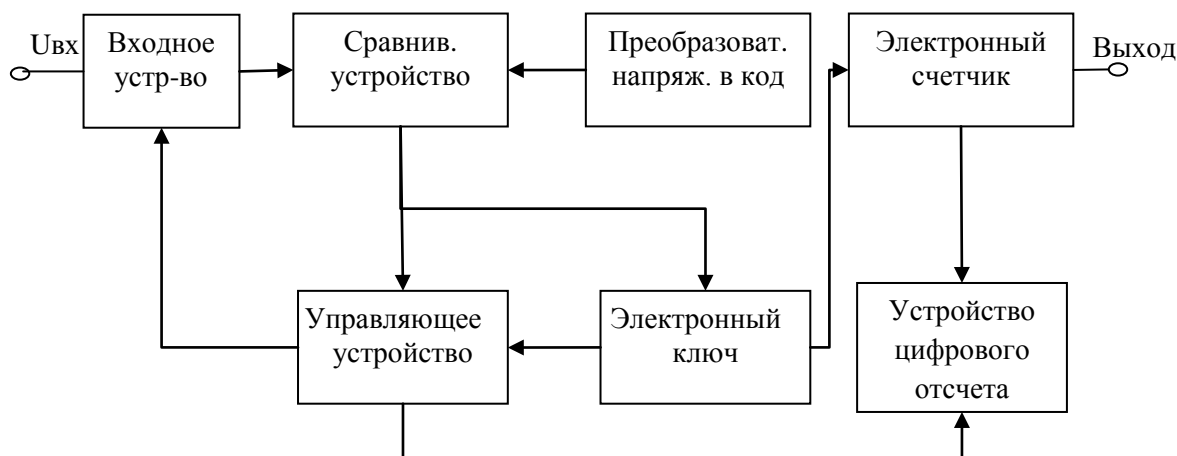


Рис. 6.2. Обобщенная структура схема электронного цифрового вольтметра

Входное устройство представляет собой высокоомное сопротивление (порядка 10 МОм) или катодный (эмиттерный) повторитель с калиброванным делителем.

Сравнивающее устройство (нуль-орган) служит для сравнения измеряемого и образцового напряжения.

Управляющие устройства состоят из генератора импульсов, задающего циклы измерения и управляющего работой логических схем.

Преобразователь напряжения в код создает образцовое напряжение  $U_{OBR}$ , которое подается в сравнивающее устройство.

Электронный ключ представляет собой устройство, которое включает или переключает выходное напряжение под действием одного или нескольких входных напряжений, называемых управляющими.

Электронные счетчики осуществляют отсчет измеряемого напряжения в цифровом коде (обычно в двоичной системе).

## 6.2. Измерения в цепях промышленной частоты

Для измерения тока и напряжения промышленной частоты наиболее часто используют приборы электромагнитной и электродинамической систем.

Для измерения в диапазоне частот 40 - 500 Гц используются электромагнитные амперметры и вольтметры в виде стационарных или переносных приборов. Стационарные (щитовые) приборы изготавливают однопредельными, чаще всего на 5 А и 100 В, а переносные – многопредельными.

Амперметры представляют собой непосредственно измерительный механизм электромагнитной системы. Число витков катушки и толщина провода выбираются в зависимости от значения измеряемого тока таким образом, чтобы образующееся магнитное поле в месте расположения

ферромагнитного сердечника обеспечило полное отклонение подвижной части измерителя при номинальном значении тока.

Электромагнитные амперметры способны выдерживать большие перегрузки по току; мощность, потребляемая амперметрами на 5 - 10 А, примерно равна 0,5 - 2,0 Вт.

В электромагнитных вольтметрах последовательно с катушкой измерительного механизма включено безреактивное добавочное сопротивление. Катушка изготавливается из большого числа витков тонкого медного провода. Для того чтобы вольтметр имел одну шкалу для измерения на постоянном и переменном токе, его полное сопротивление  $Z_V$  должно по возможности иметь активный характер, т.е.  $Z_V = R_V$ . Это достигается ограничением частотного диапазона измеряемых напряжений и таким подбором добавочного сопротивления, при котором реактивностью цепи вольтметра можно пренебречь.

Температурная и частотная погрешности у вольтметров электромагнитной системы больше, чем у амперметров. Это объясняется большим числом витков катушки измерительного механизма.

Мощность, потребляемая вольтметром, в зависимости от его конструкции и пределов измерения колеблется в пределах от 3 до 20 Вт.

Электродинамические приборы используются обычно для измерения тока и напряжения в диапазоне 40 Гц - 1 кГц. При более высоких частотах появляются значительные дополнительные (частотные) погрешности.

На рисунке 6.3 представлены схемы соединения катушек электродинамических механизмов, где 1 и 2 неподвижные и подвижные катушки соответственно,  $I_X$  – измеряемое действующее значение переменного или постоянного тока,  $Z_1'$  и  $Z_2'$  – подстроечные сопротивления, служащие для компенсации температурных погрешностей.

Возможно использование одной шкалы вольтметра как на постоянном так и на переменном токе т.к. на низких частотах значения реактивного сопротивления вольтметра незначительны.

Собственное потребление мощности электродинамических приборов велико (2 - 20 Вт). Этот недостаток во многих случаях компенсируется тем, что электродинамические приборы позволяют производить измерения в цепях постоянного и переменного тока с большой точностью (приборы класса 0,1; 0,2).

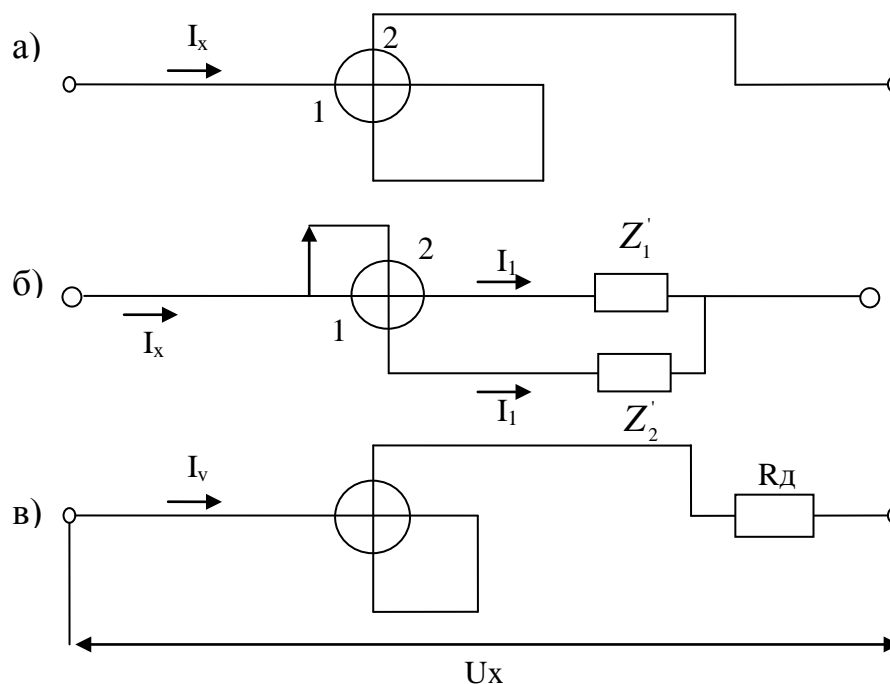


Рис. 6.3 Схемы соединения катушек электродинамических механизмов: а) амперметр (до 0,5 А), б) амперметр (выше 0,5 А), в) вольтметр

### 6.3. Омметры

Показывающие приборы, служащие для непосредственного измерения электрического сопротивления, называются омметрами. В качестве измерительного механизма в таких приборах обычно используются магнитоэлектрические системы. Диапазон измеряемых величин определяется конструкцией и электрической схемой омметра, и в зависимости от этого появляются приставки «кило», «мега», «тера».

По принципу действия омметры подразделяются на две группы: омметры, показания которых зависят от напряжения источника питания, и омметры, показания которых не зависят от него. Кроме того, для измерения больших сопротивлений применяются электронные омметры.

Омметры первой группы содержат однорамочный магнитоэлектрический механизм (миллиамперметр), а второй группы – логометр магнитоэлектрической системы, подвижная часть которого обычно содержит две рамки (катушки).

#### 6.3.1. Однорамочные омметры.

На рисунке 6.4 приведены схемы омметров с последовательным и параллельным соединением подвижной катушки (рамки) магнитоэлектрического измерительного механизма  $M$  измеряемым сопротивлением  $R_x$ .

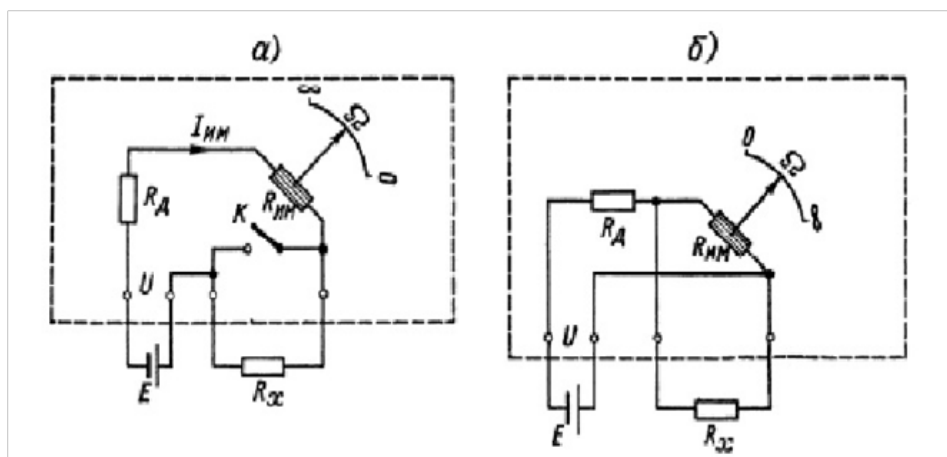


Рис. 6.4. Схемы однорамочных омметров

Омметры с последовательным включением  $R_x$  обычно измеряют большие сопротивления (килоомы, мегаомы), а параллельным – малые (от долей ома до килоом).

Использование аккумуляторных или гальванических батарей позволяет изготавливать омметры в виде переносных приборов. Точность таких приборов 1,5 – 2,5 %.

### 6.3.2. Двухрамочные омметры.

В качестве измерительного механизма в таких омметрах используется логометр.

Схемы омметров с логометрами показаны на рисунке 6.5.

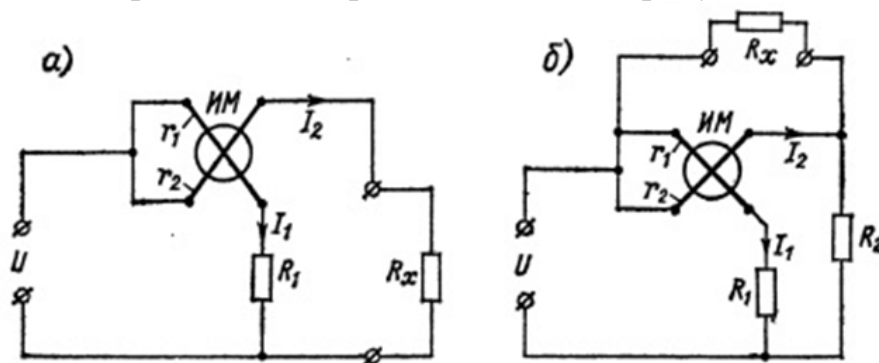


Рис. 6.5. Схемы омметров с логометрами

( $r_1$  и  $r_2$  – сопротивления рамок логомера;  $R_1$  и  $R_2$  – постоянно включенные резисторы;  $I_1$  и  $I_2$  – токи в рамках логометра, отношение которых зависит от измеряемого сопротивления  $R_x$ )

При последовательном соединении  $R_x$  с рамкой логометра измеряют большие сопротивления ( $10^8 - 10^{10}$  Ом); такую схему имеют мегаомметры, предназначенные для измерения сопротивления изоляции. В приборах такого типа в качестве источника используется генератор постоянного тока с ручным приводом, обеспечивающим измерительную схему необходимым напряжением (100, 500, 1000, 2000 и 2500 В).

При измерении малых сопротивлений измеряемое сопротивление включают параллельно логометру. Для расширения диапазона измерения омметра в одном приборе объединяют обе схемы и с помощью специального переключателя в зависимости от значения измеряемого сопротивления соединяют его либо последовательно, либо параллельно с рамкой логометра.

### 6.3.3. Электронные тераомметры.

Для измерения очень больших сопротивлений (от  $10^8$  Ом и больше) применяют электронные тераомметры. Измеряемое сопротивление после подключения его к зажимам прибора последовательно соединяется с образцовым резистором  $R_0$  и образует вместе с ним делитель напряжения. К этому делителю подводится определенное, постоянное по величине напряжение  $U$ . Падение напряжения  $U_0$  на резисторе  $R_0$  измеряется электронным вольтметром, шкала измерительного механизма градуируется в омах. Это возможно потому, что ток, протекающий через  $R_x$  и  $R_0$ , зависит от  $R_x$  (при  $U = const$ ).

Точность измерения сопротивления тераомметром зависит от точности изготовления и стабильности работы образцового резистора, от стабильности питающего напряжения  $U$  и от точности электронного вольтметра.

Переносные тераомметры изготавливают многопредельными, имеющими набор образцовых сопротивлений (десятки и сотни мегомов): для каждого предела измерения с помощью специального переключателя в цепь делителя вводится определенное значение образцового сопротивления. Погрешность измерения тераомметров колеблется в пределах 1,5 - 15 % в зависимости от значения измеряемого сопротивления.

### Контрольные вопросы

1. На каком принципе основана работа электронных вольтметров?
2. Чем определяется входное сопротивление электронного вольтметра?
3. Как изменяется входное сопротивление электронного вольтметра при изменении частоты измеряемого напряжения?
4. Что такое омметры и на какие группы они подразделяются?
5. Расскажите про группы омметров.



# ГЛАВА 7

## ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

---

### 7.1. Общие сведения

Электрические и радиотехнические цепи с сосредоточенными постоянными состоят из резисторов, катушек индуктивности, конденсаторов и соединяющих проводов. Для отбора этих элементов или их проверки следует измерять активное, реактивное и полное сопротивление, индуктивность, емкость и взаимоиנדуктивность. Кроме того, часто измеряют потери в конденсаторах и добротность катушек и колебательных контуров. Для этих измерений применяют методы вольтметра и амперметра, мостовой, резонансный метод и метод дискретного счета.

### 7.2. Метод вольтметра и амперметра

Метод вольтметра и амперметра – косвенный способ определения различных сопротивлений, позволяющий ставить элемент с определенным сопротивлением в рабочие условия. Этот метод основан на использовании закона Ома для участка цепи, сопротивление  $R_x$  которого определяется по известному падению напряжения  $U_x$  на нем и току  $I_x$  так:

$$R_x = U_x / I_x.$$

Существуют различные способы измерения падения напряжения  $U_x$  и тока  $I_x$  (рис. 7.1).

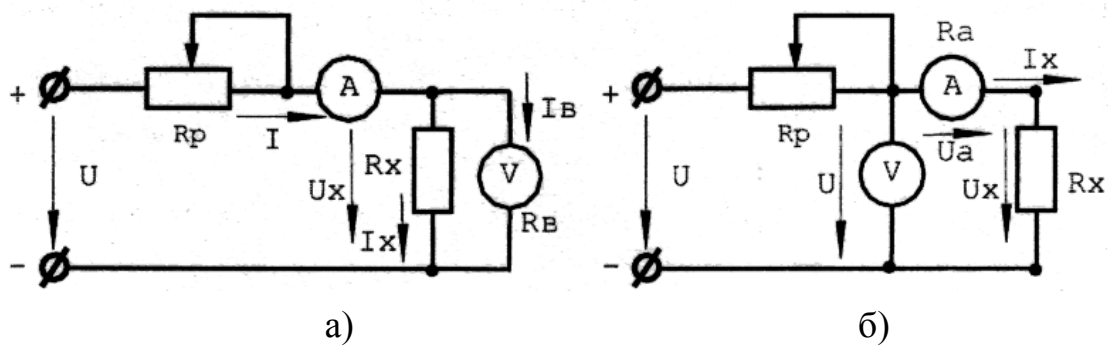


Рис. 7.1. Способы измерения падения напряжения  $U_x$  и тока  $I_x$

Измерительные части приведенных схем не обеспечивают одновременное измерение напряжения  $U_x$  и тока  $I_x$ . Так первая схема (рис. 7.1 а) позволяет измерить с помощью вольтметра напряжение  $U_x$ . Амперметр дает возможность определить ток  $I$ , равный сумме  $I_x$  и  $I_в$ , из которой последний является током обмотки вольтметра. В этом случае определяемое сопротивление:

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U_x}{I - I_в} = \frac{U_x}{I - \frac{U_x}{R_в}},$$

где  $R_в$  – сопротивление вольтметра.

Во второй схеме (рис. 7.1 б) амперметр учитывает ток  $I_x$ , но вольтметр показывает напряжение  $U$ , равное сумме падений напряжений  $U_x$  на сопротивлении  $R_x$  и  $U_a$  на амперметре. Поэтому определяемое сопротивление:

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U - U_a}{I_x} = \frac{U}{I_x} - \frac{U_a}{I_x} = \frac{U}{I_x} - R_a,$$

где  $R_a$  – сопротивление амперметра.

Следовательно, если при расчете определяемого сопротивления учитывать сопротивления приборов, то все схемы равноценны.

Если определяемое сопротивление  $R_x$  мало по сравнению с сопротивлением вольтметра  $R_в$ , током  $I_в$  можно пренебречь и, применяя первую схему (рис. 7.1 а), находить сопротивление  $R_x$  так:

$$R_x = R'_x = \frac{U_x}{I},$$

допуская относительную погрешность

$$\gamma'_o = \frac{R'_x - R_x}{R_x},$$

где  $R'_x$  – измеренное значение сопротивления.

Учитывая, что  $R'_x = \frac{R_x \cdot R_g}{R_x + R_g}$ , имеем

$$\gamma'_o = -\frac{R_x}{R_x + R_g}.$$

В случаях, когда определяемое сопротивление  $R_x$  сравнимо с сопротивлением вольтметра  $R_g$  и пренебречь током  $I_g$  нельзя, следует пользоваться второй схемой (рис. 7.1 б) и при расчете не учитывать падение напряжения  $U_a$  на амперметре, определяя сопротивление  $R_x$  так:

$$R_x = R'_x = U / I_x$$

при относительной погрешности измерения

$$\gamma''_o = \frac{R'_x - R_x}{R_x}.$$

Учитывая, что  $R'_x = R_x + R_a$  имеем

$$\gamma''_o = \frac{R_a}{R'_x - R_a} = \frac{R_a}{R_x}.$$

Для выявления пределов целесообразности использования той или другой схемы следует приравнять относительные погрешности, а затем найти значение сопротивления  $R_x$ , для которого обе схемы равноценны:

$$\frac{R_x}{R_x + R_g} = \frac{R_a}{R_x},$$

ИЛИ

$$R_x^2 - R_a \cdot R_x - R_g \cdot R_a = 0.$$

Откуда

$$R_x \cong \sqrt{R_g \cdot R_a}.$$

Следовательно, для сопротивлений  $R_x < \sqrt{R_g \cdot R_a}$  предпочтительна схема (рис. 7.1 а), а для сопротивлений  $R_x > \sqrt{R_g \cdot R_a}$  схема (рис. 7.1 б). Первую из них называют схемой определения «малых» сопротивлений, а вторую – схемой для определения «больших» сопротивлений.

При определении сопротивлений методом вольтметра и амперметра следует выбирать магнитоэлектрические приборы с такими пределами измерений, чтобы показания их были близки к номинальным значениям, т.к. это обеспечивает меньшие погрешности измерения.

### 7.3. Мостовой метод

Основу мостового метода составляет принцип сравнения. Измеряемые активное и реактивное сопротивления сравнивают с сопротивлениями рабочих элементов, включенных в соответствующие плечи переменного тока (рис. 7.2).

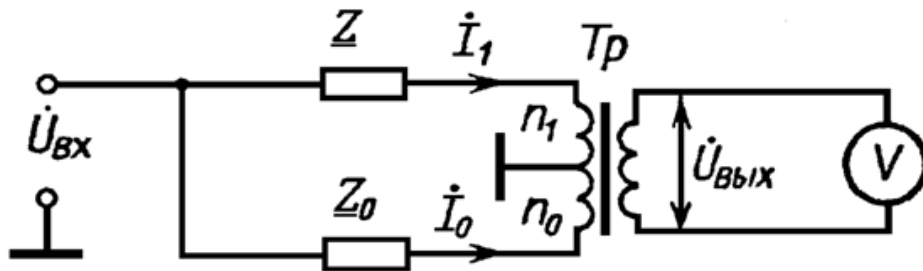


Рис. 7.2. Схема трансформаторного моста

Мост состоит из измеряемого  $Z$  и  $Z_0$  сопротивлений и трансформатора тока  $T_p$ . Особенность трансформатора тока – очень малые значения полных сопротивлений первичных обмоток. Поэтому через них токи определяются только сопротивлениями  $Z$  и  $Z_0$  и не зависят от сопротивлений самих обмоток. Напряжение, возбуждаемое во вторичной обмотке, пропорционально магнитному потоку в сердечнике. Составляющие этого потока, создаваемые каждой из первичных обмоток, пропорциональны произведению тока обмотки на число ее витков (ампервитки) и имеют знаки, зависящие от направления витков.

Первичные обмотки с числами витков  $n_1$  и  $n_0$  включены встречно; тогда создаваемые ими магнитные потоки противоположны. Равновесию моста соответствует условие компенсации этих потоков

$$\dot{I}_1 n_1 = \dot{I}_0 n_0. \quad (7.1)$$

Состояние равновесия фиксируется по нулевым показаниям стрелочного прибора  $U_{\text{вых}} = 0$ . В формуле (7.1)  $\dot{I}_1 = \dot{U}_{\text{вх}} / \underline{Z}$ ;  $\dot{I}_0 = \dot{U}_{\text{вх}} / \underline{Z}_0$ . Следовательно, при равновесии

$$\underline{Z} = \underline{Z}_0 n_1 / n_0.$$

Трансформаторный мост можно уравновесить изменением обоих составляющих рабочего сопротивления и чисел витков в обмотках. Отношение чисел витков можно менять в больших пределах, оно стабильно во времени и при изменении температуры. Это определяет высокие метрологические характеристики трансформаторных мостов; отношение наибольшего значения измеряемой величины к наименьшему достигает  $10^7$ ; погрешность измерения в диапазоне звуковых частот может быть доведена до 0,01%.

Основным недостатком рассмотренной схемы является трудоемкий процесс уравнивания моста. Разработаны автоматические мосты с цифровым отсчетом результата измерений. При этом в десятки раз уменьшается время измерения и повышается точность, появляется возможность построения автоматических измерительных систем. Наибольшее распространение получили автоматические трансформаторные мосты с преобразованием измеряемого и рабочего полных сопротивлений в пропорциональные им напряжения. Эти напряжения затем сравнивают и компенсируют. Соответствующая измерительная схема получила название автокомпенсационного моста.

#### 7.4. Резонансный метод

Резонансный метод основан на измерении параметров колебательного контура, составленного из рабочего (образцового) элемента и исследуемой цепи. В качестве образцового элемента обычно используют конденсатор переменной емкости с воздушным

диэлектриком, обладающий высокой стабильностью, малыми потерями и низким температурным коэффициентом емкости (ТКЕ). Градуировка рабочего конденсатора делается с большой точностью: от этого зависит погрешность метода. Настраивая контур в резонанс и измеряя его добротность, можно по опытным данным рассчитать параметры исследуемой цепи.

Достоинством резонансного метода является то, что он позволяет производить измерения в широком диапазоне частот (от долей до сотен мегагерц). Важная особенность метода – возможность определить действующие значения параметров, т. е. фактические значения сопротивления, индуктивности или емкости на зажимах исследуемой цепи с учетом паразитных составляющих ее эквивалентной схемы. Кроме того, по результатам измерений на нескольких частотах можно определить паразитные параметры измеряемых элементов – собственную (межвитковую) емкость катушки, собственную индуктивность конденсатора и т. п.

