

## Оглавление

<b>Аннотация</b> .....	2
<b>Введение</b> .....	3
<b>1. Цепи постоянного тока</b> .....	4
1.1. Измерение тока .....	4
1.2. Измерение постоянного напряжения.....	8
1.3. Измерение мощности в цепях постоянного тока .....	10
1.4. Измерение активного сопротивления.....	12
<b>2. Цепи переменного и импульсного тока</b> .....	15
2.1. Типы сигналов и их параметры.....	15
2.2. Измерение действующего значения тока.....	17
2.3. Измерение действующего значения напряжения.....	19
2.4. Измерение активной мощности в однофазной цепи.....	20
2.5. Измерение частоты колебаний и периода следования импульсов .....	21
2.6. Измерение разности фаз сигналов .....	24
2.7. Измерение комплексного сопротивления участка цепи.....	25
<b>3. Основные приемы работы с измерительными приборами</b> .....	28
3.1. Подключение приборов .....	28
3.2. Снятие показаний с приборов стрелочного типа .....	28
3.3. Особенности проведения осциллографических измерений.....	28
3.4. Краткие сведения о погрешностях измерений .....	29
3.5. Практические советы по применению измерительных приборов.....	32
<b>Контрольные вопросы</b> .....	34
<b>Приложение</b> .....	36
<b>Литература</b> .....	37

## **Аннотация**

Изложены основные методы измерения электрических величин в цепях постоянного, переменного и импульсного тока. Подробно изложены особенности этих методов измерений и способы их практической реализации с помощью различных средств измерений. Приведены основные сведения о источниках погрешностей измерений, а также практические советы по применению измерительных приборов.

Для студентов приборостроительных специальностей, изучающих курсы «Теория электрических цепей», «Теоретические основы электротехники», «Электротехника».

## **Введение**

Задача измерения электрических величин в электротехнике многопланова: разработчику аппаратуры или исследователю необходимо, во-первых, определить совокупность физических явлений, которые можно использовать для получения оценок этих величин. Во-вторых, нужно проанализировать преимущества и проблемы практической реализации того или иного метода измерений и, наконец, выбрать конкретный способ измерений и соответствующие средства измерений, которые позволят наилучшим образом решить задачу.

Разнообразие измерительных приборов – как универсальных, так и специализированных, обеспечивающих получение результата с известной погрешностью в различных условиях их применения, вызывает трудности при построении измерительных схем даже у опытных специалистов. Для тех же, кто впервые знакомится с этой проблемой, важно понять основные принципы функционирования измерительных приборов и знать особенности их применения (как правило, большинство из них получили названия в соответствии с названиями измеряемых величин – амперметр, вольтметр, ваттметр, омметр, хотя есть и осциллограф и авометр – универсальный прибор, обеспечивающий измерение токов, напряжений и сопротивлений).

Для более подробного изучения вопроса следует воспользоваться специальной литературой – например, справочными изданиями и учебниками, перечисленными в разделе «Литература».

## 1. Цепи постоянного тока

В физике под постоянным электрическим током понимают упорядоченное направленное движение электрических частиц. Электрические цепи, в которых величина тока не изменяется во времени, называют цепями постоянного тока. Как называется цепь, ток в которой не протекает?

### 1.1. Измерение тока

Величина непосредственно измеряема. Единица измерения в системе СИ – Ампер [A].

Исторически первым и наиболее широко распространенным до настоящего времени является метод измерения величины постоянного тока путем оценки степени взаимодействия магнитного поля, создаваемого проводником, по которому протекает ток, и магнитного поля с известной индукцией. Этот метод измерения называют прямым.

Косвенный метод измерения тока основан на измерении падения напряжения на образцовом сопротивлении, включаемом в разрыв цепи. Очевидно, что в этом случае свойства цепи несколько изменяются. В целях обеспечения минимального влияния на величину протекающего в цепи тока величина образцового сопротивления должна выбираться малой.

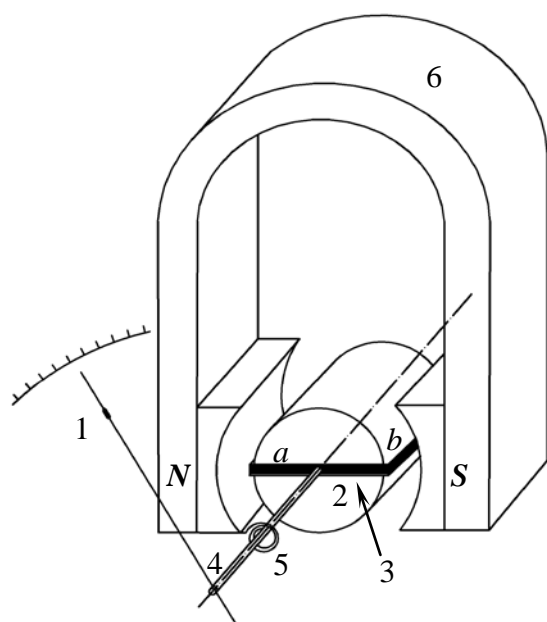


Рис. 1.1 – Магнитоэлектрический механизм

#### Стрелочный амперметр магнитоэлектрического типа

Основа такого прибора – магнитоэлектрический механизм (рис. 1.1), обеспечивающий изменение угла поворота указательной стрелки (1), соединенной с диамагнитной рамкой (2) при изменении тока в проводнике (3), намотанном на эту рамку. Через рамку, стороны которой обозначим  $a$  и  $b$ , проходит ось (4), к которой прикреплена спиральная пружина (5), создающая возвратный момент при повороте рамки (эта пружина также выполняет роль гибкой токоведущей шины). Рамка находится в магнитном поле с индукцией  $B$ , создаваемом постоянным магнитом (6). В результате протека-

ния тока  $I$  через  $w$  витков проводника (3), размещенных на рамке, к каждой ее стороне  $b$  оказывается приложена сила Ампера

$$F_A = bIBw \quad (1.1)$$

и возникает вращающий момент

$$M = 2F_A \cdot a/2. \quad (1.2)$$

Рамка будет поворачиваться вокруг своей оси до тех пор, пока не выполнится условие

$$M = \alpha C_s,$$

где  $\alpha$  – угол поворота рамки относительно начального положения,  $C_s$  – удельный момент противодействия пружины. Таким образом, угол поворота рамки пропорционален величине протекающего через проводник тока:

$$\alpha = bBwI / C_s.$$

При использовании приборов магнитоэлектрического типа следует соблюдать полярность их подключения – протекание значительного тока в обратном направлении может привести к деформации стрелки. Эти приборы также не могут быть использованы для измерений, если ток  $I$  меняет свою величину с частотой, большей нескольких десятков Гц – из-за наличия собственного момента инерции рамка может остаться неподвижной даже при наличии переменной составляющей тока значительной амплитуды.

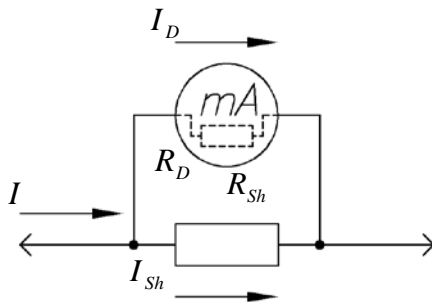


Рис. 1.2 – Схема включения шунта

мерений, если ток  $I$  меняет свою величину с частотой, большей нескольких десятков Гц – из-за наличия собственного момента инерции рамка может остаться неподвижной даже при наличии переменной составляющей тока значительной амплитуды.

Пределы измерения таких приборов обычно не превышают 10...30 мА. Для расширения пределов измерений применяют шунт – низкоомное высокоточное сопротивление  $R_{sh}$ , включаемое в разрыв цепи,

к которому подключается измерительный магнитоэлектрический механизм – рис. 1.2. В этом случае ток  $I_D$ , протекающий через измерительный прибор, оказывается в  $n$  раз меньшим, чем измеряемый ток  $I$ :  $n = (R_D + R_{sh}) / R_{sh}$ , где  $R_D$  – внутренне сопротивление прибора, определяемое суммой активных сопротивлений провода, намотанного на рамку магнитоэлектрического механизма прибора, и токоподводящих шин. Очевидно, что  $I = I_D + I_{sh}$ ,  $R_{sh} = R_D / (n - 1)$  и, следовательно, должно выполняться условие  $R_{sh} \ll R_D$ .

Поскольку амперметры включаются в разрыв цепи, основное требование к этим приборам – обеспечение минимальной величины внутреннего сопротивления  $R_D$  в целях минимизации вносимых погрешностей измерений.

### Амперметр с датчиком на основе эффекта Холла

Эффект Холла – явление возникновения разности потенциалов на краях поперечного сечения проводника с протекающим в нем током, наблюдающееся при помещении этого проводника в магнитное поле. Открыт в 1879 г. американским физиком Эдвином Г. Холлом в тонких пластинках золота. Эффект основан на отклонении траектории движения носителей заряда от прямолинейной за счет воздействия на них силы Лоренца: в результате такого движения заряженных частиц у одной боковой грани проводника скапливаются положительно заряженные частицы, а у противоположной грани – отрицательно заряженные и возникает разность потенциалов, которую называют холловским напряжением.

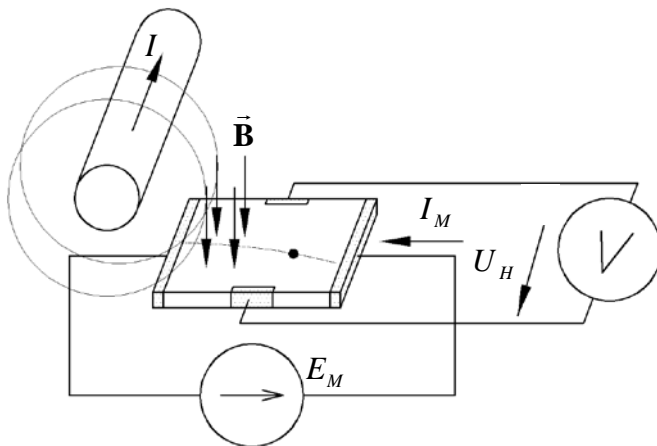


Рис. 1.3. Измерение тока  $I$  в проводнике с помощью датчика Холла

Важным преимуществом амперметра с датчиком на основе эффекта Холла является малая величина внутреннего сопротивления такого прибора, которое определяется собственным сопротивлением отрезка проводника, по которому протекает ток  $I$ .