Резонансный метод измерения параметров сосредоточенных элементов реализуется в измерителях добротности (куметрах). Упрощенная структурная схема прибора (рис. 7.3) содержит диапазонный генератор гармонических колебаний, колебательный контур, состоящий из рабочего конденсатора  $C_0$  и измеряемой цепи, а также электронный вольтметр, по показаниям которого фиксируют момент настройки в резонанс колебательного контура и определяют его добротность  $Q$ . В комплект прибора входит набор образцовых (рабочих) катушек индуктивности, используемых, в основном, при измерении емкости методом замещения. На каждой катушке указан диапазон частот, в пределах которого возможен резонанс для рабочего конденсатора данного куметра.

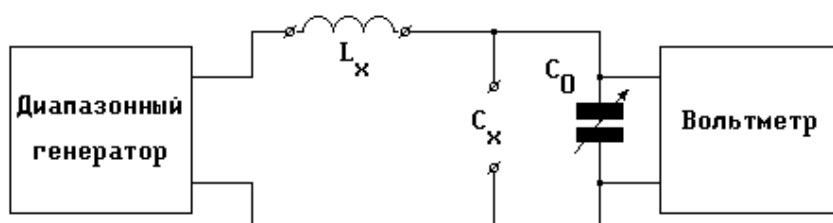


Рис. 7.3. Структурная схема измерителя добротности

Принцип измерения добротности с помощью куметра основан на известном свойстве последовательного колебательного контура – при резонансе амплитуда напряжения на емкости в  $Q$  раз превышает амплитуду напряжения на входе цепи. Измеряемый элемент подключают либо к клеммам  $L_X$ , последовательно с рабочим конденсатором куметра, либо к клеммам  $C_X$  (в этом случае к клеммам  $L_X$  должна быть подключена рабочая катушка индуктивности, соответствующая частоте измерения).

Основными источниками погрешностей при измерении параметров сосредоточенных элементов электрических цепей резонансным методом являются следующие:

- 1) погрешность установки частоты диапазонного генератора куметра и нестабильность амплитуды генерируемого им колебания, которая ведет к неточности расчета индуктивностей и активных сопротивлений;
- 2) погрешность установки значения рабочей емкости куметра;
- 3) погрешность настройки контура куметра в резонанс, которая зависит от добротности контура и приводит к неточности определения резонансного значения рабочей емкости куметра;
- 4) погрешности округления при обработке результатов косвенных измерений.

Следует заметить, что большинство измерений, выполняемых с помощью куметра, являются косвенными. Поэтому их погрешность сложным образом зависит от всех вышеперечисленных составляющих и определяется видом схемы измерения.

При измерении индуктивности  $L_X$  возможны два варианта применения метода. Для малых значений индуктивности, когда на рабочей частоте  $f$  выполняется условие

$$1/[(2\pi f)^2 C_{0\max}] < L_x < 1/[(2\pi f)^2 C_{0\min}],$$

где  $C_{0\max}$  и  $C_{0\min}$  – соответственно максимальное и минимальное значения емкости рабочего конденсатора куметра, исследуемую катушку включают в контур куметра к клеммам  $L_X$  последовательно. После этого настраивают контур прибора в резонанс (момент настройки определяется по максимуму показаний вольтметра) и фиксируют резонансное значение емкости рабочего конденсатора куметра  $C_1$ . Действующее значение индуктивности рассчитывается по известной формуле

$$L_x = 1/[(2\pi f)^2 C_1].$$

Если же индуктивность велика и  $L_x > 1/[(2\pi f)^2 C_{0\min}]$ , то параллельно измеряемой катушке  $L_x$  подключают образцовую катушку  $L_0$  из рабочего комплекта прибора. В этом случае измерение осуществляют в два этапа. Сначала в контур куметра включают только образцовую катушку  $L_0$ , настраивают контур в резонанс и фиксируют резонансное значение рабочей емкости куметра  $C_1$ . Затем параллельно подключают измеряемую индуктивность, повторяют настройку контура и фиксируют новое резонансное значение рабочей емкости куметра  $C_2$ . Значение измеряемой индуктивности рассчитывают следующим образом:

$$L_x = \frac{1}{(2\pi f)^2 (C_2 - C_1)}.$$

При измерении относительно малых значений емкости  $C_x$  исследуемый конденсатор включают в контур куметра к клеммам  $C_x$  параллельно рабочему конденсатору.

При измерении активного сопротивления  $R$  резонансным методом фиксируют изменение добротности контура куметра, вызванное включением в него исследуемого резистора. Искомое значение затем находится расчетным путем.

Резонансный метод позволяет определить паразитные параметры сосредоточенных элементов электрических цепей, такие, как собственную (межвитковую) емкость катушки и ее добротность, собственную индуктивность и тангенс угла потерь конденсатора, а также собственную емкость (или индуктивность) резистора. Наличие этих параметров и их значения обусловлены особенностями конструкций конкретных элементов; их присутствие приводит к появлению частотных зависимостей параметров элементов.

Наличие сложной эквивалентной схемы у реальных компонентов приводит к тому, что резонансным способом измеряют действующие значения на рабочей частоте. Действующие значения индуктивности (емкости) определяются из условия равенства реактивных сопротивлений (проводимостей) реального элемента и идеальной индуктивности (емкости) на частоте измерения. Для резисторов действующее значение вводят, исходя из равенства активных



составляющих сопротивления реального и идеального элементов. Значения паразитных реактивностей катушки и конденсатора находятся по результатам измерений действующих значений их индуктивностей (емкостей) на двух частотах.

## 7.5. Метод дискретного счета

В данном методе используется аperiodический процесс, возникающий при подключении заряженного конденсатора или катушки индуктивности с протекающим в ней током к образцовому резистору. При измерении сопротивления разряд образцового конденсатора проходит через измеряемый резистор. Структурная схема измерителя емкости, реализующая метод дискретного счета, показана на рисунке 7.4.

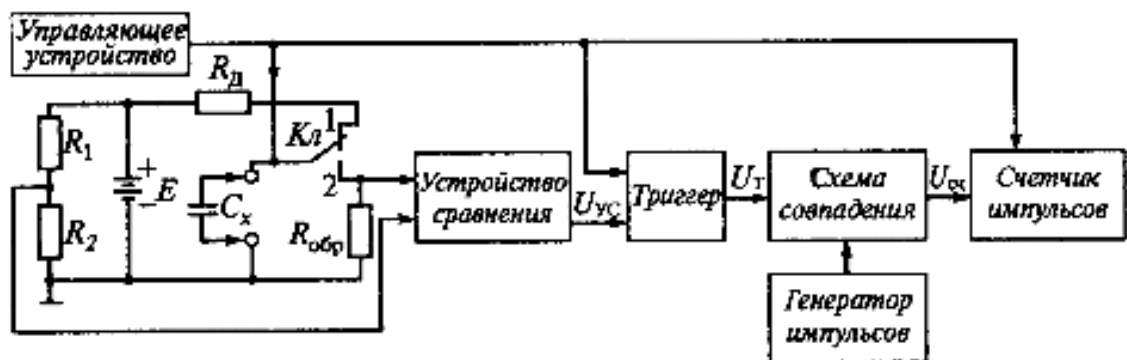


Рисунок 7.4. Структурная схема измерителя емкости с мостом переменного тока, реализующая метод дискретного счета

Перед измерением емкости ключ  $Kл$  устанавливается в положении 1 и конденсатор  $C_x$  заряжается через ограничительный резистор  $R_Д$  до значения стабилизированного источника напряжения  $E$ .

В момент начала измерения  $t_1$  (см. рис 7.5 а) управляющее устройство импульсом управления переключает триггер из состояния 0 в состояние 1, очищает предыдущие показания счетчика импульсов и переводит ключ  $Kл$  в положение 2. Конденсатор  $C_x$  начинает разряжаться через образцовый резистор  $R_{обр}$  по экспоненциальному закону (рис. 7.5 б).

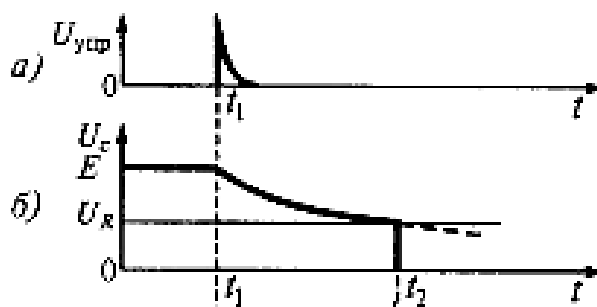


Рисунок 7.5. Временные диаграммы к схеме рисунка 7.4

В момент времени  $t_1$  единичный импульс  $U_T$  с выхода триггера открывает схему совпадения и счетчик начинает счет тактовых импульсов генератора, следующих с некоторой частотой  $f$ .

Напряжение  $U_C$  подается на один из входов устройства сравнения, ко второму входу которого подводится напряжение с резистора  $R_2$ .

Метод дискретного счета, использующий мосты переменного тока, широко применяется при создании цифровых измерителей емкостей и сопротивлений. К достоинствам метода следует отнести, прежде всего, достаточно высокую точность измерений.

Погрешность измерений цифровым методом составляет 0,1% и зависит в основном от нестабильности сопротивлений резисторов  $R_{обр}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  или конденсатора  $C_{обр}$ , нестабильности частоты генератора счетных импульсов, а также неточности срабатывания устройства сравнения.

### Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы измерений параметров элементов цепей (R, C, L) с сосредоточенными параметрами?
2. Объяснить принцип метода вольтметра и амперметра.
3. Объяснить принцип мостового метода.
4. Объяснить принцип резонансного метода.
5. Объяснить принцип метода дискретного счета.

# ГЛАВА 8

## ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

---

### 8.1. Измерение мощности в цепях постоянного тока и переменного промышленной частоты

Из выражения для мощности на постоянном токе  $P = IU$  видно, что ее можно измерить с помощью амперметра и вольтметра косвенным методом. Однако в этом случае необходимо производить одновременный отсчет по двум приборам и вычисления, усложняющие измерения и снижающие его точность.

Для измерения мощности в цепях постоянного и однофазного переменного тока применяют приборы, называемые ваттметрами, для которых используют электродинамические и ферродинамические измерительные механизмы.

Электродинамические ваттметры выпускают в виде переносных приборов высоких классов точности (0,1 - 0,5) и используют для точных измерений мощности постоянного и переменного тока на промышленной и повышенной частоте (до 5000 Гц). Ферродинамические ваттметры чаще всего встречаются в виде щитовых приборов относительно низкого класса точности (1,5 - 2,5).

Применяют такие ваттметры главным образом на переменном токе промышленной частоты. На постоянном токе они имеют значительную погрешность, обусловленную гистерезисом сердечников.

Для измерения мощности на высоких частотах применяют термоэлектрические и электронные ваттметры, представляющие собой магнитоэлектрический измерительный механизм, снабженный преобразователем активной мощности в постоянный ток. В преобразователе мощности осуществляется операция умножения  $UI = P$  и получение сигнала на выходе, зависящего от произведения  $UI$ , т. е. от мощности.

На рис. 8.1 показана возможность использования электродинамического измерительного механизма для построения ваттметра и измерения мощности.

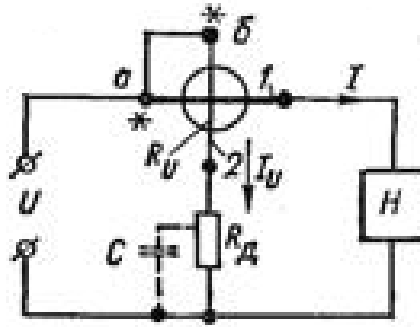


Рис. 8.1. Схема включения ваттметра

Неподвижная катушка 1, включаемая в цепь нагрузки последовательно, называется последовательной цепью ваттметра, подвижная катушка 2 (с добавочным резистором), включаемая параллельно нагрузке – параллельной цепью.

Для ваттметра, работающего на постоянном токе:

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{UI}{R_U + R_D} \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}.$$

Рассмотрим работу электродинамического ваттметра на переменном токе. Векторная диаграмма на рис. 8.2 построена для индуктивного характера нагрузки. Вектор тока параллельной цепи отстает от вектора напряжения на угол  $\gamma$  вследствие некоторой индуктивности подвижной катушки.

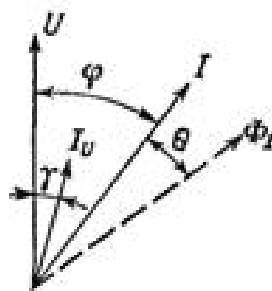


Рис. 8.2. Векторная диаграмма для индуктивного характера нагрузки

$$\alpha = SUI \cos(\varphi - \gamma) \cos \gamma$$

Из этого выражения следует, что ваттметр правильно измеряет мощность лишь в двух случаях: при  $\gamma = 0$  и  $\gamma = \varphi$ .

Условие  $\gamma = 0$  может быть достигнуто созданием резонанса напряжений в параллельной цепи, например включением конденсатора  $C$  соответствующей емкости, как это показано штриховой линией на рис. 8.1. Однако резонанс напряжений будет лишь при некоторой определенной частоте. С изменением частоты условие  $\gamma = 0$  нарушается. При  $\gamma \neq 0$  ваттметр измеряет мощность с погрешностью  $\beta_\gamma$ , которая носит название угловой погрешности.

При малом значении угла  $\gamma$  ( $\gamma$  обычно составляет не более 40 - 50'), относительная погрешность

$$\beta_\gamma = \frac{UI \cos(\varphi - \gamma) \cos \gamma - UI \cos \varphi}{UI \cos \varphi} \approx \gamma \operatorname{tg} \varphi$$

При углах  $\varphi$ , близких к  $90^\circ$ , угловая погрешность может достигать больших значений.

Второй, специфической, погрешностью ваттметров является погрешность, обусловленная потреблением мощности его катушками.

При измерении мощности, потребляемой нагрузкой, возможны две схемы включения ваттметра, отличающиеся включением его параллельной цепи (рис. 8.3).

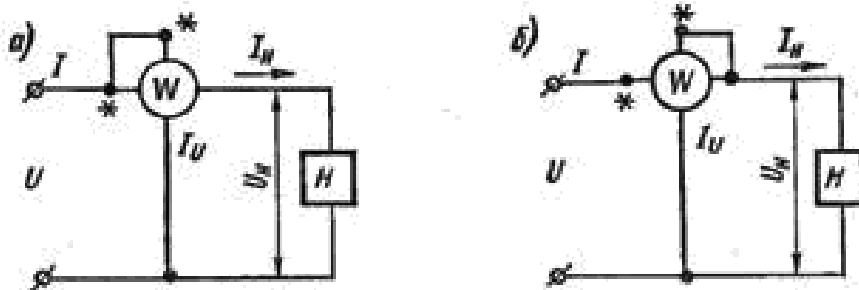


Рис. 8.3. Схемы включения параллельной обмотки ваттметра

Если не учитывать фазовых сдвигов между токами и напряжениями в катушках и считать нагрузку  $H$  чисто активной, погрешности  $\beta(a)$  и  $\beta(б)$ , обусловленные потреблением мощности катушками ваттметра, для схем (рис. 8.3):

$$\beta(a) = \frac{UI_H - U_H I_H}{U_H I_H} = \frac{P_I}{P_H};$$

$$\beta(б) = \frac{U_H (I_U + I_H) - U_H I_H}{U_H I_H} = \frac{P_U}{P_H},$$

где  $P_I$  и  $P_U$  – соответственно мощность, потребляемая последовательной и параллельной цепью ваттметра.

Из формул для  $\beta(a)$  и  $\beta(b)$  видно, что погрешности могут иметь заметные значения лишь при измерениях мощности в маломощных цепях, т. е. когда  $P_I$  и  $P_U$  соизмеримы с  $P_H$ .

Если поменять знак только одного из токов, то изменится направление отклонения подвижной части ваттметра.

У ваттметра имеются две пары зажимов (последовательной и параллельной цепей), и в зависимости от их включения в цепь направление отклонения указателя может быть различным. Для правильного включения ваттметра один из каждой пары зажимов обозначается знаком «\*» (звездочка) и называется «генераторным зажимом».

## 8.2. Измерение мощности с использованием эффекта Холла

Перемножение значений силы тока и разности потенциалов при измерении мощности можно получить, используя полупроводниковые преобразователи Холла.

Если специальную полупроводниковую пластину, по которой течет ток  $I$  (рис. 8.4), возбуждаемый электрическим полем напряженностью  $E$ , поместить в магнитное поле с напряженностью  $H$  (индукцией  $B$ ), то между ее точками, лежащими на прямой, перпендикулярной направлениям протекающего тока  $I$  и магнитного поля, возникает разность потенциалов (эффект Холла), определяемая как

$$U_x = kEH,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

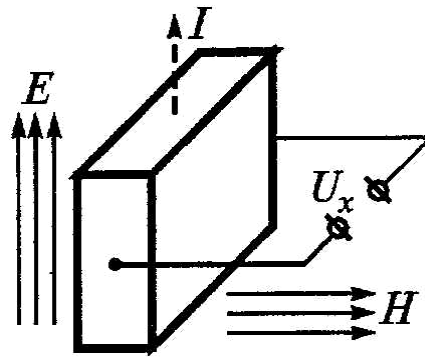


Рис. 8.4. Устройство преобразователя Холла

Согласно теореме Умова-Пойнтинга, плотность потока проходящей мощности СВЧ-колебаний в некоторой точке поля определяется векторным произведением электрической и магнитной напряженностей этого поля:

$$\Pi = [E \cdot H]$$

Отсюда, если ток  $I$  будет функцией электрической напряженности  $E$ , то с помощью датчика Холла можно получить следующую зависимость напряжения от проходящей мощности:

$$U_x = gP,$$

где  $g$  – постоянный коэффициент, характеризующий образец. Для измерения такой мощности пластину полупроводника (пластинку Холла – ПХ) помещают в волновод, как показано (рис. 8.5).

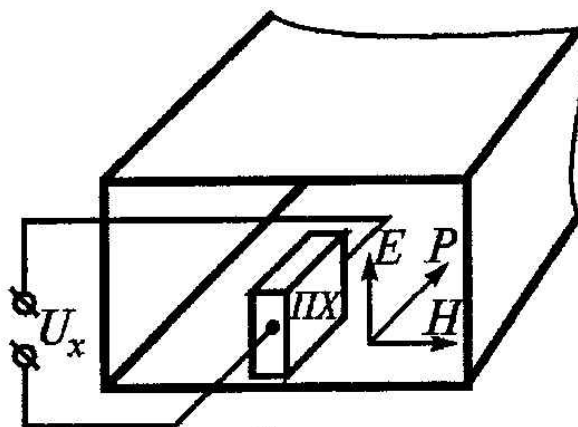


Рис. 8.5. Устройство преобразователя Холла с применением волновода

Рассмотренный измеритель проходящей мощности обладает следующими достоинствами:

- 1) может работать при любой нагрузке, а не только при согласованной;
- 2) высокое быстродействие ваттметра дает возможность применять его при измерении импульсной мощности.

Однако практическая реализация ваттметров на эффекте Холла – достаточно сложная задача в силу многих факторов. Тем не менее, существуют ваттметры, измеряющие проходящую импульсную мощность до 100 кВт с погрешностью не более 10 %.

### **8.3. Методы измерения мощности на высоких и сверхвысоких частотах**

Мощность в общем виде есть физическая величина, которая определяется работой, производимой в единицу времени. Единица мощности – ватт (Вт) – соответствует мощности, при которой за одну секунду выполняется работа в один джоуль (Дж).

На постоянном токе и переменном токе низкой частоты непосредственное измерение мощности зачастую заменяется измерением действующего значения электрического напряжения на нагрузке  $U$ , действующего значения тока, протекающего через нагрузку  $I$ , и угла сдвига фаз между током и напряжением  $\varphi$ . При этом мощность определяют выражением:

$$P = UI \cos \varphi .$$

В СВЧ диапазоне измерение напряжения и тока становится затруднительным. Соизмеримость размеров входных цепей измерительных устройств с длиной волны  $\lambda$  является одной из причин неоднозначности измерения напряжения и тока.

Измерения сопровождаются значительными частотными погрешностями. Следует добавить, что измерение напряжения и тока в волноводных трактах при некоторых типах волн теряет практический смысл, так как продольная составляющая в проводнике отсутствует, а разность потенциалов между концами любого диаметра сечения волновода равна нулю. Поэтому на частотах, начиная с десятков мегагерц, предпочтительным и более точным становится



непосредственное измерение мощности, а на частотах свыше 1000 МГц – это единственный вид измерений, однозначно характеризующий интенсивность электромагнитных колебаний.

Для непосредственного измерения мощности СВЧ применяют методы, основанные на фундаментальных физических законах, включающие метод прямого измерения основных величин: массы, длины и времени.

Несмотря на разнообразие методов измерения СВЧ мощности, все они сводятся к преобразованию энергии электромагнитных СВЧ колебаний в другой вид энергии, доступной для измерения: тепловую, механическую и т. д. Среди приборов для измерения СВЧ мощности наибольшее распространение получили ваттметры, основанные на тепловых методах. Используют также ряд других методов – пондеромоторный, зондовый и другие.

Принцип действия подавляющего большинства измерителей мощности СВЧ, называемых ваттметрами, основан на измерении изменений температуры или сопротивления элементов, в которых рассеивается энергия исследуемых электромагнитных колебаний. К приборам, основанным на этом явлении, относятся калориметрические и терморезисторные измерители мощности. Получили распространение ваттметры, использующие пондеромоторные явления (электромеханические силы), и ваттметры, работающие на эффекте Холла. Особенность первых из них – возможность абсолютных измерений мощности, а вторых – измерение мощности независимо от согласования ВЧ-тракта.

По способу включения в передающий тракт различают ваттметры проходящего типа и поглощающего типа. Ваттметр проходящего типа представляет собой четырехполюсник, в котором поглощается лишь небольшая часть общей мощности. Ваттметр поглощающего типа, представляющий собой двухполюсник, подключается на конце передающей линии, и в идеальном случае в нем поглощается вся мощность падающей волны. Ваттметр проходящего типа часто выполняется на основе измерителя поглощающего типа, включенного в тракт через направленный ответвитель.

Калориметрические методы измерения мощности основаны на преобразовании электромагнитной энергии в тепловую в сопротивлении нагрузки, являющейся составной частью измерителя. Количество выделяемого тепла определяется по данным изменения температуры в нагрузке или в среде, куда передано тепло. Различают калориметры

статические (адиабатические) и поточные (неадиабатические). В первых мощность СВЧ рассеивается в термоизолированной нагрузке, а во вторых предусмотрено непрерывное протекание калориметрической жидкости. Калориметрические измерители позволяют измерять мощность от единиц милливатт до сотен киловатт. Статические калориметры измеряют малый и средний уровни мощности, а поточные – средние и большие значения мощности

Условие баланса тепла в калориметрической нагрузке имеет вид:

$$P = k(T - T_0) + cm \frac{dT}{dt},$$

где  $P$  – мощность СВЧ, рассеиваемая в нагрузке;  $T$  и  $T_0$  – температура нагрузки и окружающей среды соответственно;  $c$ ,  $m$  – удельная теплоемкость и масса калориметрического тела;  $k$  – коэффициент теплового рассеяния. Решение уравнения представляется в виде

$$T = \frac{P}{k} \cdot [1 - \exp(-t/\tau)] + T_0,$$

где  $\tau = \frac{cm}{k}$  – тепловая постоянная времени.

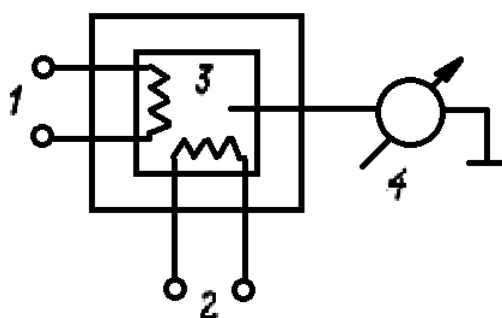
В случае статического калориметра время измерения много меньше постоянной  $\tau$  и мощность СВЧ равна:

$$P = cm \frac{dT}{dt}.$$

Основными элементами статических калориметров являются термоизолированная нагрузка и прибор для измерения температуры. Нетрудно рассчитать поглощаемую мощность СВЧ по измеренной скорости повышения температуры и известной теплоемкости нагрузки.

В приборах используются различные высокочастотные оконечные нагрузки из твердого или жидкого диэлектрического материала с потерями, а также в виде пластинки или пленки высокого сопротивления. Для определения изменения температуры применяют терморпары и различные термометры.

Рассмотрим статический калориметр, в котором снижены требования к термоизоляции и отпадает необходимость в определении теплоемкости калориметрической насадки (рис. 8.6). В этой схеме используется метод замещения. В ней для калибровки прибора 4, измеряющего повышение температуры при рассеянии измеряемой мощности, подводимой к плечу 1, используется известная мощность постоянного тока или тока низкой частоты, подводимая к плечу 2. Предполагается, что температура насадки 3 изменяется одинаково при рассеянии равных значений мощности СВЧ и постоянного тока. Статические калориметры позволяют измерять мощность несколько милливольт с погрешностью менее  $\pm 1\%$ .



*Рис. 8.6. Устройство статического калориметра*

Основными элементами поточного калориметра являются: нагрузка, где энергия электромагнитных колебаний превращается в тепло, система циркуляции жидкости и средства для измерения разности температур входящей и выходящей жидкости, протекающей через нагрузку.

Поточные калориметры различают по типу циркуляционной системы (открытые и замкнутые), по типу нагрева (прямой и косвенный) и по методу измерения (истинно калориметрические и замещения).

В калориметрах открытого типа обычно применяют воду, которая из водопроводной сети поступает сначала в бак для стабилизации давления, а далее в калориметр. В калориметрах замкнутого типа калориметрическая жидкость циркулирует в замкнутой системе. Она постоянно накачивается насосом и охлаждается до температуры окружающей среды перед очередным поступлением в калориметр. В этой системе используются в качестве охлаждающих жидкостей кроме дистиллированной воды раствор хлористого натрия, смесь воды с этиленгликолем или глицерином.

При прямом нагреве ВЧ-мощность поглощается непосредственно циркулирующей жидкостью. При косвенном нагреве циркулирующая

жидкость используется только для отбора тепла от нагрузки. Косвенный нагрев позволяет работать в более широком диапазоне частот и мощностей, поскольку функции переноса тепла отделены в нем от функции поглощения ВЧ-энергии и согласования нагрузки.

Схема истинно калориметрического метода представлена на рис. 8.7. Измеряемая ВЧ-мощность рассеивается в нагрузке 1 и прямо или косвенно передает энергию протекающей жидкости. Разность температур входящей в нагрузку и выходящей из нее жидкости измеряют с помощью термоблоков 2. Количество жидкости, протекающее в системе в единицу времени, измеряют расходомером 3. Естественно, что поток жидкости при таких измерениях должен быть постоянным

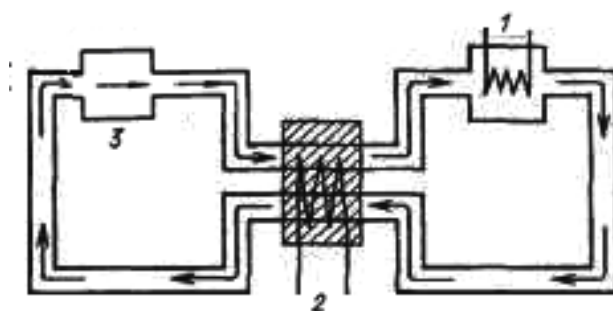


Рис. 8.7. Схема истинно калориметрического метода

Погрешности измерений ВЧ-мощности в рассмотренной схеме связаны с рядом факторов. Неравномерность скорости течения калориметрической жидкости, появление пузырьков воздуха приводят к погрешности при определении скорости потока жидкости и изменению ее эффективной теплоемкости. Для уменьшения этой погрешности применяют ловители пузырьков воздуха и добиваются равномерности течения жидкости с помощью регулятора потока и других средств.

Схема измерений, реализующая метод замещения, отличается от рассмотренной тем, что в ней последовательно с СВЧ-нагрузкой вводится дополнительный нагревательный элемент, рассеивающий мощность низкочастотного источника тока. Заметим, что при косвенном нагреве мощность СВЧ-сигнала и мощность низкочастотного тока вводятся в одну и ту же нагрузку и потребность в дополнительном нагревательном элементе отпадает.

Возможны два способа измерений по методу замещений – калибровки и баланса. Первый из них состоит в измерении такой мощности низкой частоты, поданной в нагревательный элемент, при которой разность температур жидкости на входе и выходе такая же, как

и при подаче СВЧ-мощности. При балансном способе сначала устанавливается какая-либо разность температур жидкости при подаче мощности низкой частоты, затем подается измеряемая ВЧ-мощность, а мощность низкой частоты уменьшается до такого значения, чтобы разность температур осталась прежней.

Рассмотренные поточные калориметры применяют для абсолютных измерений прежде всего больших уровней мощностей. В сочетании с калиброванными направленными ответвителями они служат для градуировки измерителей средней и малой мощности. Имеются конструкции поточных калориметров и для непосредственных измерений средних и малых мощностей. Время измерений не превышает нескольких минут, а погрешность измерений может быть доведена до 1 - 2%.

Среди калориметрических ваттметров для измерения мощности непрерывных колебаний, а также среднего значения мощности импульсно-модулированных колебаний отметим приборы МЗ-11А, МЗ-13 и МЗ-13/1, которые перекрывают диапазон измеряемых мощностей от 2 кВт до 3 МВт на частотах до 37,5 ГГц.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите основные методы измерения мощности.
2. В чем заключается принцип калориметрического метода измерения мощности?
3. Расскажите про методы измерения мощности на высоких и сверхвысоких частотах.
4. Расскажите, как устроен калориметр, в котором используется метод сравнения мощности СВЧ и постоянного тока.

# ГЛАВА 9

## ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ

---

### 9.1. Определения. Методы измерения

Напряжение гармонического колебания, как известно, имеет вид:

$$u = U \cos \Phi = U \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где  $U$  – амплитуда,  $\Phi$  – фаза колебания,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота и  $\varphi_0$  – начальная фаза колебания.

Частота в момент времени  $t$  является производной фазы по времени

$$\omega = \frac{d\Phi}{dt}$$

и называется мгновенной частотой.

Измерение выполняется в течение некоторого интервала времени  $\tau_n$ , на протяжении которого измеряемая частота усредняется. Следовательно, значение частоты, полученное в результате измерения, всегда является усредненной величиной.

Частотой колебаний называется число колебаний в единицу времени:

$$f = \frac{n}{t},$$

где  $t$  – интервал времени существования  $n$  колебаний.

Единица частоты «герц» (Гц) определяется как одно колебание в одну секунду. Частота и время неразрывно связаны между собой, поэтому измерение величины одной из них можно заменить измерением другой.

В международной системе единиц СИ время принято за одну из шести основных физических величин.

Частота электромагнитных колебаний связана с периодом колебания и длиной однородной плоской волны в свободном пространстве следующими соотношениями:  $fT = 1$  и  $f\lambda = c$ , где  $c$  – скорость света. Скорость света в свободном пространстве  $c = 3 \cdot 10^5$  км/с, однако в воздухе по данным измерений на многих частотах скорость распространения электромагнитных колебаний меньше. Рекомендуется принимать значение  $c_{\text{возд}} = 299792,5 \pm 0,3$  км/с.

Спектр частот электрических колебаний, используемых в радиотехнике, простирается от долей герца до тысяч гигагерц. Этот спектр разделяется на два диапазона – низких и высоких частот. К низким частотам относят инфразвуковые (ниже 20 Гц) и звуковые (от 20 до 2000 Гц). Высокочастотный диапазон разделяют на высокие частоты (от 20 кГц до 30 МГц), ультравысокие (от 30 до 300 МГц) и сверхвысокие (выше 300 МГц).

Такое разделение объясняется различными физическими свойствами электрических колебаний в указанных участках спектра, разными способами их получения и особенностями передачи на расстояние.

Международный консультативный комитет по радио (МККР) в 1959 г. принял решение об упорядочении наименований в спектре частот, применяемом для радиосвязи, радиовещания и телевидения (табл. 9.1).

Таблица 9.1  
Классификация спектров частот

Номер полосы	Диапазон частот (исключая нижний предел, включая верхний предел)	Диапазон волн	Соответв. метрическое подраздел-е волн	Сокращенное обозначение	
				по частотам	по длинам волн
4	От 3 до 30 кГц	От 100 до 10 км	Мериаметровые	ОНЧ (VLF) – очень низкие частоты	СДВ – сверхдлинны е волны
5	От 30 до 300 кГц	От 10 до 1 км	Километровые	НЧ (LF) – низкие частоты	ДВ – длинные волны

Продолжение табл. 9.1.

6	От 300 до 3000 кГц	От 1000 до 100 м	Гектометровые	СЧ ( <i>MF</i> ) – средние частоты	СВ – средние волны
7	От 3 до 30 МГц	От 100 до 10 м	Декаметровые	ВЧ ( <i>HF</i> ) – высокие частоты	КВ – короткие волны
8	От 30 до 300 МГц	От 10 до 1 м	Метровые	ОВЧ ( <i>VHF</i> ) – очень высокие частоты	УКВ – ультракороткие волны
9	От 300 до 3000 МГц	От 100 до 10 см	Дециметровые	УВЧ ( <i>UHF</i> ) – ультра-высокие частоты	ДЦВМ – дециметровые волны
10	От 3 до 30 ГГц	От 10 до 1 см	Сантиметровые	СВЧ ( <i>SHF</i> ) – сверх-высокие частоты	СМВ – сантиметровые волны
11	От 30 до 300 ГГц	От 10 до 1 мм	Миллиметровые	КВЧ ( <i>EHF</i> ) – крайне-высокие частоты	ММВ – миллиметровые частоты
12	От 300 до 3000 ГГц	От 1 до 0,1 мм	Децимиллиметровые	-	-

В зависимости от участка спектра применяют различные методы измерения.

## 9.2. Метод перезарядки конденсатора

Допустим, что конденсатор, емкость которого  $C$ , соединяется то с источником напряжения для заряда, то с магнитоэлектрическим амперметром для разряда; скорость этих переключений составляет  $f$  раз в секунду. Если конденсатор заряжается до некоторого напряжения  $U$ , то количество электричества, проходящее через амперметр при разряде,  $fq = fCU = I$ , где  $I$  – среднее значение тока за время разряда. Отсюда

$$f = \frac{I}{CU}, \quad (9.1)$$



т.е. частота прямо пропорциональна току, протекающему через амперметр, и его шкалу можно проградуировать в единицах частоты при условии постоянства величины знаменателя в формуле (9.1). Этот метод использован в простых и удобных прямопоказывающих, так называемых конденсаторных частотомерах. Структурная схема (рис. 9.1) такого частотомера состоит из входного каскада (обычно катодного повторителя), усилителя, ограничителя и счетной схемы.

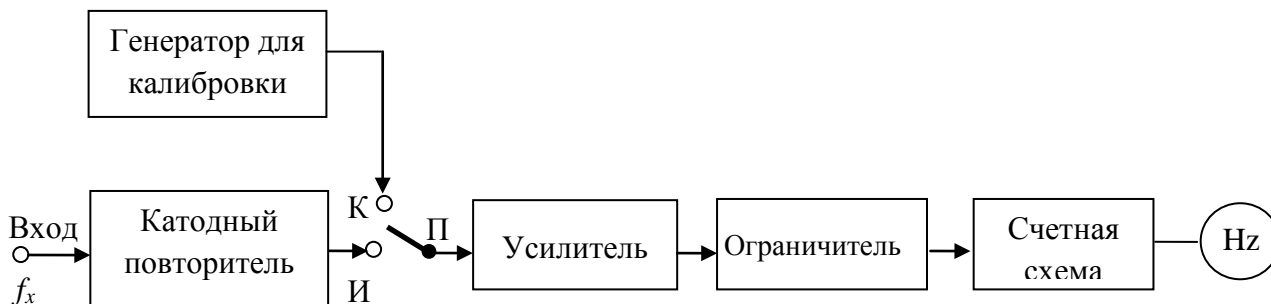


Рис. 9.1. Структурная схема конденсаторного частотомера

На вход усилителя поступает напряжение измеряемой частоты, которое после ограничения приобретает форму меандра. Это напряжение управляет счетной схемой, состоящей (рис. 9.2) из электронного коммутатора, работающего на транзисторе  $T$ , набора конденсаторов  $C$  и магнитоэлектрического микроамперметра. Прямоугольное напряжение, поступающее на транзистор  $T$ , открывает и закрывает последний, благодаря чему происходит перезаряд конденсатора за каждый период колебаний измеряемой частоты. Микроамперметр фиксирует величину зарядного тока, пропорциональную измеряемой частоте. Переключение конденсаторов  $C$  обеспечивает соответствующее число поддиапазонов измерения.

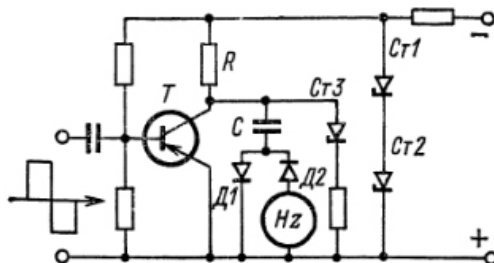


Рис. 9.2. Счетная схема частотомера

Значение напряжения  $U$  в формуле (9.2), до которого заряжается один из конденсаторов, при разных значениях емкости и измеряемой

частоты не сохраняется постоянным, и потому градуировка шкалы индикатора частотомера нарушается. Для устранения этого явления в счетной схеме (рис 9.2) предусмотрена стабилизация напряжения, до которого может быть заряжен любой конденсатор при любой частоте. Стабилизация осуществляется стабилитроном  $C_{T3}$ . Общее напряжение питания стабилизируется при помощи стабилитронов  $C_T 1$  и  $C_T 2$ .

### 9.3. Резонансный метод

Резонансный метод измерения частоты пригоден для любых частот, на которых можно обнаружить явление электрического резонанса. Структурная схема реализации этого метода приведена на рис. 9.3. Источник напряжения измеряемой частоты  $f_x$ ; момент резонанса фиксируется по индикатору  $I$ , а измеряемая частота или длина волны определяется по шкале механизма настройки измерительного контура. Резонансный метод применяется только на высоких частотах – от 50 кГц и выше, так как на низких измерительный контур слишком громоздок.



Рис. 9.3. К измерению частоты резонансным методом

Погрешность измерения резонансным методом зависит от многих параметров и характеристик, главные из которых следующие: значение добротности измерительного контура, точность его настройки в резонанс, температура и влажность окружающего воздуха, точность градуировки шкалы механизма настройки и отсчета по ней, ширина диапазона измеряемых частот.

#### 9.3.1. Резонансные частотомеры с сосредоточенными параметрами.

В диапазоне частот от 50 до 200 МГц измерительный колебательный контур представляет собою образцовый конденсатор переменной емкости, к которому присоединяют одну из сменных катушек индуктивности (рис. 9.4), такая конструкция обеспечивает довольно широкий общий диапазон измеряемых частот при

сравнительно узких частых поддиапазонах, например диапазон 50 кГц – 50 МГц при 6 сменных катушках.

Для измерения частоты в диапазоне от 200 до 1000 МГц используют измерительный колебательный контур смешанного типа: емкость сосредоточенная, индуктивность рассредоточенная. Такая конструкция обеспечивает перекрытие значительного диапазона частот без механического переключения элементов контура.

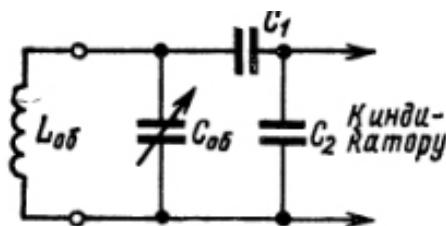


Рис. 9.4. Схема резонансного частотомера с сосредоточенными параметрами

### 9.3.2. Резонансные частотомеры с распределенными параметрами

Колебательный контур частотомера в зависимости от диапазона измеряемых частот выполняют либо в виде отрезка коаксиальной линии, либо в виде объемного резонатора.

Коаксиальную линию настраивают в резонанс изменением длины ее внутреннего проводника, объемный резонатор – изменением его внутреннего объема. Точные механизмы настройки градуируют в безразмерных делениях с большим числом отсчетных точек. Для определения измеряемой частоты к каждому частотомеру прилагают индивидуальные градуировочные таблицы. Некоторые частотомеры градуируют непосредственно в единицах частоты или длины волны.

*Полуволновый резонансный частотомер.* Колебательный контур полуволнового частотомера представляет собою закороченный отрезок коаксиальной линии, длина которого изменяется перемещением поршня П (рис. 9.5).

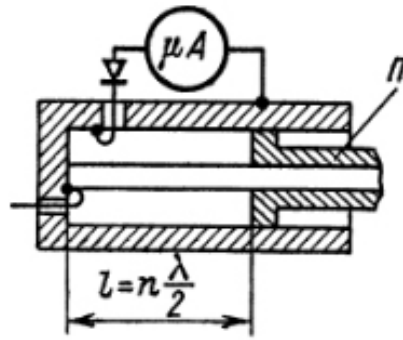


Рис. 9.5. Схема полуволнового частотомера

Резонанс наступает каждый раз, когда длина отрезка линии становится приблизительно равной половине длины волны измеряемого колебания:

$$l \approx n \frac{\lambda}{2}.$$

Полуволновые резонансные частотомеры применяют в диапазоне частот 2,5 - 10 ГГц. Добротность таких частотомеров составляет 1000 - 2000 единиц, что в сочетании с хорошим микрометрическим отсчетным устройством обеспечивает погрешность от  $5 \cdot 10^{-4}$  до  $5 \cdot 10^{-3}$ .

*Четвертьволновый резонансный частотомер.* Колебательный контур этого частотомера выполнен в виде разомкнутого отрезка коаксиальной линии (рис. 9.6).

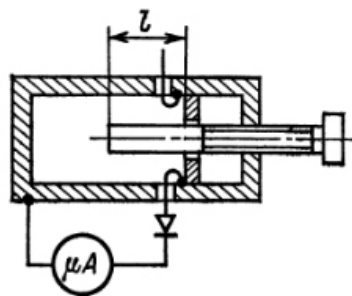


Рис. 9.6. Схема четвертьволнового частотомера

Настройка его осуществляется изменением длины  $l$ , равной нечетному числу четвертей волн измеряемого колебания:

$$l \approx (2n + 1) \frac{\lambda}{4},$$

где  $n$  – целое число; измерением длины внутреннего проводника при двух соседних резонансах можно найти значение половины длины волны:

$$l_2 - l_1 = [2(n + 1) + 1] \frac{\lambda}{4} - (2n + 1) \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{2}$$

Четвертьволновые частотомеры применяются на частотах от 600 до 10 000 МГц. Погрешность измерения частоты лежит в пределах от  $5 \cdot 10^{-4}$  до  $5 \cdot 10^{-3}$ .

*Резонансный частотомер с нагруженной линией.* Полуволновые и четвертьволновые частотомеры имеют малое перекрытие диапазона измеряемых частот (1,3 - 1,5). Для расширения разомкнутая коаксиальная линия нагружается емкостью, образуемой торцами внутреннего и наружного проводников (рис. 9.7).

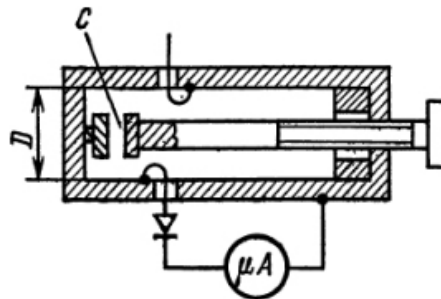


Рис. 9.7. Схема частотомера с нагруженной линией

Резонанс в нагруженной линии наступает при выполнении условия

$$\frac{1}{\omega C} = \rho \operatorname{tg} \beta l = 138 \operatorname{tg} 2\pi \frac{l}{\lambda},$$

где  $D$  – внутренний диаметр наружного проводника,  $d$  – внешний диаметр внутреннего проводника. При настройке такой линии одновременно изменяются и ее длина, и емкость нагрузки, вследствие чего перекрытие возрастает до 3 и даже 4. Двумя частотомерами с нагруженной линией перекрывается диапазон частот от 150 до 1500 МГц. Измеряемую частоту определяют при помощи градуировочных таблиц или графиков. Погрешность измерения равно  $5 \cdot 10^{-3}$ .

*Резонансные частотомеры с объемными резонаторами.* Представляют собой замкнутые полости, ограниченные металлическими стенками. Внутри полости образуются стоячие волны

электромагнитного поля, длина которых зависит от типа возбуждаемой волны и от геометрических размеров полости.

В зависимости от способа введения в полость резонатора возбуждающего электромагнитного поля в ней возникают колебания различных типов.

Для уменьшения погрешности измерения повышают добротность резонаторов. Добротность достигает 10 000 - 30 000 единиц.

#### 9.4. Метод сравнения

Метод сравнения является нулевым и дифференциальным методом измерения частоты и обеспечивает высокую точность результатов измерений практически в любом диапазоне частот. Электрические колебания неизвестной частоты и другой частоты, принимаемой за образцовую, смешивают таким образом, чтобы между ними возникли биения с некоторой частотой

$$F_{\sigma} = f_{o\sigma} - f_x. \quad (9.2)$$

Измерив частоту биений  $F_{\sigma}$  и зная значение образцовой частоты, вычисляют неизвестную частоту

$$f_x = f_{o\sigma} - F_{\sigma}. \quad (9.3)$$

В более общем виде формулу (1.3) можно представить так:

$$F_{\sigma} = \frac{nf_{o\sigma} - mf_x}{m},$$

где  $n$  и  $m = 1, 2, 3, \dots$ ;  $\frac{n}{m} = \frac{f_x}{f_{o\sigma}}$ , при этом

$$f_x = \frac{n}{m} f_{o\sigma} - F_{\sigma}. \quad (9.4)$$

При частоте  $F_{\sigma}$ , равной нулю, неизвестную частоту определяют из условия ее равенства или известной кратности образцовой частоте.

Таким образом, для измерения неизвестной частоты методом сравнения необходимо иметь источник образцовых частот (меру частоты), частотный смеситель для получения биений и индикатор равенства или кратности частот. Применяют линейные и нелинейные частотные смесители. Первые не изменяют спектра измеряемых сигналов; на выходе вторых в зависимости от вида их характеристики возникает тот или иной спектр результирующих колебаний, обязательно включающий в себя разностную частоту – частоту биений. В зависимости от вида смешения электрических колебаний измерение частоты методом сравнения осуществляют осциллографическим способом или способом нулевых биений (гетеродинным способом).

Для определения неизвестной частоты осциллографическим способом при синусоидальной развертке напряжение образцовой частоты подают на вход усилителя горизонтального отклонения, а напряжение неизвестной частоты – на вход усилителя вертикального отклонения. Внутренний генератор развертки осциллографа включают. Изменяя образцовую частоту, получают неподвижную или медленно перемещающуюся по экрану осциллографа фигуру Лиссажу. Неподвижной она будет всякий раз, когда образцовая частота (или ее гармоника) будет равна или кратна неизвестной частоте (или ее гармонике). Скорость вращения, или период повторения формы, движущейся осциллограммы является мерой неравенства частот – периодом биений  $T_{\sigma} = \frac{1}{F_{\sigma}}$ .

Погрешность измерений осциллографическим способом при синусоидальной развертке зависит от погрешностей секундомера и от погрешности отсчета момента начала (или конца) периода биений.

Для определения неизвестной частоты методом сравнений при круговой (эллиптической) развертке напряжение образцовой частоты подают через фазорасщепляющую цепь на входы  $Y$  и  $X$  осциллографа в виде двух напряжений, сдвинутых относительно друг друга на  $90^{\circ}$ , благодаря чему на экране осциллографа возникает линия развертки в виде окружности или эллипса. Время одного оборота этой фигуры равно периоду образцовой частоты. Напряжение неизвестной частоты подают в канал  $Z$  осциллографа для модуляции линии развертки по яркости.