### Цифровой амперметр

Развитие микроэлектроники способствовало широкому распространению измерительных приборов с цифровой индикацией результата измерений. Эти приборы получили название цифровых измерительных приборов. Они, как правило, содержат преобразователь измеряемой величины в аналоговый электрический сигнал, аналого-цифровой преоб-

Поскольку протекание тока через проводник сопровождается возникновением магнитного поля ( $|\vec{B}| \sim I$ ), установив рядом с проводником датчик на основе эффекта Холла (часто говорят – «датчик Холла»), по величине холловского напряжения  $U_H$  можно судить о напряженности магнитного поля и, следовательно, о величине тока в проводнике  $I$  – рис. 1.3. Важным преимуществом амперметра с датчи-

разователь (АЦП), обеспечивающий преобразование величины напряжения  $U_{reg}$  на его входе в двоичный цифровой код, соответствующий этой величине, и цифро-знаковый дисплей, на котором отображаются результаты измерений. Структурная схема простейшего цифрового амперметра, реализующего косвенный метод измерения тока, представлена на рис. 1.4. В качестве преобразователя измеряемой величины в аналоговый электрический сигнал используется высокоточный низкоомный резистор  $R_0$ , величина которого составляет доли Ома, а максимальная рассеиваемая мощность выбрана такой, чтобы при протекании через него максимально допустимого измеряемого тока сопротивление нагревалось незначительно. Выполнение условия ограниченного нагрева резистора необходимо для обеспечения постоянства погрешности измерений тока.

Следует различать элементы электрических схем (сопротивление, индуктивность, емкость), характеристики которых считаются идеальными, и компоненты электрических цепей (резистор, катушка индуктивности, конденсатор). Поэтому следует учитывать, что сопротивление резистора и емкость конденсатора зависят от температуры окружающей среды, проводимость конденсатора и омическое сопротивление катушки индуктивности отличны от нуля и т.п.

Если температура резистора  $R_0$  неизменна, то  $U_{reg} = I \cdot R_0$ . Если резистор  $R_0$  нагревается от температуры  $T_0$  до некоторой температуры  $T$ ,  $U_{reg} = I \cdot (R_0 + R_0 \alpha_T (T - T_0))$ , где  $\alpha_T$  – температурный коэффициент сопротивления [ $K^{-1}$ ], определяемый материалом, из которого изготовлен резистор. Очевидно, что во втором случае возникнет дополнительная погрешность оценки величины тока, протекающего через резистор.

Прибор такого типа нуждается в применении внешнего дополнительного источника электрической энергии – батареи, аккумулятора или электросети.

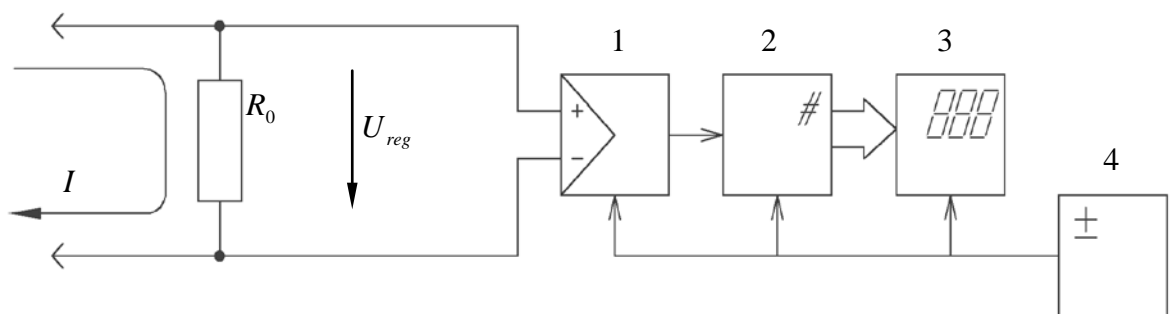


Рис. 1.4. Структурная схема цифрового амперметра: 1 – усилитель напряжения; 2 – АЦП; 3 – цифровой индикатор; 4 – источник питания

## 1.2. Измерение постоянного напряжения

Величина непосредственно измеряема. Единица измерения в системе СИ – Вольт [В]. Напомним, что под напряжением между двумя точками цепи понимают разность потенциалов между этими точками.

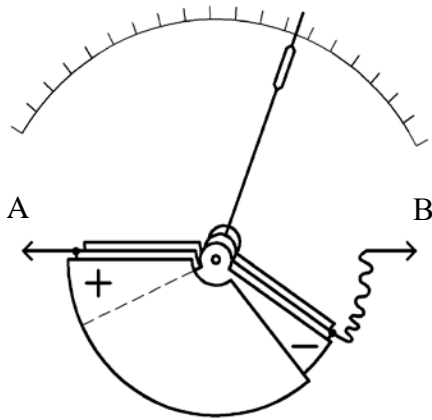


Рис. 1.5. Электростатический стрелочный вольтметр

### Электростатический вольтметр

Прибор, позволяющий измерить разность потенциалов, характеристики которого с точки зрения отсутствия влияния на измеряемую цепь близки к идеальным – электростатический вольтметр. Этот прибор содержит смонтированные в диэлектрическом корпусе электроды – подвижный и неподвижный. Один электрод подключается к точке А цепи, другой – к точке В (рис. 1.5). В результате накопления на одном электроде положительных зарядов, а на другом – отрицательных, взаимодействие между

которыми описывается законом Кулона, наблюдается перемещение подвижного электрода до достижения условия равновесия – равенства нулю моментов всех действующих на него сил. Положение механически соединенной с подвижным электродом стрелки прибора позволяет определить разность потенциалов  $U_{AB}$ . Такие приборы имеют невысокую чувствительность и широкого распространения из-за этого не получили, однако они позволяют с высокой точностью измерять напряжение в высоковольтных цепях.