Если частоты  $f_x$  и  $f_{об}$  равны друг другу, то половина окружности будет темной, а половина светлой. Если же  $f_x > f_{об}$ , то на окружности появятся темные и светлые участки, окружность становится штриховой. Число темных и светлых штрихов  $n$  равно кратности неизвестной

частоты относительно образцовой:  $n = \frac{f_x}{f_{об}}$ , откуда  $f_x = nf_{об}$ .

Осциллограмма неподвижна только в случае точного равенства или точной кратности частот, в противном случае она вращается, и время, за которое один штрих сместится на один период развертки, т.е. опишет один оборот, является периодом биений.

Способ нулевых биений применяют для сравнения высоких частот. Два высокочастотных колебания  $u_1 = U_1 \cos \omega_1 t$  и  $u_2 = U_2 \cos \omega_2 t$  подают на нелинейный элемент – детектор или смеситель. На выходе его появляется результирующее напряжение, в математическом выражении которого имеется слагаемое вида  $U_1 U_2 \cos \omega_1 t \cos \omega_2 t$ ; следовательно на нагрузке смесителя образуется в числе многих частот сумма  $f_1 + f_2$  и их разность  $f_1 - f_2$  или  $f_2 - f_1$ . Эта разность двух высоких частот является частотой биения  $F_б = |f_1 - f_2|$ . При равенстве частот  $f_1$  и  $f_2$  частота биений равно нулю, поэтому способ называется способом нулевых биений.

Частоту биений  $F_б$  можно измерить конденсаторным частотомером или получить, сравнив ее с частотой вспомогательного генератора звуковых частот, способом акустических биений или осциллографическим способом.

На практике часто используют генераторы образцовой частоты, которые вырабатывают одну сравнительно низкую частоту и ее гармоники. Если неизвестная частота находится между двумя соседними гармониками, то для ее определения применяется *способ прямой интерполяции*. Он заключается в последовательной настройке частоты интерполяционного генератора  $\Gamma_u$  на нулевые биения с измеряемой частотой  $f_x$  и с соседними гармониками образцовых частот  $nf_{об}$  и  $(n+1)f_{об}$ . Обозначив соответствующие отсчеты по шкале интерполяционного генератора через  $\alpha_1$ ,  $\alpha_x$  и  $\alpha_2$  согласно рис. 9.8, можно написать следующее равенство:

$$\frac{f_x - nf_{об}}{\alpha_x - \alpha_1} = \frac{(n+1)f_{об} - nf_{об}}{\alpha_2 - \alpha_1},$$

откуда

$$f_x = nf_{об} + \frac{\alpha_x - \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} f_{об}.$$



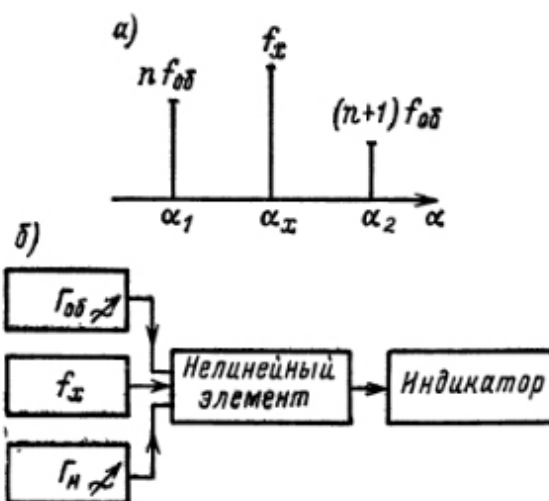


Рис.9.8. Схема прямой интерполяции

Точность способа прямой интерполяции тем выше, тем меньше разница между частотами соседних гармоник образцовой частоты, чем ближе к линейной шкала его настройки и чем выше ее разрешающая способность.

## 9.5. Метод дискретного счета

Переменное напряжение частоты  $f_x$  легко преобразовать в короткие импульсы, частота следования которых остается равной  $f_x$ . Если сосчитать число импульсов  $N$  за известный промежуток времени  $\tau$ , то легко определить искомую частоту

$$f_x = \frac{N}{\tau}. \quad (9.5)$$

В частности, если  $\tau = 1$  с, то измеренное количество импульсов  $N$  численно равно неизвестной частоте  $f_x$ . Эта идея является основой метода измерения частоты дискретным счетом. Приборы, созданные на основе этого метода, называются электронно-счетными частотомерами.

Упрощенная структурная схема электронно-счетного частотомера показана на рис. 9.9. Входное устройство состоит из делителя напряжения и широкополосного усилителя, при помощи которого устанавливается значение напряжения, необходимое для нормальной работы формирующего устройства, а так же устанавливает сопротивление и соответствующую форму частотной характеристики.

Формирующее устройство служит для преобразования непрерывного переменного напряжения в последовательность импульсов определенной формы и величины.

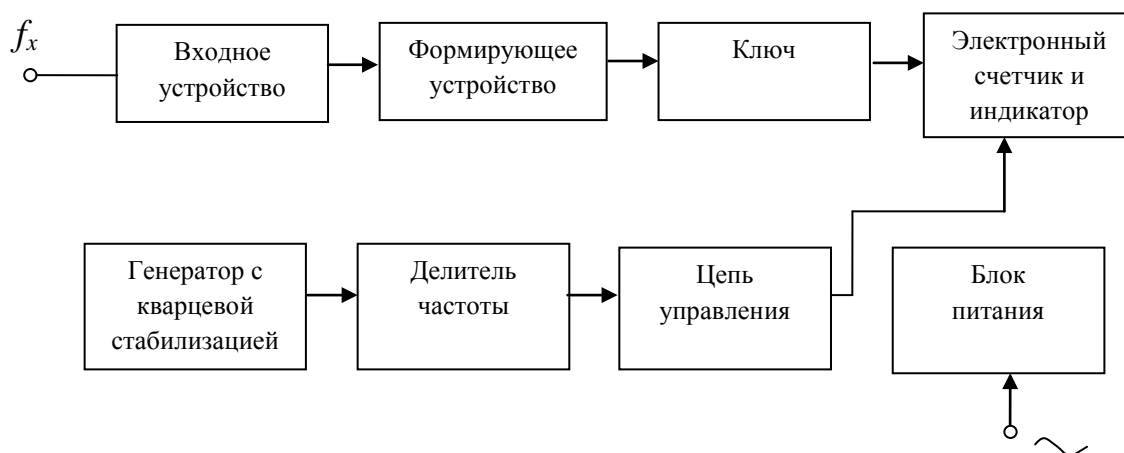


Рис.9.9. Упрощенная структурная схема электронно-счетного частотомера

Ключ предназначен для пропускания импульсов на счетчик в течении известного интервала времени – времени счета.

При большом числе сосчитанных импульсов точность измерения увеличивается.

Максимальная относительная погрешность измерения частоты

$$\delta = \delta_{кв} + \frac{1}{N} = \delta_{кв} + \frac{1}{f_x \tau}.$$

При измерении низких частот число импульсов  $N$  невелико и ошибка может быть значительной, увеличивать же время измерения нецелесообразно, поэтому вместо измерения частоты измеряют период. Принцип измерения периода аналогичен рассмотренному принципу измерения частоты, с той разницей, что ключ открывается импульсом, формируемым из напряжения измеряемого периода, а считываются импульсы, полученные из напряжения опорного генератора.

## 9.6. Меры частоты

Мерой частоты называется устройство, предназначенное для воспроизведения и хранения единицы частоты – герца. Мера частоты, при помощи которой обеспечивается воспроизведение и хранение

единицы частоты с наивысшей, достигнутой на современном уровне техники точностью, называется эталоном частоты.

Под воспроизведением понимают точность, с которой будет получаться одна и та же частота при каждом включении данной меры или при переходе от образца к образцу мер данного типа. Хранением частоты называют совокупность средств и действий, обеспечивающих возможность получения значения частоты в любой момент времени.

Эталон частоты, предназначенный для воспроизведения и хранения единицы частоты – герца, в общегосударственном масштабе в соответствии с теоретическим определением называют первичным эталоном частоты. Вторичным эталоном частоты называют эталон, действительное значение частоты которого определяют путем сличения с первичным эталоном частоты с метрологической точностью.

Секунда всемирного времени (TU), вычисляемая с помощью кварцевых генераторов, равна 1/86400 средних солнечных суток на меридиане Гринвича.

Эфемеридное время (ET) – в качестве абсолютного эталона времени принят тропический год, т.е. период обращения Земли вокруг Солнца. Секунда принята как интервал времени, равный 1/31 556 925,9747 тропического года для 1900г. января 0 в 12 часов эфемеридного времени.

Атомная система времени (AT). Атомная секунда – интервал времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущений внешними полями.

В квантовых (атомных) мерах частоты используются квантовые переходы между энергетическими уровнями атомов вещества, связанные с частотой  $\nu$  известным уравнением Бора:

$$\nu = (W_2 - W_1) \frac{1}{h},$$

где  $W_1$  и  $W_2$  – энергетические уровни атома,  $h = 6,624 \cdot 10^{-27}$  эрг·с – постоянная Планка.

*Активной квантовой мерой* частоты называется такая мера частоты, в которой в качестве опорной используется частота излучения электромагнитных волн одного из энергетических периодов атомов или молекул.

*Пассивной квантовой мерой* частоты называется такая мера частоты, в которой в качестве опорной используется частота поглощения электромагнитных волн одного из энергетических переходов атомов или молекул.

## 9.7. Прецизионное измерение частоты

Измерение частоты называется прецизионным, если его погрешность равна  $10^{-7}$  или меньше. Необходимость таких точных измерений обусловлена наличием источников электрических колебаний с высокой стабильностью частоты, абсолютное значение которой и самое незначительное отклонение ее от номинала должны быть известны всегда.

Для прецизионных измерений частоты в основном используются методы сравнения и дискретного счета. Метод сравнения чаще всего реализуется осциллографическим способом при синусоидальной и круговой развертке. При синусоидальной развертке измеряемая частота

$$f_x = \frac{n_z}{n_g} f_{об} \pm F,$$

где  $F = \frac{N}{\tau}$ ,  $N$  – число периодов разностной частоты,  $\tau$  – интервал времени измерения в секундах.

Погрешность измерения осциллографическим способом зависит от погрешности отсчетов моментов времени начала и конца измерения или от погрешности определения фазового сдвига при  $F < 1$  Гц.

Метод дискретного счета предусматривает применение электронно-счетных частотомеров. Погрешность измерения равно нестабильности частоты внутреннего опорного кварцевого генератора плюс единица счета и может быть значительно уменьшена использованием более высокостабильного внешнего образцового генератора.

Особо точные измерения выполняют, применяя квантовую меру частоты. Для этого напряжение кварцевого генератора меры замещают напряжением измеряемой частоты, которую после соответствующих преобразований сравнивают с частотой квантового перехода данной меры. Результирующую разностную частоту измеряют при помощи

электронно-счетного частотомера и по его показаниям вычисляют искомую.

### **Контрольные вопросы**

1. Расскажите про классификацию спектра частот.
2. Поясните причины погрешностей резонансных частотомеров.
3. Перечислите достоинства электронно-счетных частотомеров.
4. Расскажите взаимодействие узлов электронно-счетного частотомера при измерениях частоты и периода.

# ГЛАВА 10

## ИЗМЕРЕНИЕ ФОРМЫ И СПЕКТРА СИГНАЛОВ

---

### 10.1. Общие сведения

Радиотехнические сигналы при взаимодействии друг с другом или с помехой, а также проходя через устройства, содержащие нелинейные элементы, претерпевают изменение формы и спектра. При взаимодействии сигналов возникает модуляция и значение искажений необходимо измерять форму сигнала и его спектр.

Измерение спектра предусматривает определение большого числа гармонических составляющих, которое при исследовании непериодических сигналов стремится к бесконечности.

Спектральная функция импульсного сигнала  $x(t)$  представляет собой комплексную функцию вида

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (10.1)$$

Измерения выполняются в течение некоторого интервала времени  $T$ , поэтому формула (10.1) преобразуется в следующую:

$$S_T(\omega) = \int_0^T x(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (10.2)$$

Из рассмотрения формулы (10.2) видно, что измеряемый спектр является функцией частоты и интервала времени измерения. Функцию  $S_T(\omega)$  называют текущим спектром сигнала. Очевидно, что с увеличением интервала времени измерения текущий спектр приближается к истинному.

Для определения спектра периодического несинусоидального сигнала необходимо измерить амплитуды и частоты его гармонических составляющих. Для этой цели применяют приборы – анализаторы гармоник и анализаторы спектра – как с ручным управлением, так и автоматические. Гармонические составляющие можно измерять

поочередно или одновременно; первый способ анализа спектра называют последовательным, а второй – параллельным.

Основными характеристиками анализаторов являются разрешающая способность и время анализа. *Разрешающая способность*  $\Delta f_p$  определяется минимальным расстоянием по оси частот, при котором можно выделить и измерить с заданной погрешностью две соседние составляющие спектра. Разрешающая способность прямо пропорциональна полосе пропускания фильтра  $\Delta f_\phi$  избирательного контура (рис. 10.1):

$$\Delta f_p = q\Delta f_\phi, \quad (10.3)$$

где  $q > 1$ .

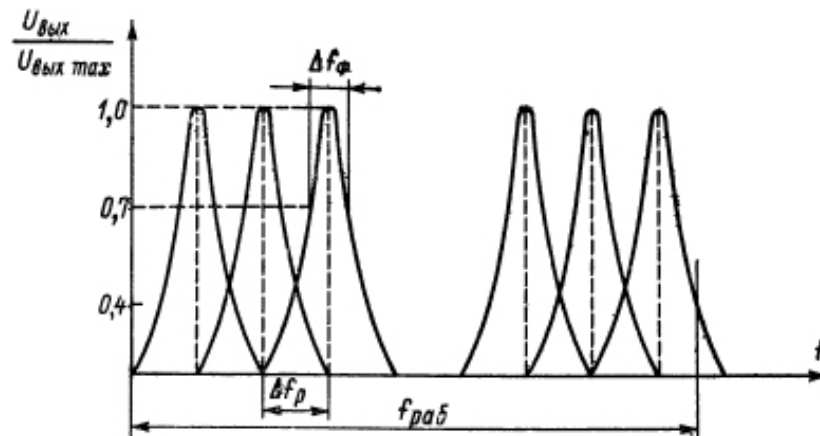


Рис. 10.1. К определению связи разрешающей способности с полосой пропускания фильтра

В автоматических анализаторах на разрешающую способность влияют переходные процессы. Время, в течении которого характеристика анализатора приближается к его статистической, называют *временем установления*  $t_y$ ;  $t_y = \frac{a}{(\Delta f_\phi)}$ ; с, где  $a$  – коэффициент, близкий к единице; значение  $a$  зависит от типа применяемого избирательного контура или фильтра.

Время анализа анализаторами параллельного действия соизмеримо со временем установления:

$$T_{нар} \approx t_y = \frac{a}{\Delta f_\phi} = \frac{aq}{\Delta f_p}, c. \quad (10.4)$$

Скорость анализа определяется отношением рабочего диапазона частот анализатора  $f_{раб}$  (рис. 10.1) к времени анализа:

$$v_{нар} \approx \frac{f_{раб}}{T_{нар}} = \frac{f_{раб} \Delta f_\phi}{a}. \quad (10.5)$$

Обозначив  $f_{раб} = k\Delta f_p$ , где  $\Delta f_p$  – разрешающая способность резонатора, определяемая формулой (10.3), получаем выражение для скорости параллельного анализа

$$v_{нар} = \frac{k}{aq} \Delta f_p^2.$$

Скорость последовательного анализа определяется уравнением  $v_{посл} = \frac{\Delta f_p}{t_y}$  или, с учетом ранее приведенных соотношений,

$$v_{посл} = \Delta f_p \Delta f_\phi / a = \frac{1}{aq} \Delta f_p^2.$$

В этом случае время анализ

$$T_{посл} = f_{раб} / v_{посл} = kaq\Delta f_p, \quad (10.6)$$

т.е. оно в  $k$  раз больше, чем при параллельном анализе.

## 10.2. Анализаторы гармоник

Анализатор гармоник представляет собой высокоизбирательное устройство, при помощи которого можно измерить амплитуду и частоту одной гармонической составляющей в присутствии всех других.



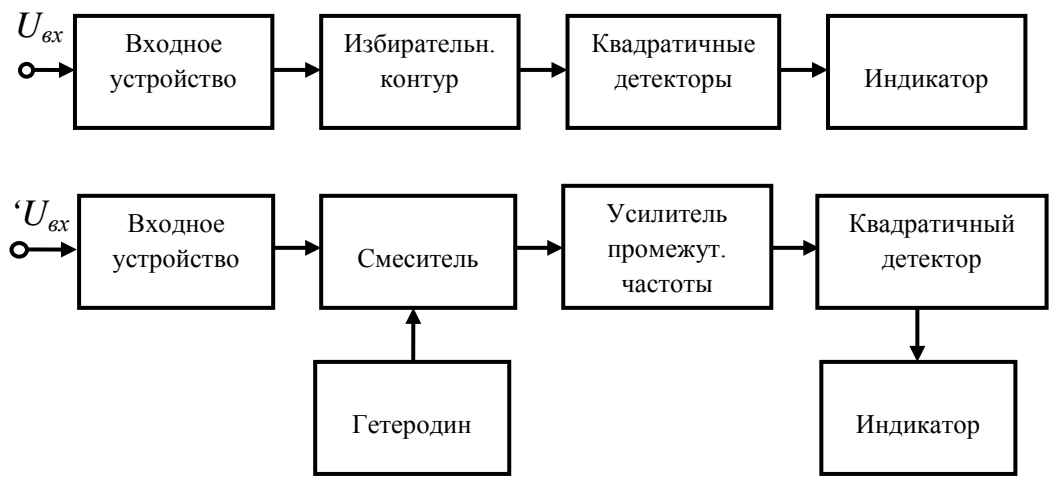


Рис. 10.2. Структурные схемы анализаторов гармоник последовательного действия: а – с избирательными контурами; б – гетеродинный

По схемным решениям анализаторы гармоник подразделяют на анализаторы с избирательными контурами и гетеродинные (рис. 10.2). В диапазоне низких частотах избирательные контуры выполняют в виде узкополосных фильтров, в диапазоне высоких частот используют колебательные контуры, на СВЧ – объемные резонаторы.

При параллельном анализе исследуемый сигнал после входного устройства поступает одновременно на  $n$  каналов, состоящих из узкополосных фильтров, настроенных на основную частоту и ее гармоники (рис. 10.3). Напряжения соответствующих гармонических составляющих после квадратичного детектирования через коммутирующее устройство попадают на индикатор, регистрирующий абсолютные или относительные значения напряжения гармоник. При малом числе каналов (например, 3 или 5) коммутатор не обязателен, можно использовать необходимое количество индикаторов.

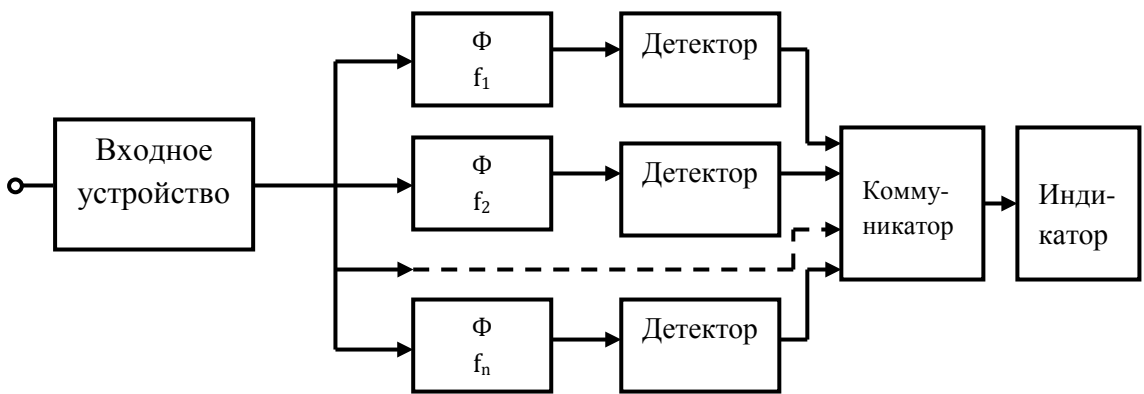


Рис. 10.3. Структурная схема анализатора гармоник параллельного действия

Анализаторы гармоник применяются в основном для исследования гармонических составляющих несинусоидальных сигналов низкой частоты.

### 10.3. Анализаторы спектра

Анализатор спектра представляет собой панорамное устройство, при помощи которого можно наблюдать на экране электроннолучевой трубки спектр исследуемого сигнала. Наиболее распространенная структурная схема спектра представлена на рис. 10.4. Исследуемый периодический сигнал сложной формы поступает через входное устройство на смеситель, к которому подводится напряжение генератора качающейся частоты. Линейное изменение частоты во времени производится изменением напряжения генератора развертки. Вследствие этого отклонение электронного луча по горизонтали пропорционально отклонению частоты от среднего значения и горизонтальная ось является осью частот. На выходе смесителя образуются напряжения комбинационных частот. Составляющие, частота которых лежит в полосе пропускания усилителя промежуточной частоты  $f_{np} \pm \Delta f$ , усиливаются и после детектирования в квадратном детекторе и усиления в видео усилителе поступают на вертикально отклоняющие пластины электроннолучевой трубки. Таким образом, отклонение луча по вертикали пропорционально мощности определенной узкой полосы спектра исследуемого сигнала (от  $f - \Delta f$  до  $f + \Delta f$ ), удовлетворяющему равенство

$$f - \Delta f < f_{з.к.ч} - f_{np} < f + \Delta f, \quad (10.7)$$

В некоторых анализаторах спектра используют логарифмические усилители, которые дают возможность наблюдать составляющие спектра с большим отношением амплитуд (100:1 или 1000:1). В таких анализаторах логарифмический режим можно менять на линейный.

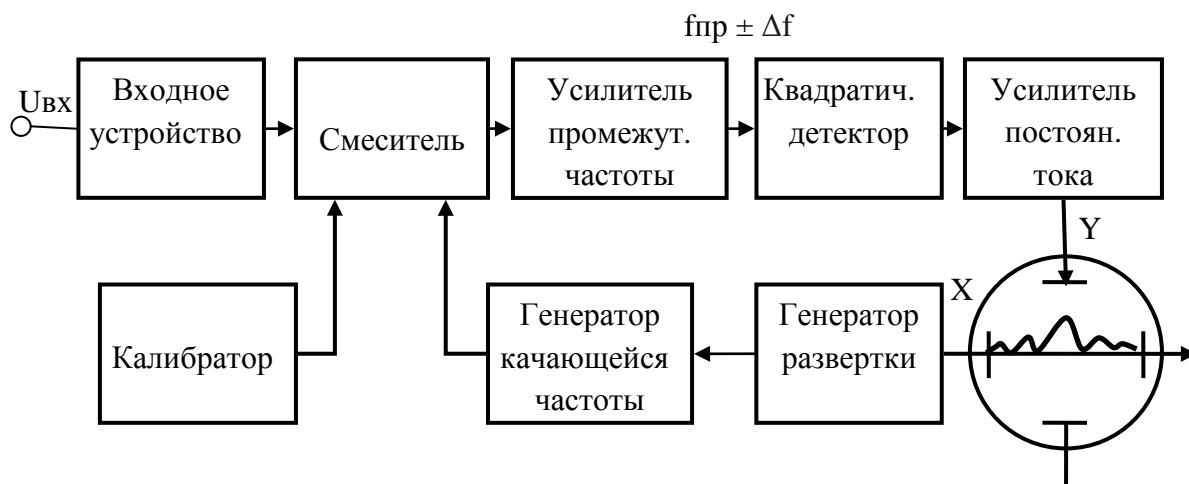


Рис.10.4. Структурная схема анализатора спектра

Калибратор предназначен для создания на экране трубки частотных меток.

Основным недостатком анализаторов представленного действия является большая продолжительность анализа.

Диапазон качания частоты гетеродина определяется шириной исследуемого спектра. Для измерения основного или трех боковых лепестков диапазон качания должен быть равен (рис. 10.5)

$$f_{z \max} - f_{z \min} \geq 8/\tau.$$

Частота развертки определяет количество циклов качания частоты гетеродина в секунду. Минимальная величина периода развертки характеризуется временем последовательного анализа  $T_{\text{посл}}$ . При анализе спектра периодических импульсных сигналов период развертки  $T_{\text{раз}}$  связан с периодом следования сигналов  $T_c$  соотношением:  $T_{\text{раз}} = mT_c \geq T_{\text{посл}}$ , где  $m$  – число линий спектра, наблюдаемых на экране трубки.

Промежуточная частота анализатора спектра должна быть такой, чтобы при минимальной длительности исследуемого импульса  $\tau$  изображение спектра, получаемое по зеркальному каналу, не накладывалось на спектрограмму основного канала (рис.10.5).

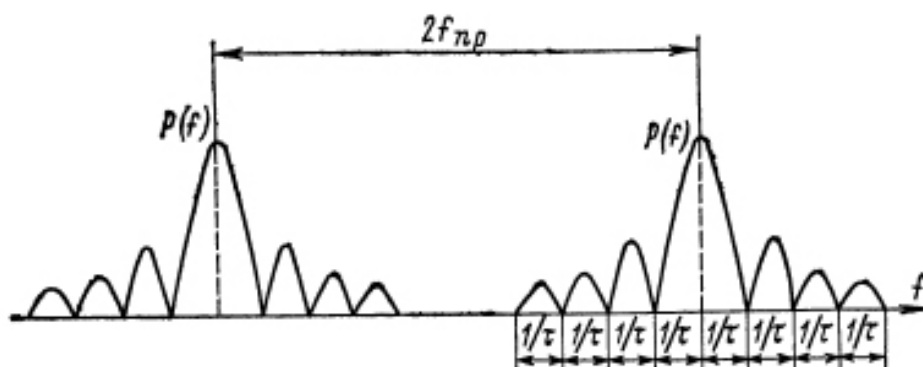


Рис.10.5. Прямое и зеркальное изображение спектра

#### 10.4. Измерение нелинейных искажений

Нелинейным искажение гармонического сигнала называется изменение его формы, возникающее в результате прохождения сигнала через устройство, содержащее нелинейный элемент. Искаженный сигнал можно представить в виде суммы постоянной составляющей, первой гармоники с частотой  $f$  и высших гармоник к частотам  $2f, 3f, \dots, nf$ .

Мерой нелинейного искажения гармонического сигнала является коэффициент гармоник, характеризующий отличие формы данного периодического сигнала от гармонического

$$K_g = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} A_i^2}}{A_1} \cdot 100\%, \quad (10.8)$$

где  $A_i$  – амплитуда  $i$ -й гармоники сигнала.

Нелинейные искажения измеряют двумя методами: гармоническим и комбинационным. При гармоническом методе на вход испытуемого устройства подают один гармонический сигнал, при комбинационном – два (или три) сигнала разных частот. Существует статистический метод, при котором на вход подают шумовой сигнал.

Измерение нелинейных искажений гармоническим методом осуществляется при помощи прибора – измерителя нелинейных искажений. Входное устройство предназначено для согласования выходного сопротивления исследуемого объекта с входным сопротивлением измерителя нелинейных искажений. Широкополосный усилитель обеспечивает усиление сигнала до величины, удобной для

отсчета и дальнейших вычислений. Полоса пропускания усилителя охватывает диапазон частот от нижней рабочей частоты до пятикратного значения верхней частоты, на которой измеряются нелинейные искажения.

Диапазон рабочих частот устанавливается переключением резисторов  $R$ , плавная настройка осуществляется сдвоенным блоком конденсаторов переменной емкости.

Для наблюдения формы сигнала или его высших гармоник предусмотрен выход на осциллограф. Выпускают для работы в диапазоне низких (звуковых частот).

## 10.5. Измерение параметров модулированных сигналов

В радиотехнических устройствах применяются амплитудная, частотная, угловая (фазовая), импульсная и комбинированные виды модуляции. В первых трех видах модуляции амплитуда, частота или фаза синусоидального сигнала изменяется по закону изменения модулирующего напряжения. При импульсной модуляции модулирующее напряжение воздействует на видеоимпульсы и изменяет их высоту, частоту следования, длительность, а также их временное положение или относительную фазу.

Синусоидальный сигнал, модулированный по амплитуде, характеризуется коэффициентом модуляции  $M$ , по частоте – девиацией частоты  $\Delta f$ , по фазе – индексом угловой модуляции  $\theta$ . Кроме того, все модулированные колебания характеризуются глубиной модуляции, равной отношению данного коэффициента, девиации или индекса модуляции к максимальному, принимаемому за 100% модуляцию.

Выражение для сигнала, модулированного по амплитуде синусоидальным напряжением, имеет следующий вид:

$$u = U(1 + M \cos \Omega t) \cos \omega t, \quad (10.9)$$

где  $U$  – амплитуда немодулированного высокочастотного колебания,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – несущая частота,  $\Omega = 2\pi F$ ,  $F$  – модулирующая частота,  $M$  – коэффициент модуляции, равен отношению изменения амплитуды высокочастотного колебания при модуляции последнего к ее значению в отсутствие модуляции:

$$M = \Delta U / U. \quad (10.10)$$

Максимальное изменение амплитуды не должно превышать ее значения, следовательно, максимальное значение  $M = 1$ , минимальное  $M=0$ .

$$M = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}}. \quad (10.11)$$

Формулы (10.10) и (10.11) справедливы только для симметричной модуляции. Для оценки асимметрии коэффициента модуляции измеряется отдельно «вверх» и «вниз»

$$M_{\text{вв}} = \Delta U_{\text{вв}} / U \text{ и } M_{\text{вн}} = \Delta U_{\text{вн}} / U. \quad (10.12)$$

Коэффициент амплитудной модуляции измеряют двумя методами: осциллографическим и методом выпрямления.

*Осциллографический метод* осуществляют способом линейной и синусоидальной разверток. При линейной развертке в канал вертикального отклонения подают высокочастотный модулированный сигнал, а частоту развертки устанавливают в 2-3 раза ниже модулирующей частоты. На экране осциллографа появляется осциллограмма модулированного сигнала в виде  $u = f(t)$ .

Для определения коэффициента модуляции при синусоидальной развертке в канал вертикального отклонения подают модулированный сигнал, а в канал горизонтального отклонения – модулирующее напряжение.

*Метод выпрямления* применяют для измерения коэффициента модуляции в процессе эксплуатации. Сущность метода заключается в том, что высокочастотный модулированный сигнал сначала детектируется, а затем измеряется стрелочными приборами постоянного и переменного тока. Приборы, основанные на этом методе, называются измерителями модуляции.

Самый распространенный способ выпрямления – способ двойного детектирования. Модулированный сигнал сначала детектируется линейным, а затем пиковым детектором. При линейном детектировании на нагрузке создается пульсирующее напряжение, постоянная составляющая которого соответствует напряжению несущей частоты  $U$

и фиксируется при помощи стрелочного индикатора. Переменная составляющая, соответствующая огибающей модулированного колебания, поступает на пиковый вольтметр с закрытым входом, показания которого в зависимости от положения переключателя  $\Pi$  пропорциональны амплитуде  $\Delta U_{BB}$  или  $\Delta U_{BH}$ .

Коэффициент модуляции  $M$  определяют по формуле (10.12).

Выражение для сигнала, модулированного по частоте одним синусоидальным напряжением, имеет вид:

$$u = U \cos(\omega_0 t + m_f \sin \Omega t), \quad (10.13)$$

где  $U$  – амплитуда высокочастотного колебания,  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $f_0$  – значение высокой (несущей) частоты до модуляции,  $\Omega = 2\pi F$ ,  $F$  – частота модулирующего напряжения,  $m_f$  – индекс частотной модуляции,

$$m_f = \Delta\omega / \Omega = \Delta f / F, \text{ \textit{й}} \quad (10.14)$$

где  $\Delta f$  – отклонение высокой частоты при модуляции – девиация частоты.

Девиацию частоты можно измерить несколькими методами, наиболее распространенный – *метод частотного детектора*. Сущность его состоит в том, что частотно-модулированные колебания преобразуются в амплитудно-модулированные, а затем детектируются амплитудным детектором, в результате чего получается напряжение, пропорциональное напряжению модулирующей частоты. Это напряжение измеряется пиковым вольтметром.

Частотно-модулированные колебания преобразуются в колебания низкой частоты частотным детектором, амплитудно-частотная характеристика которого имеет вид S-образной кривой.

Модулированный по частоте сигнал преобразуется в сигнал промежуточной частоты, усиливается до уровня, необходимого для нормальной работы ограничителя, и поступает на частотный детектор, выходное напряжение которого пропорционально девиации частоты; это напряжение проходит через фильтр нижних частот, усиливается и измеряется пиковым вольтметром. Шкала последнего проградуирована в единицах девиации – килогерцах.

## 10.6. Измерение параметров импульсных сигналов

В процессе прохождения импульсов через различные радиотехнические цепи и устройства, а также во время распространения радиоимпульсов между передающей и приемной антеннами форма импульсов изменяется (искажается).

Для определения качества импульсных устройств и параметров импульсно-модулированных сигналов нужно измерять высоту и длительность импульса, длительность фронта и среза, неравномерность вершины, значение выброса на вершине и в паузе, а в особо ответственных случаях – нелинейность и неэкспоненциальность фронта и среза. В периодической последовательности импульсов определяется их частота или период следования, а также скважность или коэффициент заполнения.

Импульсные напряжения, меньше 100 В, преимущественно измеряются при помощи осциллографов, которые позволяют определить не только высоту импульса, но и форму на всем его протяжении. При измерении импульсов тока их сначала превращают в импульсы напряжения. Для этого в цепь, по которой передают импульсы тока, включают вспомогательный резистор с небольшим сопротивлением, на котором измеряют падение напряжения.

*Длительность импульсов*, используемых в радиотехнике, различна, поэтому нужно измерять интервалы времени от единиц секунд до единиц наносекунд. Измерения выполняют в основном осциллографическим методом и методом дискретного счета. Осциллографический метод осуществляют при помощи калиброванных меток или сравнения с периодом развертки  $T_p$ , который известен. Способ калиброванных меток пригоден для импульсов любой формы при любой скважности.

Способ сравнения с известным периодом  $T_p$  применяют, если форма импульсов близка к прямоугольной, а скважность невелика: тогда на осциллограмме хорошо видны два соседних импульса (рис. 10.6). В этом случае по масштабной сетке измеряют расстояния  $l_1 = \tau_u$  и  $l_2 = T_p$ ; полученные данные позволяют вычислить длительность импульса по формуле:

$$\tau_u = \frac{l_1}{l_2} T_p.$$



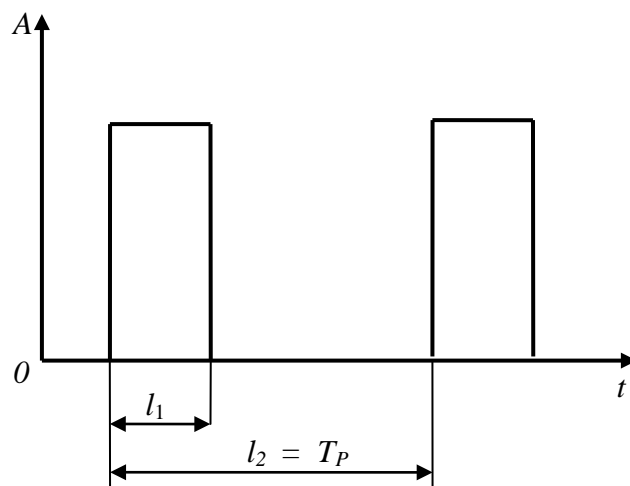


Рис.10.6. К определению длительности импульса

Частота повторения импульсов обычно колеблется от нескольких десятков герц до десятков и сотен мегагерц. Наиболее простым и удобным методом ее измерения является метод сравнения, который осуществляется при помощи осциллографа. На вход канала вертикального отклонения поднимается напряжение последовательности импульсов, частоту повторения которых следует измерить, а на вход канала горизонтального отклонения – напряжение от измерительного генератора соответствующей частоты. При этом генератор развертки осциллографа должен быть выключен. Частота генератора плавно повышается со стороны самой низкой частоты до тех пор, пока на экране не возникает устойчивое изображение одного импульса. Частота генератора при этом равна частоте повторения импульсов. Точность измерения определяется точностью градуировки частотной шкалы генератора. Последовательность наносекундных импульсов измеряют при помощи стробоскопического осциллографа. Частоту повторения импульсов можно измерять прямопоказывающими приборами: для грубых измерений конденсаторным частотомером, для точных – электронно-счетным частотомером.

Длительность интервала времени между двумя импульсами измеряется в основном осциллографическим методом и методом дискретного счета.

Осциллографический метод осуществляется чаще всего при помощи калиброванных меток или спиральной развертки. В первом случае на вход канала вертикального отклонения осциллографа подают импульсы, интервал между которыми нужно измерить. Частоту развертки устанавливают такой величины, чтобы на экране

осциллографа были видны оба импульса. Затем включают калибратор длительности, вырабатывающий метки, длительность которых известна. По числу меток, расположенных между импульсами, определяют временной интервал между ними.

Погрешность измерений этим методом тем меньше, чем больше расстояние между импульсами на экране осциллографа, чем короче метки и чем точнее их калибровка. В специальных приборах для измерения интервалов времени способом калиброванных меток относительная погрешность составляет  $3 \cdot 10^{-4}$ .

Сравнительно большие интервалы времени измеряют при помощи спиральной развертки. Последняя удлиняет траекторию луча на экране осциллографа в несколько десятков раз. Процесс измерения заключается в следующем.

При отсутствии сигнала электроннолучевая трубка заперта и развертка не работает. Первый импульс, определяющий начало отсчета интервала времени, запускает спиральную развертку и создает импульс подсветки, который поступает на модулятор, – трубка открывается. Второй импульс, соответствует концу измеряемого интервала, прекращает развертку и снимает подсветку – трубка закрывается. Длительности интервала времени определяется по числу витков спирали развертки на экране осциллографа. Длительность одного витка известна с большей точностью, так как генератор круговой развертки, из которой получается спиральная, обязательно стабилизирован кварцем. Например, при частоте кварцевого генератора, равной 100 кГц, длительность одного витка составляет 10 мкс, а если число витков 30, то интервал между импульсами составляет 300 мкс.

При необходимости измерения еще больших интервалов времени спиральная развертка выполняется с задержкой. Напряжение задержки вводится поле нескольких витков спирали и прекращает развертку на точно известный интервал времени, после которого развертка продолжается. Искомый интервал времени в этом случае определяется суммой длительностей видимых витков спирали и задержкой, значение которой считывается со шкалы ее переключателя. Для удобства измерения и для повышения ее точности в цепь второго анода электроннолучевой трубки вводится напряжение меток, вырабатываемое предназначенным для этой цели генератором. На спирали появляются небольшие зубцы, расстояние между которыми равно периоду напряжения меток. Например, если частота генератора равно 5 МГц, то интервал между метками составляет 0,2 мкс. Если измеряется

временной интервал периодического процесса, наблюдения можно вести визуально. При измерении же временного интервала между одиночными импульсами необходимо осциллограмму фотографировать. Для этой цели измерители временных интервалов снабжаются фотоприставками. Механизм затвора фотоаппарата управляется электромеханическим устройством синхронно с запуском развертки. Для измерения интервалов времени применяют электроннолучевые трубки с длительным послесвечением.

Измерение интервалов времени методом дискретного счета принципиально не отличается от измерения периода. В течение измеряемого интервала селектор пропускает на электронно-счетное устройство импульсы от стабилизированного кварцем генератора. По числу прошедших импульсов и их длительности определяется искомый интервал. Точно также измеряется и длительность импульсов. Селектор открывается и закрывается короткими импульсами, соответствующими фронту и срезу измеряемого импульса. Точность измерения тем выше, чем больше длительность интервала и чем выше скорость счета. В современных измерителях больших интервалов времени погрешность составляет  $\pm 0,01\%$ .

### **Контрольные вопросы**

1. Опишите структурные схемы анализаторов гармоник.
2. Опишите структурные схемы анализатора спектра.
3. Расскажите про измерение нелинейных искажений.

# ГЛАВА 11

## ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА

Фазовым сдвигом  $\varphi$  называется модуль разности начальных фаз двух гармонических сигналов одной частоты  $U_1(t) = U_{m_1} \cdot \sin(\omega t + \varphi_1)$  и  $U_2(t) = U_{m_2} \cdot \sin(\omega t + \varphi_2)$ . Таким образом фазовый сдвиг равен  $\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2|$ . Он является постоянной величиной и не зависит от момента отсчёта.

Фазовый сдвиг можно выразить через разность моментов времени  $\Delta T = t_1 - t_2$ , в которых эти колебания имеют одинаковые фазы (рис.11.1 а)

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi f(t_2 - t_1) = 2\pi \Delta T / T. \quad (11.1)$$

Это определение распространяется на два периодических сигнала несинусоидальной формы (рис.11.1 б), если в момент перехода через ноль их напряжения изменяются в одну сторону (например, от положительных значений к отрицательным).

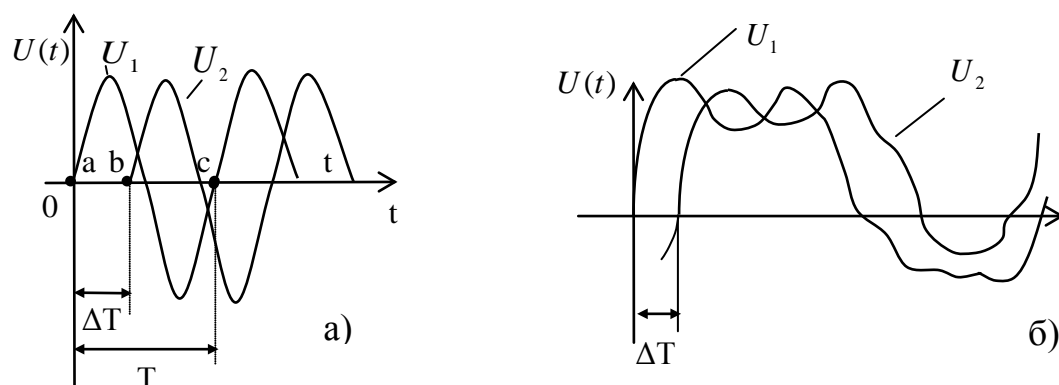


Рис.11.1

Необходимость измерения фазового сдвига возникает при исследованиях фазочастотных характеристик радиотехнических устройств, измерениях реактивной мощности, оценке свойств веществ.

Приборы для измерения разности фаз называют фазометрами или измерителями фазового сдвига и согласно ГОСТ15094 подразделяются на:

- Ф1 – установки и приборы для поверки измерителей фаз;
- Ф2 – измерители фаз;
- Ф3 – фазовращатели измерительные;
- Ф4 – измерители группового времени запаздывания.

Методы измерения фазового сдвига весьма разнообразны и зависят от диапазона частот, требуемой точности и от формы исследуемых сигналов. На практике нашли применение следующие методы:

- осциллографический;
- компенсационный;
- дискретного счета.

## 11.1. Осциллографический метод

Этот метод реализуется с помощью линейной, синусоидальной и круговой разверток.

### 11.1.1. Метод линейной развертки

Для этого используется двухлучевой или двухканальный осциллограф. На входы  $Y_1$  и  $Y_2$  подаются исследуемые сигналы. Частота развертки подбирается так, чтобы на экране наблюдалось 1-2 периода сигналов (рис.11.1 а). Измерив  $T$  и  $\Delta T$  по формуле

$$\varphi = \frac{360^\circ}{T} \cdot \Delta T = \frac{ab}{ac} 360^\circ$$

определяют фазовый сдвиг, где  $ab$  и  $ac$  – измеренные на экране ЭЛТ длины отрезков.

### 11.1.2. Метод синусоидальной развертки

Метод может быть реализован с помощью однолучевого осциллографа. Один сигнал  $U_1 = U_y \cdot \sin(\omega t + \varphi)$  подается в канал  $Y$ , а второй  $U_2 = U_x \cdot \sin \omega t$  – на канал  $X$  (генератор развертки отключен). На экране осциллографа получается эллипс (рис. 11.2), уравнение которого

$$y = \frac{b}{a} \cdot (x \cos \varphi + \sqrt{a^2 - x^2} \sin \varphi), \quad (11.2)$$

где  $a, b$  – максимальные отклонения по горизонтали и вертикали соответственно.

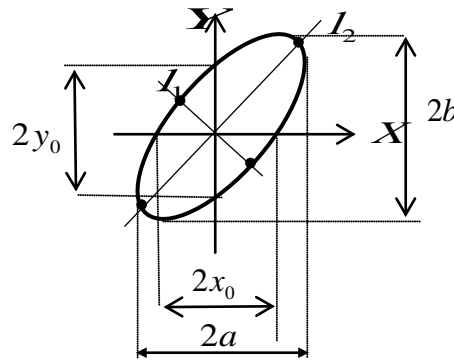


Рис.11.2.

Существует ряд методов определения фазового сдвига по полученной фигуре.

**Метод 1.** Положив  $x = 0$  получим вертикальный отрезок  $y_0 = b \cdot \sin \varphi$ . Если  $y = 0$ , то горизонтальный отрезок  $x_0 = a \cdot \sin \varphi$ . Следовательно  $\sin \varphi = \pm \frac{y_0}{b} = \pm \frac{x_0}{a}$ , откуда можно определить

$$\varphi = \pm \arcsin \frac{2y_0}{2b} = \pm \arcsin \frac{2x_0}{2a}. \quad (11.3)$$

Метод неточен из-за трудности определения центра эллипса, но зато полученные формулы не зависят от соотношений  $U_x$  и  $U_y$ .

**Метод 2.** Реализуется при условии  $a = b$ . В этом случае  $\operatorname{tg} \varphi = l_1 / l_2$ , где  $l_1$  - малая ось эллипса,  $l_2$  - его большая ось.

**Метод 3.** При любых значениях  $a$  и  $b$   $\sin \varphi = \frac{l_1 l_2}{ab}$ , где  $l_1, l_2, a, b$  определяются по экрану ЭЛТ осциллографа.

Осциллографический метод прост, не требует дополнительных приборов, но не даёт однозначности (знак угла) и обладает большой субъективной погрешностью. Погрешность определения фазового

сдвига составляет 5-10% из-за неточностей определения длин отрезков, искажений эллипса.

### 11.1.3. Метод круговой развертки

При использовании этого метода опорное напряжение с помощью фазовращателя ФВ расщепляется по фазе и в виде двух сдвинутых на  $90^0$  напряжений подается на вход усилителей  $Y1$  и  $Y2$  каналов  $X$  и  $Y$  (рис.11.3). Регулировкой коэффициентов усиления и установлением фазовой симметрии в обоих каналах добиваются получения круговой развертки.

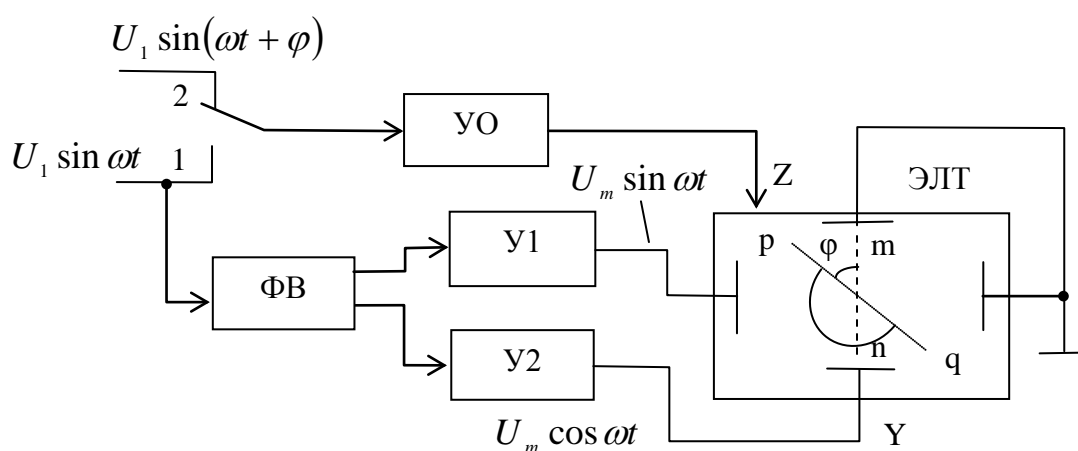


Рис. 11.3. Метод круговой развертки

Напряжение исследуемого сигнала подается на модулирующий электрод ЭЛТ (канал  $Z$ ). На время отрицательного полупериода ЭЛТ запирается и на экране становится видимой только половина окружности. Для обеспечения необходимой точности измерений необходимо, чтобы трубка запиралась в моменты перехода сигнала через ноль, что обеспечивается применением усилителя-ограничителя  $Y0$ .