### Стрелочный вольтметр магнитоэлектрического типа

Принцип действия такого прибора основан на использовании закона Ома. К точкам электрической цепи, разность потенциалов между которыми должна быть измерена, подключаются последовательно соединенные образцовое сопротивление  $R_a$  (которое обычно называют добавочным) и магнитоэлектрический измеритель тока – рис. 1.6. Величина тока

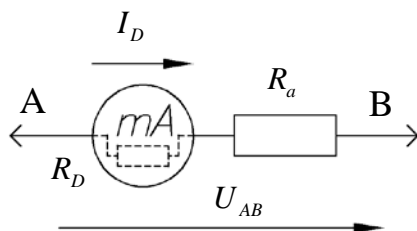


Рис. 1.6. Стрелочный вольтметр магнитоэлектрического типа

ка  $I_D$  в измерительной цепи определяется выражением

$$I_D = \frac{U_{AB}}{R_a + R_D},$$

где  $R_D$ , как и ранее, сопротивление обмоточного провода рамки и токоведущих шин магнитоэлектрического механизма. Поскольку угол отклонения его



стрелки пропорционален величине тока  $I_D$ , а  $R_D \ll R_a$ , можно считать, что  $I_D = U_{AB} / R_a$ , т.е. угол отклонения стрелки будет пропорционален измеряемому напряжению. Величину  $R_a$  определяют из условия обеспечения отклонения стрелки до последнего деления шкалы при измерении величины  $U_{AB}$ , взятой из стандартного ряда значений (0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 100 В).

Отметим, что прибор такого типа всегда влияет на режим работы основной цепи, к которой он подключается. Для уменьшения степени его влияния величина  $R_a$  должна быть на несколько порядков больше эквивалентного сопротивления  $R_{AB}$  участка основной цепи. Как правило, это условие уверенно выполняется, если ток  $I_{D \max}$ , обеспечивающий отклонение стрелки прибора до последнего деления шкалы, составляет несколько десятков мкА. Величину  $S = 1 / I_{D \max}$  [кОм/В] называют чувствительностью прибора. Она определяет величину добавочного сопротивления  $R_a$  на каждый вольт измеряемого напряжения  $U_{AB}$ . Чувствительность серийно выпускаемых вольтметров часто составляет 20 кОм/В.

Стрелочные приборы такого типа получили наибольшее распространение в измерительной практике из-за своей простоты и надежности. Как правило, резистор  $R_a$  монтируется в корпусе магнитоэлектрического механизма и измерительная головка может быть непосредственно подключена к электрической цепи (об этом свидетельствует специальный значок, наносимый на шкалу прибора – см. Приложение).

Для расширения диапазона измеряемых напряжений часто используют резистивный делитель напряжения – рис. 1.7. Если выход делителя не нагружен, то коэффициент передачи  $K$  определяется выражением:

$$K = U_{out} / U_{AB} = R_2 / (R_1 + R_2).$$

На практике часто используют понятие коэффициента деления  $n$ , определяемого как  $n = 1 / K$ . При подключении к выходу делителя вольтметра с эквивалентным сопротивлением  $R_a \gg R_D$ , можно считать, что  $n = 1 + \frac{R_1}{R_2} \left( 1 + \frac{R_2}{R_a} \right)$ , и, выбрав соответствующие значения  $R_1$  и  $R_2$ , выполнить измерение

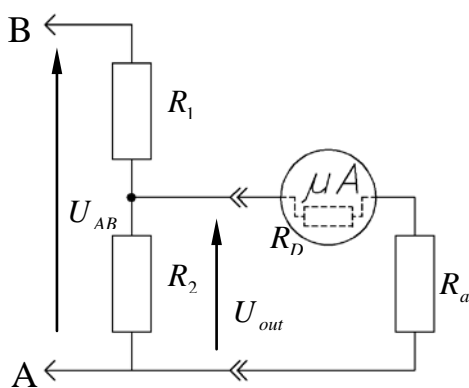


Рис. 1.7. Схема подключения резистивного делителя

напряжения  $U_{AB}$  вольтметром, верхнее значение рабочего диапазона которого меньше  $U_{AB}$ .

### Цифровой вольтметр

Входной аттенюатор такого прибора (рис. 1.8) обеспечивает высокоточное масштабирование напряжения, подаваемого на его вход. Сигнал с выхода аттенюатора поступает на вход АЦП, а измеренная величина напряжения индицируется на цифровом индикаторе. Во многих цифровых вольтметрах реализуется функция индикации соответствия полярности измеряемого напряжения полярности измерительных входов – в случае, если такого соответствия не наблюдается, на цифровом индикаторе перед результатом измерений отображается знак «-».

Как и любой другой цифровой прибор, такой вольтметр требует применения внешнего дополнительного источника электрической энергии.