В процессе измерения фазового сдвига на вход  $Y0$  сначала подается опорное напряжение (положение 1) и по полуокружности на экране ЭЛТ отмечается положение диаметра  $mn$ , являющегося началом отсчета. Затем на  $Y0$  подается измеряемый сигнал (положение 2) и отмечается положение  $pq$ . Измеряемый фазовый угол равен  $\varphi$  углу между прямыми  $mn$  и  $pq$ .

Источниками погрешности являются: непостоянство частоты круговой развертки, погрешность измерения угла между диаметрами, погрешность  $UO$ .

## 11.2. Компенсационный метод

Для осуществления измерений по этому методу необходимо иметь два фазовращателя, один из которых должен быть калиброван. Фазовращатель (группа ФЗ) – это устройство, с помощью которого в схему вводятся известный и регулируемый фазовый сдвиг.

Измерения проводят по схеме (рис.11.4). Сначала устраняют собственный фазовый сдвиг между каналами  $X$  и  $Y$  осциллографа. Для этого переключатель  $S$  переводят в положение 1, подавая тем самым на  $X$  и  $Y$  одно и то же напряжение  $U_1(t)$ .

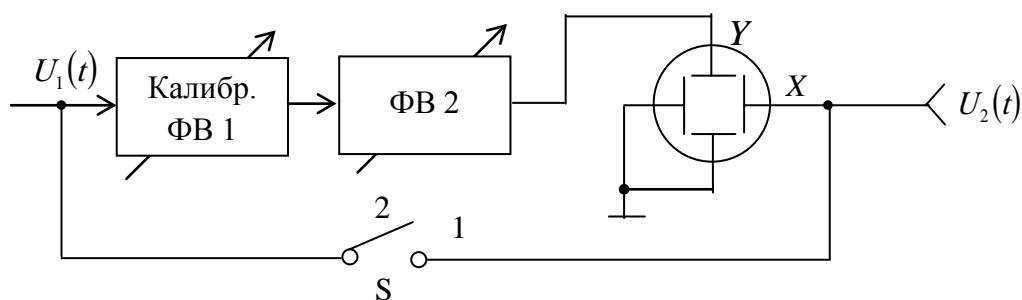


Рис. 11.4.

Указатель шкалы калиброванного фазовращателя ФВ1 устанавливают на ноль, затем вращая ФВ2, добиваются прямой линии на экране ЭЛТ. При этом происходит компенсация собственного фазового сдвига осциллографа.

Затем переключатель  $S$  переводят в положение 2 и на вход  $X$  подают напряжение  $U_2(t)$ . В результате на экране ЭЛТ появляется эллипс, который снова превращают в прямую линию, вращая на этот раз калиброванный ФВ1.

По шкале ФВ1 отсчитывают фазовый сдвиг между напряжениями  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ . Если  $U_1(t)$  опережает  $U_2(t)$ , то показания ФВ1 равны фазовому сдвигу  $\varphi = \varphi_{обр}$ , если наоборот, то сдвиг вычисляется по формуле  $\varphi = 360^\circ - \varphi_{обр}$ .



Простейший низкочастотный фазовращатель представляет собой неуравновешенный четырехплечий мост, построенный на RC-элементах (рис. 11.5)

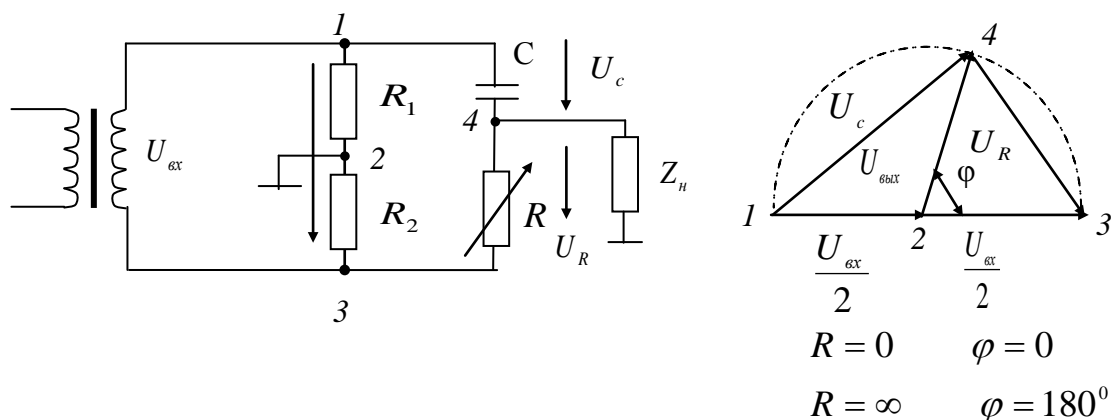


Рис. 11.5.

Фазовый сдвиг равен  $\varphi = 2\arctg \omega RC$  и регулируется в диапазоне  $10-160^0$ . Для исключения влияния сопротивления нагрузки в качестве  $Z_n$  часто включают эмиттерный повторитель, что позволяет получить погрешность фазовращателей не более  $0,1^0$ .

### 11.3. Метод дискретного счета

Как было показано выше, фазовый сдвиг легко преобразуется во временной интервал. Метод дискретного счета предполагает заполнение этого временного интервала счётными импульсами и подсчет их количества. Если частота следования счетных импульсов  $f_0$ , то в интервале  $\Delta T$  их будет  $n = f_0 \Delta T$ . Тогда фазовый сдвиг

$$\varphi = \frac{360^0}{T} \cdot \Delta T = \frac{360^0}{Tf_0} n. \quad (11.4)$$

Измерив  $\Delta T$  и  $T$  с помощью цифрового измерителя временных интервалов или цифровым частотомером можно косвенным методом по приведенной формуле рассчитать величину фазового сдвига.

Более удобным является использование цифрового фазометра. Чаще всего они строятся по схеме интегрирующего фазометра (рис.11.6), когда результат измерений представляет собой среднее значение фазового сдвига за большое число периодов входного

напряжения. Этим достигается повышение точности и помехозащищенности.

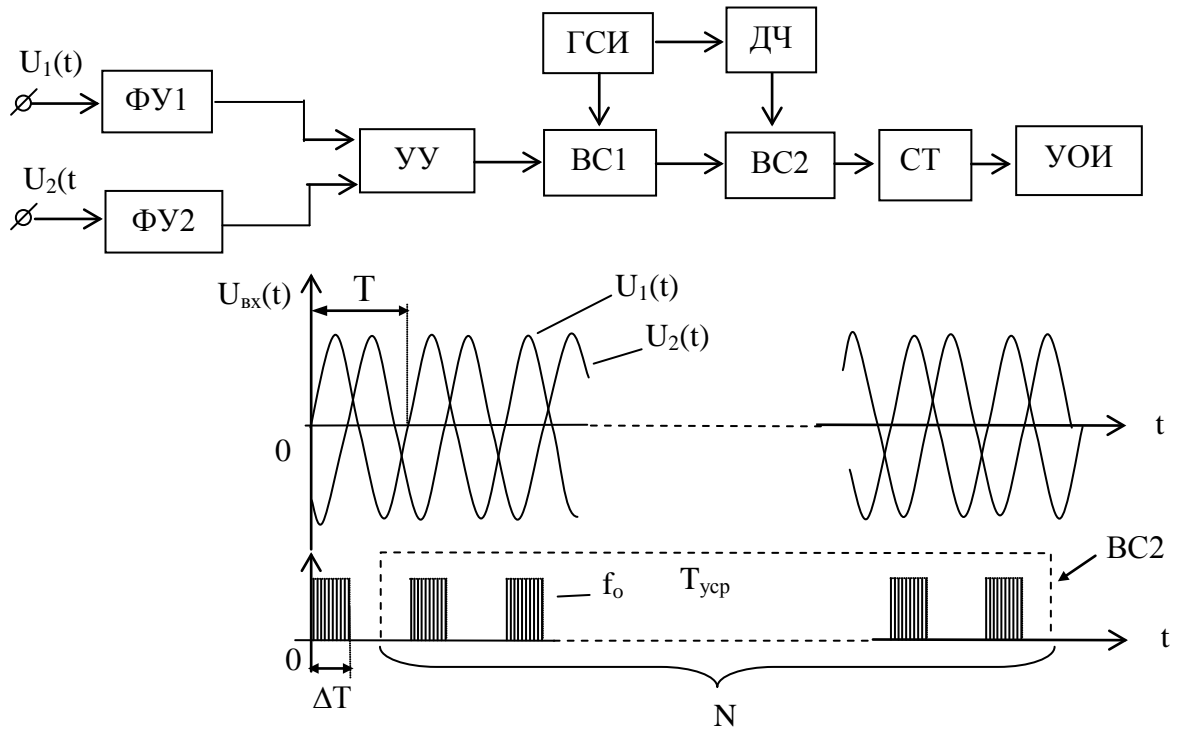


Рис. 11.6. Схема интегрирующего фазометра

Измеряемый фазовый сдвиг преобразуется во временной интервал  $\Delta T$ , заполняемый счетными импульсами частотой  $f_0$  с генератора ГСИ. Число импульсов в одной пачке согласно (11.4)

$$n = f_0 \Delta T = \frac{T f_0}{2\pi} \varphi. \quad (11.5)$$

Эти пачки импульсов поступают на второй временной селектор ВС2, открываемый на время  $T_{\text{уср}}$ , формируемое из импульсов ГСИ с помощью делителя частоты ДЧ. Число пачек, попавших в счетчик СТ  $q = T_{\text{уср}} / T = k / f_0 T$ , где  $k$  – коэффициент деления счетчика СТ.

Общее число импульсов, поступивших на счётчик  $N = nq$ . Откуда получим

$$N = \frac{T f_0}{2\pi} \varphi \frac{k}{f_0 T} = \frac{k}{2\pi} \varphi = C \varphi, \quad (11.6)$$

т.е. число импульсов не зависит от частоты входных сигналов и частоты ГСИ. Подбрав необходимое значение коэффициента пропорциональности  $C$  (коэффициент деления  $k$ ), можно получить отсчет

$$\varphi = \frac{360^\circ}{C} \cdot N \quad (11.7)$$

в градусах и минутах фазового сдвига.

Погрешность цифровых фазометров определяется погрешностью формирования интервала  $\Delta T$  и погрешностью дискретности при подсчете числа импульсов  $n$  и  $N$ . Поэтому фазометры используются для измерения относительно высокочастотных сигналов и обеспечивают погрешность порядка  $0,1^\circ$ . Эту погрешность можно уменьшить, увеличивая  $T_{\text{уср}}$ .

## 11.4. Фазовращатели

Фазовращателем называется устройство, с помощью которого вводится в электрическую цепь известный и регулируемый фазовый сдвиг. Конструкция фазовращателя зависит от диапазона рабочих частот, для которого он предназначен.

*Низкочастотный RC-фазовращатель* представляет собой неуравновешенный четырехплечий мост (рис. 11.7 а). На плечи  $R_1$  и  $R_2$  равных сопротивлений подают входное напряжение  $U_{\text{вх}}$ .

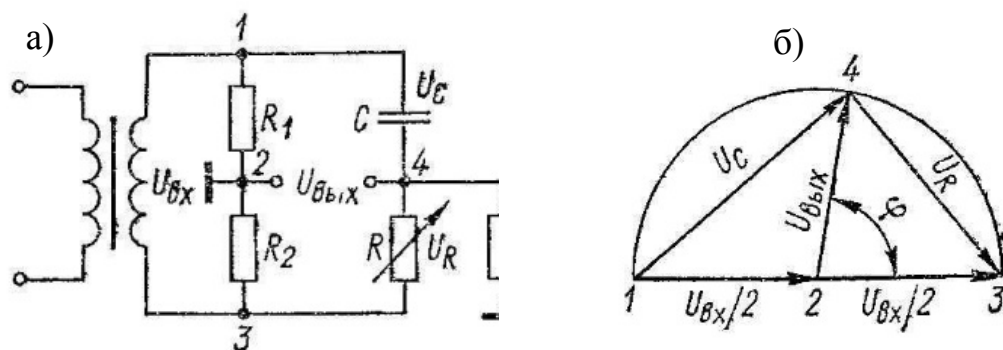


Рис.11.7. Низкочастотный RC-фазовращатель

Плечи  $R$  и  $C$  являются фазосдвигающими: напряжения  $U_R$  и  $U_C$  сдвинуты относительно друг друга на  $90^\circ$ . Сумма этих напряжений всегда равна входному напряжению. Сопротивление резистора  $R$  можно изменять от  $0$  до  $\infty$ ; емкость конденсатора  $C$  постоянна. При изменении сопротивления  $R$  значения  $U_R$  и  $U_C$  меняются. На векторной диаграмме

(рис. 11.7 б) показано взаимное расположение векторов напряжений в этой схеме. Выходное напряжение снимается с диагонали моста и его вектор при изменении сопротивления резистора  $R$  описывает полуокружность. Из рассмотрения векторной диаграммы следует, что  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}/2$ , а  $\varphi = 2\arctg \omega CR$ . Таким образом, при изменении сопротивления резистора  $R$  от 0 до  $\infty$  фазовый сдвиг меняется от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  в режиме холостого хода фазовращателя, т. е. при  $Z_H = \infty$ .

Практически между нагрузкой и выходными зажимами фазовращателя включают эмиттерный или истоковый повторитель с конечным входным сопротивлением, и потому пределы изменения фазового сдвига составляют приблизительно  $10^\circ \dots 160^\circ$ .

Фазовращатель предназначен для работы на одной частоте; при переходе на другую частоту необходимо подключать соответствующий конденсатор  $C$ . Шкала неравномерная. Погрешность установки фазового сдвига максимальна при  $\varphi = 90^\circ$ .

*Индуктивный фазовращатель* гониометрического типа состоит из двух одинаковых катушек индуктивности  $L_1$ ,  $L_2$  (статора), расположенных в пространстве перпендикулярно друг другу, и подвижной катушки  $L_n$  (ротора), расположенной внутри статора. Входное напряжение расщепляется на два, сдвинутых на  $90^\circ$ , и по катушкам статора протекают синусоидальные токи с тем же фазовым сдвигом:  $i_1 = I_1 \sin \omega t$  и  $i_2 = I_2 \sin \omega t$  (рис. 11.8).

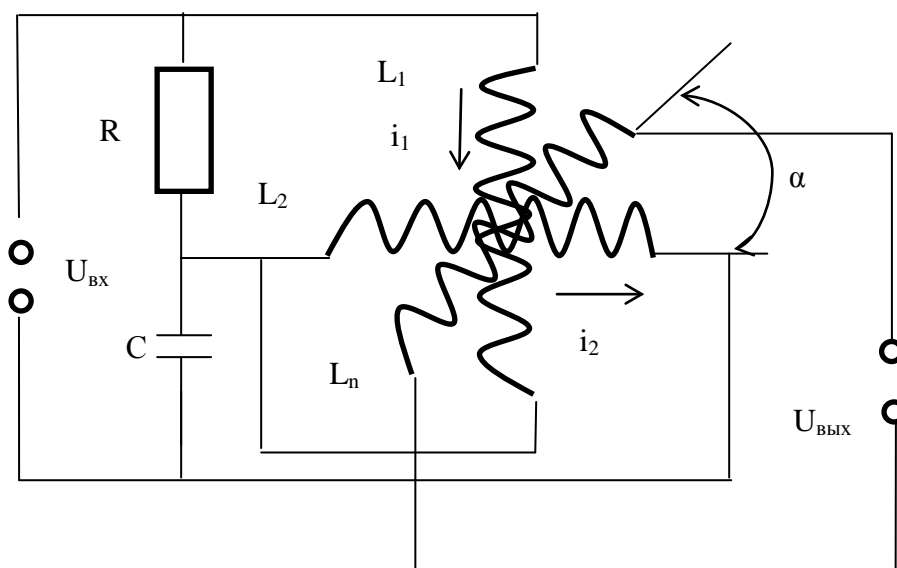


Рис. 11.8. Индуктивный фазовращатель

Внутри статора существует вращающееся магнитное поле, индуцирующее в роторе ЭДС

$$e = e_1 + e_2 = -M_1 \sin \alpha \frac{\partial i_1}{\partial t} - M_2 \sin \alpha \frac{\partial i_2}{\partial t} =$$

$$= -\omega M_1 I_1 \sin \alpha \cos \omega t + \omega M_2 I_2 \sin \alpha \cos \omega t \quad (11.8)$$

где  $M$  – взаимные индуктивности катушек статора и ротора;  $\alpha$  – угол поворота ротора.

Конструкция гониометра выполняется строго симметричной, и потому  $M_1 = M_2 = M$ ,  $I_1 = I_2 = I$  и выходное напряжение

$$u_{\text{вых}} = e = \omega MI \sin \alpha \cos(\omega t - \alpha) \quad (11.9)$$

Отсюда следует, что выходное напряжение постоянно и равно  $MI$ , а фазовый сдвиг между входным и выходным напряжениями совпадает с механическим углом поворота ротора относительно неподвижного статора в пределах  $0^\circ \dots 360^\circ$ . Практически, благодаря неполной симметрии, некоторой несинусоидальности входного напряжения, неточному расщеплению его со сдвигом на  $90^\circ$ , выходное напряжение меняется в пределах 0,3–2 %, а фазовый сдвиг не совпадает с углом поворота ротора на 10–60'.

Индуктивные фазовращатели разделяются на низкочастотные, работающие в диапазоне 500–200 кГц, и высокочастотные, предназначенные для диапазона частот 100 кГц – 2,5 МГц.

*Емкостный фазовращатель* состоит из конденсатора переменной емкости особой конструкции и устройства для расщепления напряжения (рис. 11.9).

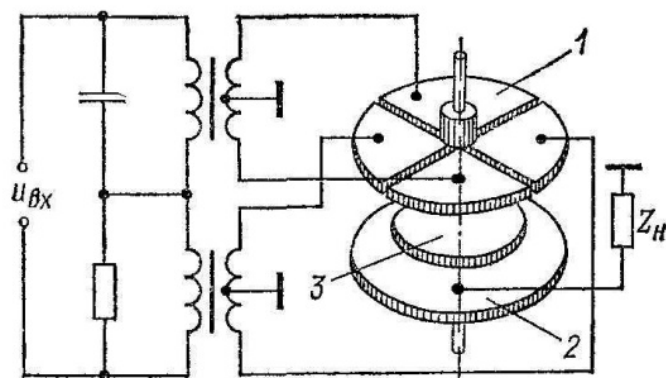


Рис.11.9. Емкостный фазовращатель

Верхняя пластина 1 конденсатора разрезана на четыре сегмента, а нижняя 2 – сплошная круглая. Между ними помещен ротор 3 в форме

диска, выполненного из диэлектрика с большой диэлектрической постоянной. Для того чтобы емкость в каждом секторе конденсатора изменялась по синусоидальному закону, ротор должен иметь форму кардиоиды, но для простоты изготовления ему придают форму диска и устанавливают эксцентрично: ось вращения смещена относительно центра конденсатора на  $0,53$  радиуса диска. Входное напряжение расщепляется на четыре напряжения с одинаковыми амплитудами и последовательно увеличивающимися на  $90^\circ$  фазовыми сдвигами:

$$\begin{aligned} u_1 &= U_1 \sin \omega t & u_2 &= U_2 \cos \omega t \\ u_3 &= -U_3 \sin \omega t & u_4 &= -U_4 \cos \omega t \end{aligned} \quad (11.10)$$

Для такого расщепления напряжения на низких частотах применяют трансформаторы, а на высоких – электронные схемы. Эти напряжения подаются на сегменты; выходное напряжение снимается с нижней пластины. При повороте ротора изменяется емкость между нижней пластиной и соответствующим сегментом и в выходном напряжении появляется фазовый сдвиг, угол которого совпадает с углом поворота ротора в пределах  $0^\circ$ – $360^\circ$ . Амплитуда выходного напряжения постоянна при условии, что четыре напряжения равны по амплитудам и сдвинуты точно на  $90^\circ$ ; что их форма чисто синусоидальна; что сопротивление нагрузки стремится к бесконечности.

*Диэлектрический фазовращатель* состоит из отрезка прямоугольного волновода, внутри которого параллельно вектору  $E$  электромагнитного поля помещена тонкая пластина из высококачественного диэлектрика. При ее перемещении от узкой стенки к центру волновода происходит концентрация поля в месте расположения пластины, что эквивалентно увеличению фазового сдвига. Микрометрический механизм перемещения градуируют в градусах фазового сдвига.

*Поляризационный фазовращатель* состоит из трех секций круглого волновода: две крайние секции неподвижны, и в них в одной плоскости помещены диэлектрические пластины длиной  $\lambda/4$ ; центральная секция с пластиной длиной  $\lambda/2$  может поворачиваться вокруг продольной оси на угол  $180^\circ$ . На вход фазовращателя через переход от прямоугольного волновода к круглому поступает линейно-поляризованная волна. Проходя через первую секцию, она преобразуется в волну с круговой поляризацией. При прохождении волны вдоль полуволновой пластины направление вращения плоскости

поляризации меняется на обратное. В выходной секции волна вновь преобразуется в линейно-поляризованную. Поворот полуволновой пластины на угол  $\varphi$  вызывает изменение фазового сдвига выходной волны на  $2\varphi$ . Фазовращатель является взаимным устройством, поэтому если его закоротить, то волна, отраженная от короткозамыкателя, будет иметь удвоенный фазовый сдвиг по сравнению с волной, прошедшей через фазовращатель только в прямом направлении.

Шкала фазовращателя линейна. При точном микрометрическом механизме обеспечивается плавная установка фазового сдвига в пределах  $0^\circ$ – $360^\circ$  с погрешностью  $1^\circ$ – $2^\circ$ .

*Ступенчатые фазовращатели* для частот больше 1 МГц выполняются из отрезков коаксиального кабеля; для частот ниже 1 МГц – из звеньев искусственной линии задержки. Фазовращатели должны работать в режиме бегущей волны, т. е. на согласованную нагрузку. Фазовый сдвиг выходного напряжения определяется по формуле

$$\varphi = n\omega\sqrt{LC} \quad (11.11)$$

где  $L$  и  $C$  – индуктивность и емкость одного звена искусственной линии или параметры кабеля на метр его длины;  $n$  – число звеньев или длина кабеля в метрах;  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота сигнала, распространяющегося вдоль линии или кабеля.

Градуировка действительна для одной частоты, но ею можно пользоваться и на других частотах, так как фазовый сдвиг и частота пропорциональны друг другу. В фазовращателе, выполненном на искусственной линии, возможны погрешности фазового сдвига за счет собственной емкости катушек индуктивности и выходного напряжения за счет потерь. Большим достоинством таких фазовращателей является возможность плавного изменения фазового сдвига путем изменения тока подмагничивания катушек с ферромагнитными сердечниками.

### Контрольные вопросы

1. Расскажите, как выполняется измерение фазового сдвига осциллографическим методом, способом линейной развертки.
2. В чем заключается преимущество компенсационного метода?
3. Расскажите, как работает фазометр с преобразованием фазового сдвига в импульсы тока.

## ГЛАВА 12

# АВТОМАТИЗАЦИЯ РАДИОИЗМЕРЕНИЙ

---

### 12.1. Классификация автоматизированных средств измерений

К автоматизированным средствам измерений относят автономные непрограммируемые приборы и гибкие измерительные системы (ГИС). Автономные приборы работают по жесткой программе и предназначены для измерений определенных параметров сигналов или цепей. Как правило, это цифровые приборы, например вольтметры, в которых часть операций, таких, как определение полярности измеряемого постоянного напряжения или переключение диапазонов, осуществляется автоматически.

Основная особенность ГИС – возможность программным способом перестраивать систему для измерений различных физических величин и менять режим измерений. Никаких изменений в аппаратной части при этом не требуется. Различают ГИС с интерфейсом, микропроцессорные и компьютерно-измерительные.