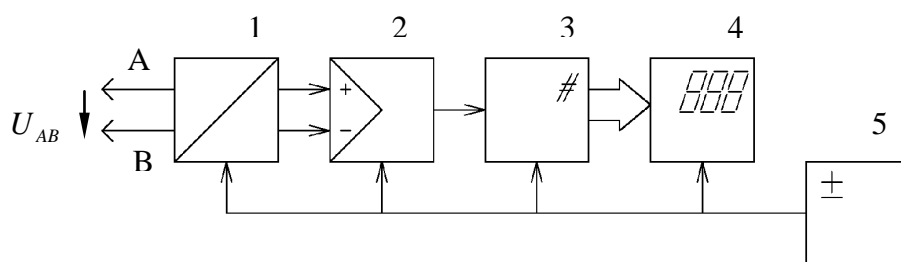


Рис. 1.8. Структурная схема цифрового вольтметра: 1 – аттенюатор; 2 – усилитель; 3 – АЦП; 4 – цифровой индикатор; 5 – источник питания

### 1.3. Измерение мощности в цепях постоянного тока

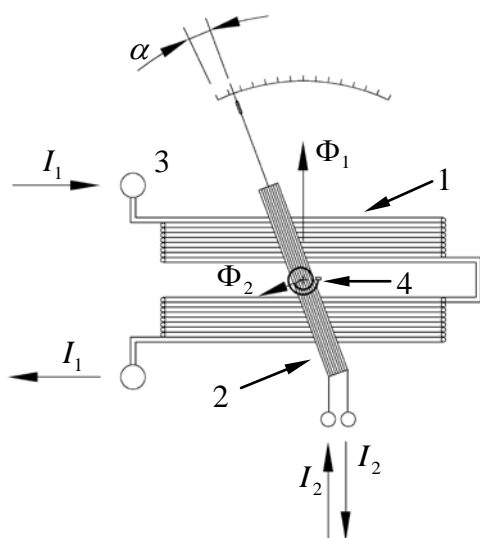


Рис. 1.9. Электродинамический стрелочный прибор

Величина непосредственно измеряемая. Единица измерения в системе СИ – Ватт [Вт].

Активная мощность, которая выделяется на участке цепи постоянного тока, может быть оценена в результате измерения количества тепла, выделяемого этим участком цепи. Прямые колориметрические измерения оказываются длительными и трудоемкими, поэтому для измерения мощности используют ее зависимость от величин тока и напряжения:

$$P = I \cdot U$$

Используя эту формулу, можно рассчитать мощность, выделяющуюся на участке цепи при протекании через него постоянного тока, предварительно измерив величину тока амперметром и с помощью вольтметра определив падение напряжения на этом участке цепи.

### Электродинамический стрелочный ваттметр

В цепях постоянного тока для измерения мощности широко применяются электродинамические стрелочные приборы. Прибор (рис. 1.9) содержит две катушки – неподвижную (1), выполненную из медного обмоточного провода большого сечения с общим числом витков  $w_1$ , сопротивление которой можно считать пренебрежимо малым, и подвижную (2) из  $w_2$  витков тонкого провода с сопротивлением  $r$ . Подвижная катушка выполняется в виде прямоугольной рамки со сторонами  $a$  и  $b$  и к ней прикрепляется стрелка прибора (3). При протекании тока  $I_1$  через неподвижную катушку в ней создается магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий витки подвижной катушки. Если через подвижную катушку будет протекать ток  $I_2$ , то к каждой стороне  $b$  рамки будет приложена сила Ампера (1.1), возникнет вращающий момент (1.2) и рамка повернется на угол, определяемый рассмотренным ранее условием равенства моментов сил

$$\alpha C_s = M_\Phi,$$

где  $C_s$  – удельный момент противодействия пружины (4), а  $M_\Phi$  – момент, создаваемый в результате взаимодействия магнитного потока  $\Phi$  и рамки с током:

$$M_\Phi = \frac{dW}{d\alpha},$$

где  $W$  – электромагнитная энергия двух контуров – катушек с токами  $I_1$  и  $I_2$ , имеющих собственные индуктивности  $L_1$ ,  $L_2$  и взаимную индуктивность  $M_{1,2}$ :

$$W = \frac{L_1 I_1^2}{2} + \frac{L_2 I_2^2}{2} + I_1 I_2 M_{1,2}.$$

Поскольку собственные индуктивности катушек не зависят от их взаимного положения,

$$M_\Phi = \frac{dW}{d\alpha} = I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}, \quad (1.4)$$

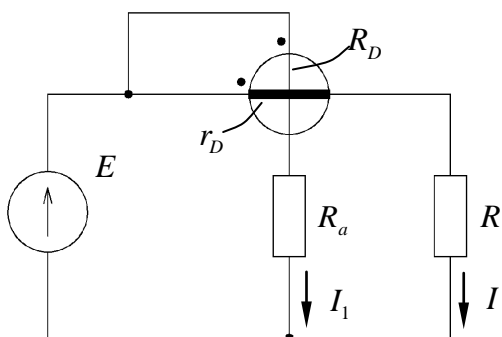


Рис. 1.10. Схема подключения электродинамического измерителя для измерения мощности

$$\alpha = \frac{1}{C_s} I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}.$$

Отметим, что множитель  $dM_{1,2}/d\alpha$  определяется формой катушек и их взаимным положением. Для того, чтобы шкала прибора была линейной, стремятся обеспечить выполнение условия  $dM_{1,2}/d\alpha = const$ . Необходимо учитывать важную особенность применения приборов такого типа: они могут работать как в цепях постоянного, так и в цепях переменного тока.

Включив электродинамический измеритель в цепь постоянного тока так, как это показано на рис. 1.10, можно обеспечить измерение мощности  $P$ , выделяющейся на сопротивлении нагрузки  $R$  при протекании через него тока  $I$ . Точками на схеме отмечены начальные выводы обмоток катушек – подвижной, имеющей сопротивление  $R_D$ , и неподвижной, имеющей сопротивление  $r_a \cong 0$ . Такое соединение катушек обеспечивает отклонение стрелки измерителя в правильном направлении. Поскольку  $I_1 = E/(R_D + R_a)$ , то

$$\alpha = \frac{1}{C_s(R_D + R_a)} EI \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} = kP,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, а  $R_a$  – добавочное сопротивление.