Основной способ создания мощных многофункциональных ГИС – объединение с помощью специальной многопроводной магистрали в одну систему ЭВМ, измерительных приборов и устройств отображения информации. Такие системы называют измерительно-вычислительными комплексами (ИВК). Устройство сопряжения ЭВМ со средствами измерений называют приборным интерфейсом или просто интерфейсом. Иногда в это понятие вкладывают и программное обеспечение системы.

В микропроцессорных приборах все элементы подключают к магистрали микропроцессора, отдельной магистрали нет. Встроенные микропроцессоры обычно реализуют сервисные операции (выбор диапазона измерений), обеспечивают различные режимы измерений и вычисляют некоторые параметры сигнала.

В приборах рассматриваемого типа не предусматривается программирование микропроцессора в процессе эксплуатации. Необходимые программы обработки хранятся в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ), по мере надобности их вызывает оператор с помощью клавиатуры.

В наиболее совершенных микропроцессорных средствах измерений наметилась тенденция создания возможности составления оператором программ в дополнение хранящимся в ПЗУ программам. Наиболее ярко эта тенденция проявилась в новом поколении средств



измерений – КИС. Эти системы объединяют средства измерений, вычислений и управления на собственной шине микроЭВМ. Все функциональные элементы КИС удается разместить на одной или двух платах, встраиваемых в ЭВМ. С развитием средств вычислительной техники возможности КИС приближаются к возможностям ИВК, но превосходят последние по уровню интеграции и гибкости.

Как правило, ИВК строят по принципу агрегатирования, согласно которому системы создают из стандартных устройств – модулей, конструктивно законченных и выпускаемых серийно. При такой структуре система способна к быстрой перестройке в соответствии с изменившейся задачей. Для этого достаточно заменить часть модулей и изменить программное обеспечение. Такая система легко модернизируется, а ее разработка не требует большого времени.

Объединение устройств в единую систему возможно при выполнении условия их совместимости. Различают информационную, энергетическую и конструктивную совместимости.

Важнейшей является информационная совместимость. Она заключается в согласовании параметров сигнала устройств по видам, информативным параметрам и уровням. Информационная совместимость позволяет отдельным модулям обмениваться информацией в соответствии с заданным алгоритмом, а также различными служебными сигналами, например адресами и командами. Информационная совместимость необходима для реализации любого интерфейса.

Энергетическая совместимость заключается в согласовании напряжений и токов, питающих модули, и линий их передачи. Конструктивная совместимость заключается в конструктивном согласовании модулей, позволяющем использовать их совместно. Требования энергетической и конструктивной совместимости в разных интерфейсах существенно различаются.

В зависимости от задач ИВК, номенклатуры используемых средств измерений и их характеристик можно построить интерфейсы различной сложности с различными структурами. Создание интерфейсов для каждой задачи или групп задач экономически невыгодно, поэтому разработаны стандартные интерфейсы. В нашей стране принято несколько интерфейсов, в качестве примера рассмотрим интерфейс МЭК 625.1.

Эти интерфейсы относятся к числу магистральных, в которых все устройства подключены к общей магистрали. По отношению к магистрали модули могут быть источником информации или ее приемником. Источник предназначен только для передачи информации. В каждый момент в системе может быть только один источник. Приемник служит для приема информации, их может быть несколько.

Каждое устройство (источник или приемник) имеет свой адрес, по которому осуществляется его вызов для обмена информацией.

Адресацию устройств и управление их работой выполняет контроллер. Функции контроллера часто выполняет ЭВМ с интерфейсом.

Один и тот же прибор в системе может поочередно выполнять различные функции. Например, вольтметр на котором перед измерениями устанавливают нужный диапазон измерений, в это время является приемником. В ходе передачи результатов измерений вольтметр функционирует как источник информации.

Передача сообщений в интерфейсе может происходить синхронно или асинхронно. При синхронном методе ритм обмена информацией задается синхроимпульсами подобно тому, как это делается в микропроцессорах. Этот способ позволяет получить высокую скорость обмена, если все устройства характеризуются приблизительно равным и достаточно высоким быстродействием. Если же быстродействие устройств сильно различается, то предпочтителен асинхронный метод, при котором обязательным условием обмена является получение каждым из участвующих в обмене устройств подтверждения о готовности других устройств принимать или передавать информацию. Скорость обмена в этом случае определяется наименее быстродействующим устройством.

## **12.2. Интерфейс МЭК 625.1**

Интерфейс предназначен для создания небольших локальных ИВК на основе серийно выпускаемых промышленностью средств измерений: цифровых вольтметров, частотомеров, программируемых генераторов, в состав которых введены интерфейсные модули, позволяющие использовать средства измерений как в составе ИВК, так и автономно. Именно в возможности создания ИВК на базе уже имеющихся средств измерений заключается перспективность интерфейса и его широкое распространение.

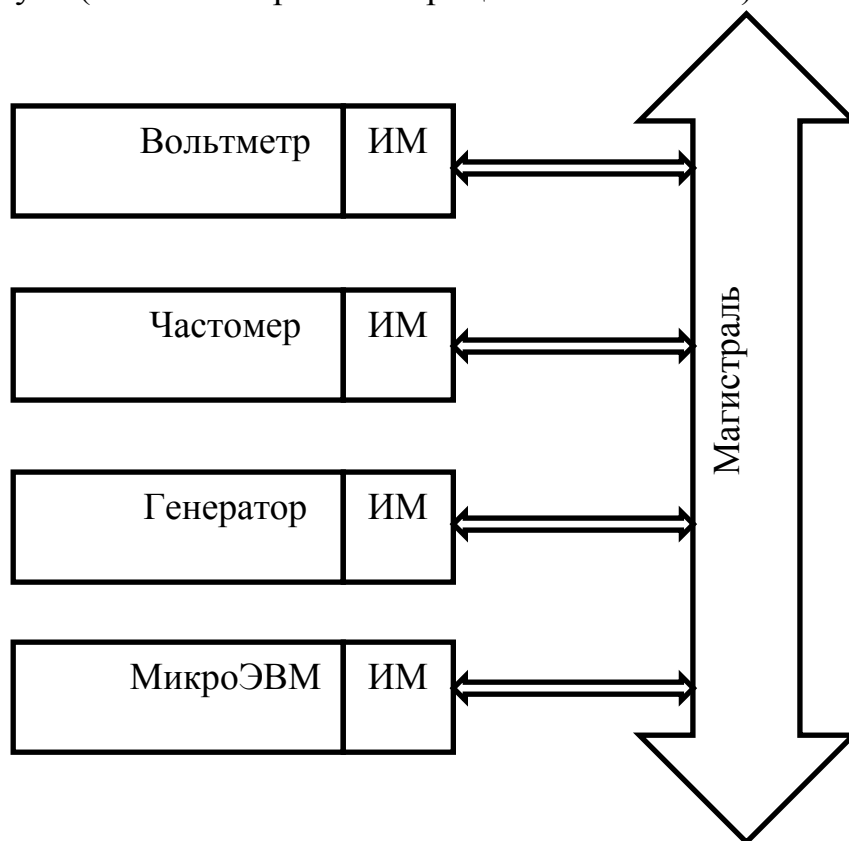
Если необходимые приборы с интерфейсными модулями уже имеются и можно выбрать ЭВМ, то создание аппаратной части ИВК заключается в соединении всех составных приборов с ЭВМ специальным кабелем со стандартным разъемом.

Интерфейс положен в основу единого агрегируемого комплекса автоматизированных средств измерительной техники (ЕАКАСИТ), принятому у нас в стране в радиотехнической отрасли.

Основы интерфейса были разработаны фирмой «Хьюлетт-Паккард», а затем стандарт был рекомендован Международной электротехнической комиссией (МЭК) в качестве международного.

Взаимодействие входящих в ИВК приборов осуществляется с помощью канала общего пользования (КОП), включающего интерфейсные модули (ИМ) и магистраль (рис. 12.1). К магистрали подключают устройства, например вольтметр, частотомер, генератор и микроЭВМ, снабженные интерфейсными модулями. По КОП передают

всю информацию, необходимую для согласования работы устройств: результаты измерений, адреса устройств, команды. Существуют однолинейные команды, передаваемые по одной линии, и многолинейные, для передачи которых используют сразу несколько линий. Информацию передают в двоичном коде: низкому уровню напряжения на линиях соответствует логическая единица, а высокому – логический нуль (в системе принята отрицательная логика).



*Рис. 12.1. Взаимодействие входящих в ИБК приборов*

Магистраль состоит из 16 однопроводных линий связи, которые по функциональному назначению делят на три шины: данных, управления и синхронизации. Шина данных объединяет восемь линий.

По ней передают результаты измерений, адреса и многолинейные команды. Одновременно по восьми линиям данных можно передать 8 бит информации – 1 байт.

Шина управления состоит из пяти линий: «управление» (УП), «конец передачи» (КП), «очистить интерфейс» (ОИ), «дистанционное управление» (ДУ) и «запрос на обслуживание» (ЗО). По шине управления передают сигналы, предназначенные для согласования работы устройств в рамках интерфейса.

Линия «управление» используется контроллером для определения вида сообщений, передаваемых по шине данных. Низкий уровень напряжения на линии свидетельствует о том, что передаются сообщения, предназначенные для управления интерфейсом и называемые интерфейсными. При высоком уровне передаются

сообщения устройств – данные о результате измерений, состоянии прибора, выбранном диапазоне измерений.

Линия «очистить интерфейс» управляется контроллером и предназначена для приведения интерфейса в исходное состояние. В режиме измерений контроллер поддерживает на линии высокий уровень напряжения, а перед проведением цикла измерений коротким импульсом отрицательной полярности контроллер переводит интерфейс в исходное состояние.

Линия «конец передачи» управляется источником информации. По окончании передачи данных источник устанавливает низкий уровень напряжения на линии, что свидетельствует о том, что все данные переданы.

Линия «дистанционное управление» управляется контроллером. При низком уровне устройство получает разрешение на переход с управления органами регулировки с лицевой панели (местное управление) на дистанционное управление по КОП.

Линия «запрос на обслуживание» управляется всеми устройствами. В обычном режиме на ней поддерживается высокий уровень напряжения. Когда один из приборов требует приоритетного обслуживания контроллером, то он устанавливает низкий уровень напряжения на линии. При этом прерывается текущий обмен информацией по магистрали и контроллер начинает работать с прибором, требующим обслуживания.

Шина синхронизации состоит из трех линий: «готов к приему», «данные приняты» и «сопровождение данных» и служит для организации асинхронного режима передачи и приема информации по линиям данных от источника к приемнику.

Интерфейс МЭК предназначен для создания небольших локальных ГИС, например, в рамках научных лабораторий. Он обеспечивает возможность согласованной работы входящих в систему устройств в соответствии с заложенной в ЭВМ программой.

К КОП можно подключить до 15 устройств. В зависимости от длины магистрали скорость передачи информации уменьшается с 1000 000 байт/с при длине 1 м до 250 000 байт/с для линии максимально допустимой длины 20 м. Реализовать такую скорость в системе не удастся из-за значительного времени, необходимого для организации работы интерфейса. Наибольшее время (до 100 мкс) может занимать реакция системы на сигнал «очистить интерфейс». Общее же время, необходимое для осуществления полного цикла обращения к прибору, может составлять до единиц миллисекунд.

Большая часть выпускаемых промышленностью средств измерений требует значительного времени для проведения одного измерения, составляющего от единиц миллисекунд до единиц секунд. Поэтому быстродействие системы, как правило, определяется не интерфейсом, а инерционностью применяемых средств измерений.

Для управления интерфейсом применяют микроЭВМ (Мэра-660, Искра-226, Нейрон), программируемые на языках высокого уровня. Для работы с интерфейсом существуют специальные версии языков, например Бейсик, дополненный необходимыми для работы с интерфейсом инструкциями.

### **12.3. Микропроцессорные средства измерений**

Микропроцессорная система может выполнять сервисные и вычислительные функции, а также самодиагностику прибора в целом.

К сервисным функциям относят выбор диапазона измерений, определение полярности входного напряжения, коммутацию входных цепей. В осциллографах автоматически выбирается длительность развертки, осуществляется ее синхронизация, выбор масштаба по оси ординат. К сервисным функциям можно отнести и некоторые операции по коррекции погрешностей: калибровку прибора, коррекцию смещения нулевого уровня в УПТ. Автоматическое выполнение сервисных функций делает прибор более удобным и избавляет оператора от некоторых рутинных операций по настройке прибора.

Вычислительные функции заключаются в статистической обработке результатов измерений: определении среднего значения и СКО. Существует возможность получения математических функций измеряемой величины: ее умножение и деление на константу, вычитание констант, что удобно при введении поправок, представлении измеряемой величины в логарифмическом масштабе. Заметим, что часть сервисных функций можно реализовать и без микропроцессора на жесткой логике, вычислительные же функции могут быть выполнены только с помощью микропроцессоров.

В некоторых микропроцессорных приборах осуществляется самодиагностика, что повышает их метрологическую надежность.

Микропроцессорные приборы позволяют решать программным методом часть задач, решаемых в обычных приборах аппаратными средствами. Например, для измерений амплитудного, средневыпрямленного и среднего квадратического значений напряжения аппаратными методами необходимы соответствующие преобразователи. Эту же задачу можно решить микропроцессорным прибором, преобразовав сначала аналоговый входной сигнал в цифровой с помощью АЦП, а затем по соответствующим программам вычислив требуемые параметры измеряемого сигнала. Возможности прибора можно расширить, нарастив программное обеспечение, например, введя программы для статистической обработки и спектрального анализа. При этом аппаратная часть, содержащая АЦП, не усложняется, а меняется только программное обеспечение.

Поэтому микропроцессорные приборы легче сделать многофункциональными, что позволит сократить парк средств измерений, необходимых для научных и производственных целей.

Однако использование микропроцессоров имеет и негативные стороны, в первую очередь сложность аппаратуры и довольно высокая стоимость ее. В перспективе, учитывая быстрое снижение цен на элементы микропроцессорных систем, можно ожидать значительного удешевления микропроцессорных приборов.

В некоторых случаях быстродействия АЦП и микропроцессора оказываются недостаточными для проведения измерений или расчетов в реальном масштабе времени. При этом иногда оказывается целесообразным применить масштабно-временное преобразование исследуемого сигнала, сделав его более медленным. Повышение быстродействия и разрядности выпускаемых промышленностью микропроцессоров расширяет возможности микропроцессорных приборов.

При разработке микропроцессорных приборов наиболее трудоемким оказывается программное обеспечение, стоимость которого может значительно превышать стоимость аппаратных средств.

### **12.3.1. Пример структурной схемы микропроцессорного прибора.**

Рассмотрим структурную схему вольтметра (рис. 12.2), на которой можно условно выделить три структурных элемента: функциональную часть, микропроцессорную систему и интерфейс.

Функциональная часть – это цифровой вольтметр, состоящий из входного устройства, аналого-цифрового преобразователя (АЦП), цифрового дисплея (отсчетного устройства), блока образцовых мер и клавиатуры, с помощью которой оператор управляет работой вольтметра. Элементы функциональной части соединены между собой и с микропроцессором с помощью устройства ввода-вывода.

Взаимодействие между устройствами ввода-вывода, микропроцессором, оперативным запоминающим устройством (ОЗУ) и постоянным запоминающим устройством (ПЗУ) осуществляется по линиям магистрали микропроцессора. Интерфейсный модуль (ИМ) предназначен для сопряжения прибора с магистралью интерфейса, например КОП.

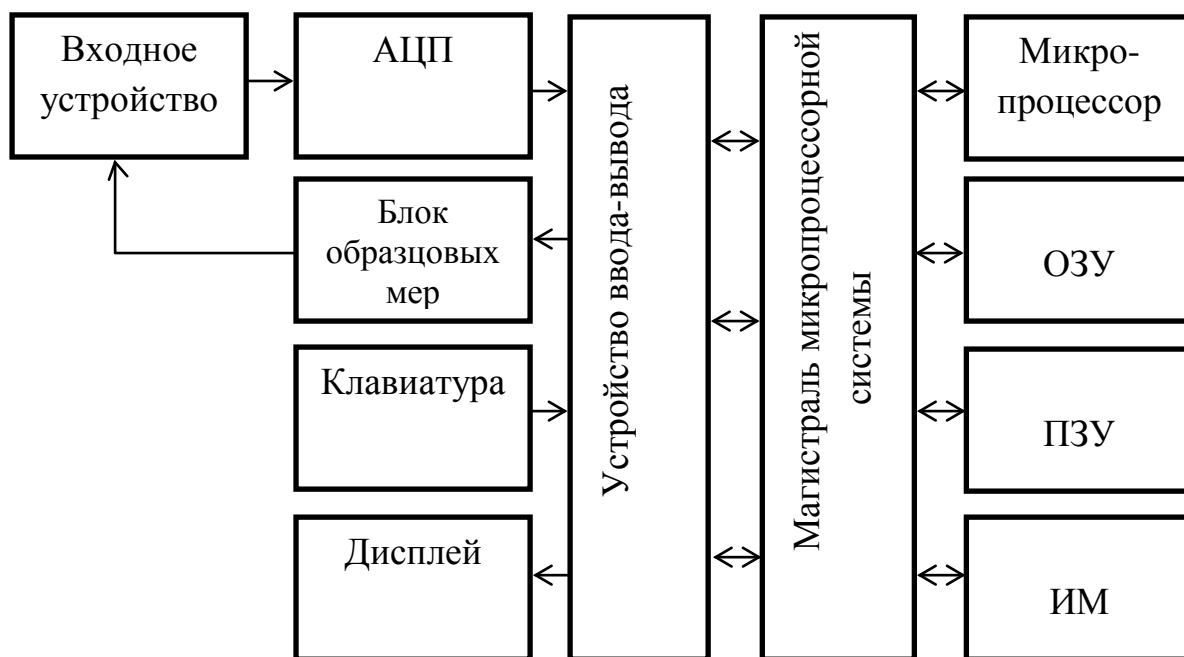


Рис. 12.2. Структурная схема вольтметра

## 12.4. Компьютерно-измерительные системы

Новый тип средств измерений – КИС – представляет собой микроЭВМ со встроенной в нее измерительной платой. В отличие от микропроцессорных приборов в КИС пользователь получает доступ к обширным фондам прикладных программ, может использовать внешнюю память большой емкости и различные устройства документирования результатов измерений.

Взаимодействие между отдельными элементами КИС осуществляется с помощью внутренней шины микроЭВМ (рис. 12.3), к которой подключены как внешние устройства ЭВМ (дисплей, внешняя память, печатающее устройство), так и измерительная схема, состоящая из коммутатора, АЦП и блока образцовых мер напряжения и частоты. С помощью ЦАП можно вырабатывать управляющие аналоговые сигналы, интерфейсный модуль подключает прибор к магистрали приборного интерфейса.

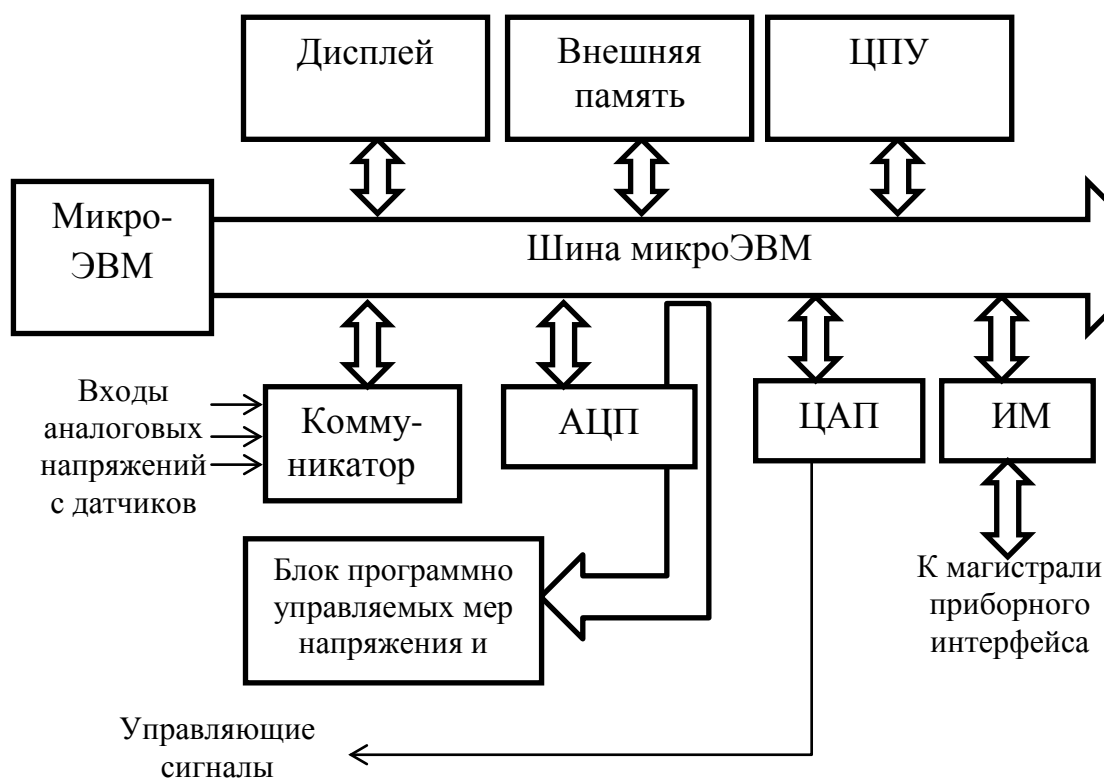


Рис. 12.3. Взаимодействие между отдельными элементами КИС

Измерительные схемы могут быть размещены на одной плате, встраиваемой в микроЭВМ. Существуют и более сложные структуры КИС, в которых в соответствии с решаемой задачей по программе коммутируются необходимые измерительные элементы, т. е. меняется архитектура.

Программы работы КИС заранее составляются и отлаживаются, но могут быть использованы программы, составленные оператором для решения конкретных задач.

Широкие вычислительные возможности КИС позволяют реализовать программными методами многие способы повышения точности измерений и повышения их эффективности. В качестве встроенных мер напряжения в КИС, как и в большинстве других измерительных приборов, используют стабилитроны, температурный коэффициент напряжения которых составляет около  $5 \cdot 10^{-5}$ . Обычный способ стабилизации опорного напряжения заключается в термостатировании блока стабилитронов. В термостате поддерживают температуру около 310 К со стабильностью 0,1 К. Недостатком такой схемы являются длительный прогрев термостата (до 1 ч), а также большие скачки температуры при включении термостата. Под влиянием температурных перепадов усиливается процесс старения стабилитронов, а, следовательно, снижается их долговременная стабильность.

В КИС появилась возможность учесть температурную нестабильность программными методами. Для этого в блок



стабилитронов вводят датчик температуры, например терморезистор, и экспериментально определяют зависимость опорного напряжения от температуры. Эту зависимость записывают в ПЗУ или во внешней памяти. В процессе эксплуатации прибора периодически измеряют температуру стабилитронов и по этой зависимости вводят поправку в значение образцового напряжения. При работе стабилитронов без дополнительного подогрева значительно возрастает их долговременная стабильность.

Подобным же образом измеряют и учитывают нестабильность частоты кварцевого генератора – меры частоты: сигнала с датчика температуры воздействует на варикап, подстраивающий генератор на номинальную частоту. Погрешность установки частоты может составлять до  $10^{-8}$ .

В КИС имеется возможность определять индивидуальные функции влияния температуры на различные параметры прибора: сопротивление переключателей, уход нуля, коэффициенты передачи различных структурных элементов. Непрерывный контроль температуры блоков позволяет корректировать возникающие погрешности.

Большие вычислительные возможности позволяют реализовать в КИС анализ полученной информации в ходе эксперимента и менять алгоритм обработки в зависимости от предварительных данных. Например, если полученная при эксперименте гистограмма, наблюдаемая оператором на дисплее, имеет выпавшие результаты и сглаженную форму, то можно предположить существование выбросов и наличие дрейфа измеряемой величины или погрешности. Для устранения выбросов можно использовать одну из статистических программ. Методом тренда можно сделать вывод о наличии дрейфа, а методом наименьших квадратов получить формулу, описывающую дрейф.