#### 1.4. Измерение активного сопротивления

Величина расчетная. Ее непосредственные измерения невозможны, поскольку сопротивление является коэффициентом взаимной пропорциональности величин протекающего через него тока и напряжения на нем. Единица измерения в системе СИ – Ом [Ом].

Для определения величины активного сопротивления используют два основных метода: метод измерения величины тока и метод компарирования.

##### Омметры с последовательным и параллельным включением измеряемого сопротивления

Эти приборы (рис. 1.11) реализуют метод измерения величины тока, протекающего через активное сопротивление  $R_X$ , величина которого должна быть определена. В каждом из таких приборов есть источник ЭДС  $E$  и магнитоэлектрический механизм  $PA$ , с помощью которого измеряется величина тока, протекающего через  $R_X$ .

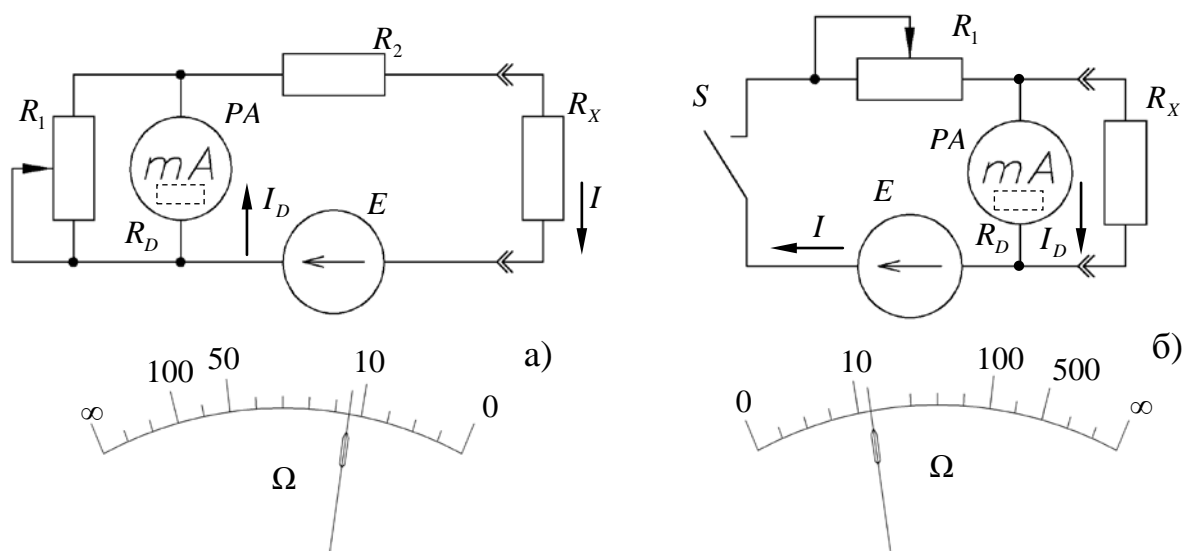


Рис. 1.11. Схемы электрические принципиальные и вид шкал омметров:  
с последовательным включением измеряемого сопротивления (а);  
с параллельным включением измеряемого сопротивления (б)

В получившем наибольшее распространение омметре с последовательным включением (рис. 1.11, а) резистор  $R_1$ , часто обозначаемый на панели прибора надписью «установка нуля», служит для компенсации вариаций величины  $E$ . Измеряемый стрелочным прибором  $PA$  ток  $I_D$  имеет величину  $I_D = I/n$ , где  $I$  – ток, протекающий через резистор  $R_X$ :

$$I = \frac{E}{R_X + R_2 + \frac{R_1 R_D}{R_1 + R_D}},$$

а коэффициент деления  $n$  для схемы резистивного шунта находится из выражения  $n = (R_D + R_1)/R_1$ . Поэтому  $I_D = E/((R_X + R_2)n + R_D)$ , и, так как  $R_D$  мало, выбрав  $R_1 \gg R_D$ , можно считать, что  $I_D = E/(R_X + R_2)n$ , причем  $n \approx 1$ . Отсюда видно, что шкала омметра будет выражено нелинейной. При  $R_X = 0$  стрелка  $PA$  отклоняется максимально. Закоротив перед началом измерений входные клеммы омметра и, меняя величину резистора  $R_1$ , устанавливают стрелку  $PA$  на ноль шкалы. При этом значение  $n$  таково, что  $I_D = E \cdot k / R_2 n = I_{D \max}$ , где  $k$  характеризует изменение ЭДС относительно расчетного значения  $E_0$ , для которого определялось значение  $I_{D \max} = E_0 / R_2$ .

Омметр с параллельным включением (рис. 1.11, б) используют для измерения малых сопротивлений  $R_X$ . В этой схеме

$$I = \frac{E}{R_1 + \frac{R_x R_D}{R_x + R_D}},$$

$$I_D = I/n = \frac{ER_x}{R_1(R_D + R_x) + R_D R_x},$$

$$I_{D \max} \Big|_{R_x \rightarrow \infty} = \frac{E_0}{R_1 + R_D},$$

и, следовательно,  $I_D = 0$  при  $R_x = 0$ . Поэтому при тарировке такого омметра, которую проводят при короткозамкнутых клеммах, стрелку  $PA$  необходимо установить в начало шкалы. Кнопка  $S$  используется для подключения источника питания  $E$  только на время измерения сопротивления  $R_x$  для предотвращения разряда источника питания.

## 2. Цепи переменного и импульсного тока

### 2.1. Типы сигналов и их параметры

Тип сигнала в цепи (гармонический, импульсный, сигнал сложной формы) в общем случае определяется путем визуализации зависимости  $u(t)$  в течение интервала времени, заведомо превышающего период колебаний. Полученная осциллограмма (от *oscillatio graphice* (лат.) – рисование колебания) позволяет определить тип сигнала.

Следует отметить, что идеальные гармонические колебания как в природе, так и в технике встречаются крайне редко. Критерием отнесения квазигармонических колебаний (колебаний, реализация  $u(t)$  которых весьма похожа на реализацию  $u(t) = \sin(\omega_0 t + \varphi)$ ) к гармоническим является выполнение условия  $\Delta\omega \ll \omega_0$ , где  $\Delta\omega$  – ширина спектра квазигармонических колебаний. Поскольку для оценивания величины  $\Delta\omega$  требуется проведение специальных измерений, в большинстве практических случаев ограничиваются визуальным анализом реализации  $u(t)$ , по результатам которого и принимается решение о типе регистрируемого сигнала – рис. 2.1.

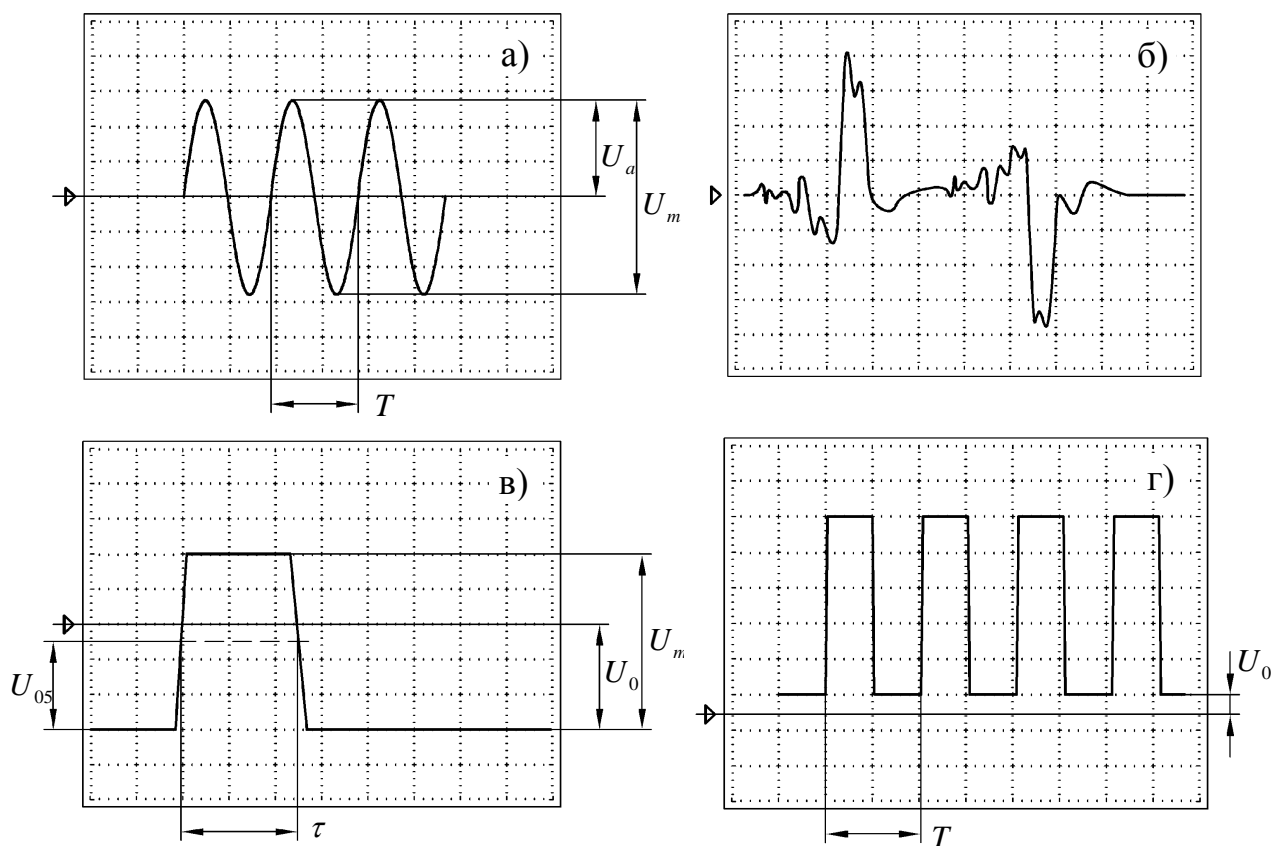


Рис. 2.1. Осциллограммы различных сигналов (курсор  $\blacktriangleright$  указывает положение линии нулевого входного напряжения): гармонического сигнала (а); шумоподобного сигнала сложной формы (б); импульсного двуполярного (в); однополярного импульсно-периодического (г)

Для описания гармонических сигналов используют величину периода колебаний  $T$  ( $T = 1/f$ , где  $f$  – частота колебаний, Гц,  $f = 2\pi/\omega$ ), величину амплитуды  $U_A$  и начальную фазу  $\varphi_0$ . Удвоенная величина  $U_A$  называется размахом колебаний  $U_m$  – рис. 2.1, а).