В ряде случаев, если вид математической модели исследуемого процесса задан, вычислительные методы позволяют сократить время измерений. Пусть, например, температура нагреваемого от источника постоянной мощности тела с начальной температурой изменяется по закону  $T = T_1 - (T_1 - T_0) * e^{-\frac{t}{\tau}}$ , где  $T_1$  – установившаяся температура,  $\tau$  – тепловая постоянная времени. В этом случае можно, не дожидаясь окончания процесса, определить две постоянные:  $T_1$  и  $\tau$ . Для этого в принципе достаточно двух измерений, а увеличив их число, можно применить метод наименьших квадратов и получить более точный результат.

Возможности КИС можно использовать для прогнозирования отказов некоторых элементов аппаратуры. Как известно, отказам некоторых элементов, например стабилитронов, предшествует увеличение шума. Шум возрастает при ухудшении качества контактов и

нарушении нормального режима работы кварцевых генераторов. Контроль спектра шума, выполняемого КИС, позволяет обнаружить перечисленные дефекты. По спектральным составляющим на частотах 50 и 100 Гц можно судить о качестве работы блоков питания.

Таким образом, компьютерно-измерительные системы имеют следующие преимущества:

- практически неограниченные возможности в решении прикладных задач измерений, таких как сбор информации с датчиков в любой последовательности и с желаемой скоростью опроса, управление технологическими процессами и промышленными агрегатами, а также возможность разработки программного обеспечения для конкретных задач измерений;
- подключение различных устройств и возможность организации документирования результатов измерений в различных табличных формах и графическом оформлении;
- передачу результатов измерений по локальным и глобальным компьютерным сетям, как это имеет место в сети Internet, и др.

Автоматизация измерений достигается сочетанием средств вычислительной техники и измерительных приборов. Задачу автоматизации решают как построением средств измерений со встроенными микропроцессорами, так и созданием автоматизированных систем научных исследований, включающих средства измерений, сопряженные с ЭВМ.

Измерительно-вычислительные комплексы допускают гибкое программирование эксперимента и обработки опытных данных, микропроцессорные средства измерений работают по жестким программам, составленным при разработке устройства.

Средства измерений и другие элементы в пределах ИВК сопрягаются стандартными интерфейсами.

Интерфейс МЭК 625-1 предназначен для создания небольших локальных ИВК на основе выпускаемых промышленностью средств измерений, снабженных интерфейсными картами. Достоинство интерфейса - невысокая цена создаваемых на его основе ИВК. На обращение к одному прибору расходуется до единиц миллисекунд, общее же быстродействие интерфейса определяется главным образом инерционными свойствами измерительных приборов. Передача данных происходит побайтно в асинхронном режиме.

Интерфейс КАМАК служит для построения мощных ИВК разной сложности, число крейтов в одной системе может достигать 62. Прием и передача данных осуществляются в параллельном двоичном коде в синхронном режиме, что обеспечивает высокое быстродействие интерфейса. Интерфейс КАМАК допускает подсоединение к крейту

цифровых и аналоговых средств измерений и работу совместно с интерфейсом МЭК.

### **Контрольные вопросы**

1. Расскажите, про интерфейс МЭК 625.1.
2. Приведите пример структурной схемы микропроцессорного прибора.
3. Что такое компьютерно-измерительные системы?

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

$$\text{Распределение Стьюдента } P\{|t| < t_p\} = 2 \int_0^{t_p} S(t; k) dt$$

**Значение коэффициента  $t_p$  для случайной величины, имеющей распределение Стьюдента с  $k = n - 1$  степенями свободы**

k	P											
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
1	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,656
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841
4	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032
6	0,131	0,265	0,404	0,543	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707
7	0,130	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499
8	0,130	0,262	0,399	0,546	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250
10	0,129	0,260	0,397	0,542	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169
11	0,129	0,260	0,396	0,540	0,129	0,260	0,396	0,540	1,796	2,201	2,718	3,106
12	0,128	0,259	0,395	0,539	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055
13	0,128	0,259	0,394	0,538	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012
14	0,128	0,258	0,393	0,537	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977
15	0,128	0,258	0,393	0,536	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947
16	0,128	0,258	0,392	0,535	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921
17	0,128	0,257	0,392	0,534	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831
22	0,127	0,256	0,390	0,532	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819
23	0,127	0,256	0,390	0,532	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807
24	0,127	0,256	0,390	0,531	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,707
25	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787
26	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779
27	0,127	0,256	0,389	0,531	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771
28	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763
29	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756
30	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750
∞	0,1256	0,2534	0,3853	0,5244	0,6745	0,8416	1,03643	1,2816	1,6449	1,9600	2,3263	2,5758

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Распределение Стьюдента

Значение  $P\{|t| < t_p\} = 2 \int_0^{t_p} S(t; k) dt$  для различных  $t_p$

k	$t_p$				k	$t_p$			
	2,0	2,5	3	3,5		2,0	2,5	3	3,5
1	0,7048	0,7578	0,7952	0,8229	12	0,9314	0,9720	0,9890	0,9956
2	0,8164	0,8764	0,9046	0,9276	13	0,9392	0,9737	0,9898	0,9960
3	0,8606	0,9122	0,9424	0,9606	14	0,9348	0,9740	0,9904	0,9964
4	0,8838	0,9332	0,9600	0,9752	15	0,9360	0,9754	0,9910	0,9968
5	0,8980	0,9454	0,9700	0,9828	16	0,9372	0,9764	0,9916	0,9970
6	0,9076	0,9534	0,9760	0,9872	17	0,9382	0,9770	0,9920	0,9872
7	0,9144	0,9590	0,9800	0,9900	18	0,9392	0,9776	0,9924	0,9974
8	0,9194	0,9630	0,9830	0,9920	19	0,9400	0,9782	0,9926	0,9976
9	0,9234	0,9662	0,9850	0,9932	20	0,9408	0,9788	0,9930	0,9978
10	0,9266	0,9686	0,9866	0,9942	$\infty$	0,9545	0,9876	0,9973	0,9995
11	0,9292	0,9704	0,9880	0,9950					

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Значения  $t_p$  при различных числах измерения  $n$

n	$q = 1 - P$				n	$q = 1 - P$			
	0,10	0,05	0,025	0,01		0,10	0,05	0,025	0,01
3	1,406	1,412	1,414	1,414	14	2,297	2,461	2,602	2,759
4	1,645	1,686	1,710	1,723	15	2,326	2,493	2,638	2,808
5	1,731	1,896	1,917	1,955	16	2,354	2,523	2,670	2,837
6	1,834	1,996	2,067	2,130	17	2,380	2,551	2,701	2,871
7	1,974	2,093	2,182	2,265	18	2,404	2,557	2,728	2,903
8	2,041	2,172	2,273	2,374	19	2,426	2,600	2,754	2,932
9	2,097	2,237	2,349	2,464	20	2,447	2,623	2,778	2,959
10	2,146	2,294	2,414	2,540	21	2,467	2,644	2,801	2,984
11	2,190	2,383	2,470	2,606	22	2,486	2,664	2,823	3,008
12	2,229	2,387	2,519	2,663	23	2,504	2,683	2,843	3,030
13	2,264	2,426	2,562	2,714	24	2,520	2,701	2,862	3,051
					25	2,537	2,717	2,880	3,071

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Интегральная функция  $\chi^2$  – распределения Пирсона

Значение  $\chi^2_{k;P}$  для различных k и P

k	P												
	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
1	0,00015	0,00062	0,0039	0,0158	0,0642	0,148	0,455	1,074	1,642	2,706	3,841	5,412	6,635
2	0,0201	0,0404	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386	2,408	3,219	4,605	5,991	7,824	9,210
3	0,115	0,185	0,352	0,584	1,005	1,424	2,366	3,665	4,642	6,251	7,815	9,837	11,345
4	0,297	0,429	0,711	1,064	1,649	2,195	3,357	4,878	5,989	7,779	9,488	11,668	13,277
5	0,554	0,752	1,145	1,61	2,343	3,000	4,351	6,064	7,289	9,236	11,070	13,388	15,086
6	0,872	1,134	1,635	2,204	3,070	3,828	5,348	7,231	8,558	10,645	12,592	15,033	16,812
7	1,239	1,564	2,167	2,833	3,822	4,671	6,346	8,383	9,803	12,017	14,067	16,622	18,475
8	1,646	2,032	2,733	2,490	4,594	5,527	7,344	9,524	11,030	13,362	15,507	18,168	20,090
9	2,088	2,532	3,325	4,168	5,380	6,393	8,343	10,656	12,242	14,684	16,919	19,679	21,666
10	2,558	3,059	3,940	4,865	6,179	7,267	9,342	11,781	13,442	15,987	18,307	21,161	23,209
11	3,053	3,609	4,575	5,578	6,989	8,148	10,341	12,899	14,631	17,275	19,675	22,618	24,725
12	3,571	4,178	5,226	6,304	7,807	9,034	11,340	14,011	15,812	18,549	21,026	24,054	26,217
13	4,107	4,765	5,982	7,042	8,634	9,926	12,340	15,119	16,985	19,812	22,362	25,472	27,688
14	4,660	5,368	6,571	7,790	9,467	10,821	13,339	16,222	18,151	21,064	23,685	26,873	29,141
15	5,229	5,985	7,261	8,547	10,307	11,721	14,339	17,322	19,311	22,307	24,996	28,259	30,578
16	5,812	6,614	7,962	9,312	11,152	12,624	15,338	18,418	20,465	23,542	26,296	29,633	32,000
17	6,408	7,255	8,072	10,085	12,002	13,531	16,338	19,511	21,615	24,769	27,587	30,995	33,409
18	7,015	7,906	9,390	10,865	12,857	14,44	17,338	20,601	22,760	25,989	28,869	32,346	34,805
19	7,633	8,567	10,117	11,651	12,716	15,352	18,338	21,869	23,900	27,204	30,144	33,687	36,191
20	8,260	9,237	10,851	12,444	14,587	16,266	19,337	22,775	25,038	28,412	31,410	35,020	37,566
21	8,897	9,915	11,591	13,240	15,455	17,182	20,337	23,858	26,171	29,615	32,671	36,343	38,932
22	9,542	10,600	12,338	14,041	16,314	18,101	21,337	24,939	27,301	30,813	33,924	37,659	40,289
23	10,196	11,293	13,091	14,484	17,187	19,021	22,337	26,018	28,429	32,007	35,172	38,968	41,638
24	10,856	11,992	13,848	15,659	18,062	19,943	23,337	27,196	29,553	33,196	36,415	40,270	42,980
25	11,524	12,697	14,611	16,473	18,940	20,867	24,337	28,172	30,675	34,382	37,652	41,566	44,314
26	12,198	13,409	15,379	17,292	19,820	21,792	25,336	29,246	31,795	35,563	38,885	42,856	45,642
27	12,879	14,125	16,151	18,114	20,703	22,710	26,336	30,319	32,912	36,741	40,113	44,140	46,963
28	13,565	14,847	16,928	18,939	21,588	23,647	27,336	31,319	34,027	37,916	41,337	45,419	48,278
29	14,256	15,574	17,708	19,768	22,475	24,577	28,336	32,461	35,139	39,087	42,557	46,693	49,588
30	14,953	16,306	18,493	20,599	23,364	25,508	29,336	33,530	36,250	40,256	43,773	47,962	50,892

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

### Интегральная функция нормированного нормального распределения

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

Z	0,08	0,06	0,04	0,02	0
-3,5	0,00017	0,00019	0,0002	0,00022	0,00023
-3,4	0,00025	0,00027	0,00029	0,00031	0,00034
-3,3	0,00036	0,00039	0,00042	0,00045	0,00048
-3,2	0,00052	0,00056	0,0006	0,00064	0,00069
-3,1	0,00074	0,00079	0,00085	0,0009	0,00097
-3	0,00104	0,00111	0,00118	0,00126	0,00135
-2,9	0,0014	0,0015	0,0016	0,0017	0,0019
-2,8	0,002	0,0021	0,0023	0,0024	0,0026
-2,7	0,0027	0,0029	0,0031	0,0033	0,0035
-2,6	0,0037	0,0039	0,0041	0,0044	0,0047
-2,5	0,0049	0,0052	0,0055	0,0059	0,0062
-2,4	0,0066	0,0069	0,0073	0,0078	0,0082
-2,3	0,0087	0,0091	0,0096	0,0102	0,0107
-2,2	0,0113	0,0119	0,0125	0,0132	0,0139
-2,1	0,0146	0,0154	0,0162	0,017	0,0179
-2	0,0188	0,0197	0,0207	0,0217	0,0228
-1,9	0,0239	0,025	0,0262	0,0274	0,0287
-1,8	0,0301	0,0314	0,0329	0,0344	0,0359
-1,7	0,0375	0,0392	0,0409	0,0427	0,0446
-1,6	0,0465	0,0485	0,0505	0,0526	0,0548
-1,5	0,0571	0,0594	0,0618	0,0643	0,0668
-1,4	0,0694	0,0721	0,0749	0,0778	0,0808
-1,3	0,0838	0,0869	0,0901	0,0934	0,0968
-1,2	0,1003	0,1038	0,1075	0,1112	0,1151
-1,1	0,119	0,123	0,1271	0,1314	0,1357
-1	0,1401	0,1446	0,1492	0,1539	0,1587
-0,9	0,1635	0,1685	0,1736	0,1788	0,1841
-0,8	0,1894	0,1949	0,2005	0,2061	0,2119
-0,7	0,2177	0,2236	0,2297	0,2358	0,242
-0,6	0,2483	0,2546	0,2611	0,2676	0,2743
-0,5	0,281	0,2877	0,2946	0,3015	0,3085
-0,4	0,3156	0,3228	0,33	0,3372	0,3446
-0,3	0,352	0,3594	0,3669	0,3745	0,3821
-0,2	0,3897	0,3974	0,4052	0,4129	0,4207
-0,1	0,4286	0,4364	0,4443	0,4522	0,4602
0	0,4681	0,4761	0,484	0,492	0,5



Продолжение таблицы

Z	0	0,02	0,04	0,06	0,08
0	0,5	0,508	0,516	0,5239	0,5319
0,1	0,5398	0,5478	0,5557	0,5636	0,5714
0,2	0,5793	0,5871	0,5948	0,6026	0,6103
0,3	0,6179	0,6225	0,6331	0,6406	0,648
0,4	0,6554	0,6628	0,67	0,6772	0,6844
0,5	0,6915	0,6985	0,7054	0,7123	0,719
0,6	0,7257	0,7324	0,7389	0,7454	0,7517
0,7	0,758	0,7642	0,7704	0,7764	0,7823
0,8	0,7881	0,7939	0,7995	0,8051	0,8106
0,9	0,8159	0,8212	0,8264	0,8315	0,8365
1	0,8413	0,8461	0,8505	0,8554	0,8599
1,1	0,8643	0,8686	0,8729	0,877	0,881
1,2	0,8849	0,8888	0,8925	0,8962	0,8997
1,3	0,9032	0,9066	0,9099	0,9131	0,9162
1,4	0,9192	0,9222	0,9251	0,9279	0,9306
1,5	0,9332	0,9357	0,9382	0,9406	0,9429
1,6	0,9452	0,9474	0,9495	0,9515	0,9535
1,7	0,9554	0,9573	0,9591	0,9608	0,9625
1,8	0,9641	0,9656	0,9671	0,9686	0,9699
1,9	0,9713	0,9726	0,9738	0,975	0,9761
2	0,9773	0,9783	0,9793	0,9803	0,9812
2,1	0,9821	0,983	0,9838	0,9846	0,9854
2,2	0,9861	0,9868	0,9875	0,9881	0,9887
2,3	0,9893	0,9898	0,9904	0,9909	0,9913
2,4	0,9918	0,9922	0,9927	0,9931	0,9934
2,5	0,9938	0,9941	0,9945	0,9943	0,9951
2,6	0,9953	0,9956	0,9959	0,9961	0,9963
2,7	0,9965	0,9967	0,9969	0,9971	0,9973
2,8	0,9974	0,9976	0,9977	0,9979	0,998
2,9	0,9981	0,9983	0,9984	0,9985	0,9986
3	0,99865	0,99874	0,99882	0,99889	0,99896
3,1	0,99903	0,9991	0,99915	0,99921	0,99926
3,2	0,99931	0,99936	0,9994	0,99954	0,99948
3,3	0,99952	0,99955	0,99958	0,99961	0,99964
3,4	0,99966	0,99969	0,99971	0,99973	0,99975
3,5	0,99977	0,99978	0,9998	0,99981	0,99983



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

---

## **КАФЕДРА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И БЕЗОПАСНОСТИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ**

**1945–1966 РЛПУ (кафедра радиолокационных приборов и устройств).** Решением Советского правительства в августе 1945 г. в ЛИТМО был открыт факультет электроприборостроения. Приказом по институту от 17 сентября 1945 г. на этом факультете была организована кафедра радиолокационных приборов и устройств, которая стала готовить инженеров, специализирующихся в новых направлениях радиоэлектронной техники, таких как радиолокация, радиоуправление, теленавешение и др. Организатором и первым заведующим кафедрой был д. т. н., профессор С. И. Зилитинкевич (до 1951 г.). Выпускникам кафедры присваивалась квалификация инженер-радиомеханик, а с 1956 г. - радиоинженер (специальность 0705).

В разные годы кафедрой заведовали доцент Б. С. Мишин, доцент И. П. Захаров, доцент А. Н. Иванов.

**1966–1970 КиПРЭА (кафедра конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры).** Каждый учебный план специальности 0705 коренным образом отличался от предыдущих планов радиотехнической специальности своей четко выраженной конструкторско-технологической направленностью. Оканчивающим институт по этой специальности присваивалась квалификация инженер-конструктор-технолог РЭА.

Заведовал кафедрой доцент А. Н. Иванов.

**1970–1988 КиПЭВА (кафедра конструирования и производства электронной вычислительной аппаратуры).** Бурное развитие электронной вычислительной техники и внедрение ее во все отрасли народного хозяйства потребовали от отечественной радиоэлектронной промышленности решения новых ответственных задач. Кафедра стала готовить инженеров по специальности 0648. Подготовка проводилась по двум направлениям - автоматизация конструирования ЭВА и технология микроэлектронных устройств ЭВА.

Заведовали кафедрой: д. т. н., проф. В. В.Новиков (до 1976 г.), затем проф. Г. А. Петухов.

**1988–1997 МАП (кафедра микроэлектроники и автоматизации проектирования).** Кафедра выпускала инженеров, конструкторов, технологов по микроэлектронике и автоматизации проектирования вычислительных средств (специальность 2205). Выпускники этой кафедры имеют хорошую технологическую подготовку и успешно работают как в производстве полупроводниковых интегральных микросхем, так и при их проектировании, используя современные методы автоматизации проектирования. Инженеры специальности 2205 требуются микроэлектронной промышленности и предприятиям-разработчикам вычислительных систем.

Кафедрой с 1988 г. по 1992 г. руководил проф.С. А. Арустамов, затем снова проф. Г. А. Петухов.

**С 1997 ПКС (кафедра проектирования компьютерных систем).** Кафедра выпускает инженеров по специальности 210202 «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств». Область профессиональной деятельности выпускников включает в себя проектирование, конструирование и технологию электронных средств, отвечающих целям их функционирования, требованиям надежности, проекта и условиям эксплуатации. Кроме того, кафедра готовит специалистов по защите информации, специальность 090104 «Комплексная защита объектов информатизации». Объектами профессиональной деятельности специалиста по защите информации являются методы, средства и системы обеспечения защиты информации на объектах информатизации.

С 1996 г. кафедрой заведует д. т. н., профессор Ю.А. Гатчин. За время своего существования кафедра выпустила 4364 инженеров. На кафедре защищено 65 кандидатских и 10 докторских диссертаций.

Выпускники кафедры работают в ведущих научных центрах и учебных заведениях России, Европы, Азии и Америки в промышленных и коммерческих фирмах, лабораториях и кафедрах университета.

В настоящее время кафедра является одним из ведущих российских научных и образовательных центров, ориентированным на фундаментальные и прикладные исследования в области микроэлектроники и САПР, подготовку высококвалифицированных специалистов XXI века.

**С 2011 ПБКС (кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем).**

Приказом №527-од от 07.10.2011 кафедра проектирования компьютерных систем переименована в кафедру проектирования и безопасности компьютерных систем (сокращенно — ПБКС).

По направлению «Информационная безопасность» кафедра готовит:

- бакалавров по профилю: 090900.62 «Комплексная защита объектов информатизации» срок обучения на базе среднего (полного) общего образования и среднего специального образования 4 года (очная) и 4 года (вечерняя);
- магистров по программе 090900.68 «Проектирование комплексных систем информационной безопасности» срок обучения 2 года.

По направлению «Конструирование и технология электронных средств» кафедра готовит:

- бакалавров по профилю: 211000.62 «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств» срок обучения на базе среднего (полного) общего образования и среднего специального образования 4 года (очная) и 4 года (вечерняя);
- магистров по программе 211000.68 «Технология и инструментальные средства проектирования электронных систем» срок обучения 2 года.
- магистров по программе 211000.68 «Проектирование электронных средств в защищенной интегрированной среде» срок обучения 2 года.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткалич В.Л., Лабковская Р.Я. Обработка результатов технических измерений: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 72 с.
2. Канке А.А., Кошева И.П. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник, ВУЗ. – Издательство: Форум, Инфра-М, 2010. – 416 с.
3. Марусина М.Я., Воронцов Е.А., Казначеева А.О., Скалецкая Н.Д. Методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы студентов по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация». – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 49 с.
4. Скалецкая Н.Д. Практические занятия по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация». – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 40 с.
5. Кузнецов В.И. Радиосвязь в условиях радиоэлектронной борьбы. – Воронеж.: ВНИИС, 2002. – 403 с.
6. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для вузов. – СПб: Питер, 2010. – 464 с.
7. Белобрагин, В.Я. Основы технического регулирования: учебное пособие для вузов. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2005. – 319 с.
8. Ким К.К. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника. – СПб: Питер, 2006. – 367 с.
9. Сергеев А.Г., Латышев М.В. Метрология. Стандартизация. Сертификация: учебное пособие для вузов. – М.: ЛОГОС, 2005. – 559 с.
10. Дворяшин Б.В. Метрология и радиоизмерения: Учебное пособие для студентов ВУЗов. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.
11. Клевлеев В.М. и др. Метрология, стандартизация и сертификация: Учебник – М.: ИНФРА-М, 2004. – 256 с.
12. Заляева Г. О. Метрология, стандартизация и сертификация: Учебно-методическое пособие (практикум). – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2006. – 124 с.

13. Гончаров А. А. Метрология, стандартизация и сертификация: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. – М.: Академия, 2008. – 240 с.
14. Схиртладзе А. Г., Радкевич Я. М. Метрология, стандартизация и технические измерения. – Старый Оскол: ТНТ, 2010. – 420 с.
15. А. Г. Сергеев, В. В. Крохин Метрология. – М.: «Логос», 2001. – 408 с.
16. Новиков Г. А. Основы метрологии / Учеб. пособие – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 182 с.
17. Горбоконенко, В. Д. Метрология в вопросах и ответах / В. Д. Горбоконенко, В. Е. Шикина – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 196 с.
18. Анцыферов С. С., Голубь Б. И. Общая теория измерений: Учебное пособие. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 176 с.
19. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. – СПб: Питер, 2010. – 192 с.
20. Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации и метрологии. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 479с.
21. Кушнир Ф.В. Электрорадиоизмерения. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320с.
22. Мирский Г.Я. Микропроцессоры в измерительных приборах. – М.: Радио и связь, 1984. – 160с.
23. Мирский Г.Я. Электронные измерения. – М.: Радио и связь, 1986. – 440 с.
24. ГОСТ 16263-70 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения».
25. ГОСТ 8.011-72 «Государственная система обеспечения единства измерений. Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений».

Римма Яновна Лабковская

**Метрология и электрорадиоизмерения**

Учебное пособие

В авторской редакции

Р.Я. Лабковская

Дизайн обложки

Р.Я. Лабковская

Компьютерный набор и вёрстка

Р.Я. Лабковская

Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе





**Редакционно-издательский отдел**  
Санкт-Петербургского национального  
исследовательского университета  
информационных технологий, механики  
и оптики  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