К импульсным относят сигналы с выраженным во времени изменением величины и/или направления тока. Такие сигналы могут быть как периодическими, так и непериодическими – рис. 2.1, в, г. Для периодических сигналов определены период их повторения  $T$  и скважность  $Q$  (скважность  $Q$  находится как отношение периода повторения импульсов к их длительности  $\tau$ ). Величину  $\tau$  определяют как интервал времени, в течение которого напряжение превышает уровень  $0,5U_{\max}$ , где  $U_{\max}$  – напряжение, соответствующее вершине импульса – рис. 2.1, в). Напряжение смещения  $U_S$  определяют, как показано на рис. 2.1, в и рис. 2.1, г.

Для детального описания формы импульсов (рис. 2.1, рис. 2.2) используют следующие параметры:

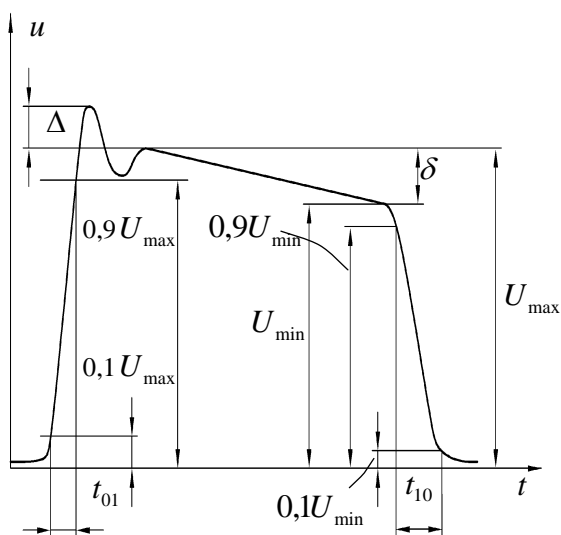


Рис. 2.2. Параметры импульсного сигнала

- полярность импульса (различают однополярные – рис. 2.1, г и двуполярные – рис. 2.1, в импульсы);
- длительность импульса  $\tau$ ;
- длительность переднего фронта импульса  $t_{01}$  (время нарастания);
- длительность заднего фронта импульса  $t_{10}$  (время спада);
- величина выброса  $\Delta$ ;
- величина спада вершины импульса  $\delta$ , определяемая разностью между начальной и конечной амплитудами вершины импульса, выражаемая в процентах:

$$\delta = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max}} 100\%$$

Сигналы, которые не могут быть классифицированы как гармонические или импульсные, называют сигналами сложной формы. Единая система параметров для таких сигналов не определена.



## 2.2. Измерение действующего значения тока

### Электродинамический стрелочный амперметр

Прибор обеспечивает измерение действующего значения переменного тока. На рис. 2.3 представлены схемы включения электродинамического измерителя для измерения тока до 1000 мА (рис. 2.3,а) и для измерения тока более 1 А (рис. 2.3,б). Поскольку вращающий момент при последовательном соединении катушек измерителя пропорционален квадрату действующего значения тока (см. (1.4)), шкала такого амперметра нелинейна.

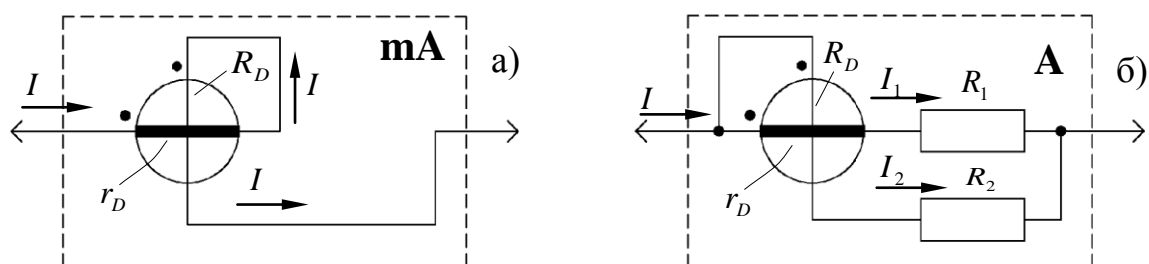


Рис. 2.3. Миллиамперметр (а) и амперметр (б) на основе электродинамического измерителя

Различие схем включения измерителя объясняется тем, что подвижная катушка должна быть легкой и выполняется из провода малого сечения, поэтому и максимальная величина тока, протекающего через нее, как правило, не превышает 1 А. Эти измерители могут работать как в цепях постоянного, так и в цепях переменного тока, поскольку разность фаз токов в обеих катушках равна нулю. Угол поворота  $\alpha$  стрелки миллиамперметра в соответствии с (1.4) составляет  $\alpha = k_E I^2$ , а угол поворота стрелки амперметра находится из выражения

$$\alpha = k_E \frac{(R_1 + r_d)(R_2 + R_D)}{(R_1 + r_d + R_2 + R_D)^2} I^2 \approx k_E \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} I^2,$$

где  $k_E$  – коэффициент, определяемый конструкцией электродинамического измерителя, а  $r_d \cong 0$  и  $R_2 \gg R_D$ . Несмотря на то, что электродинамические приборы являются одними из самых точных средств прямого измерения токов и напряжений в цепях переменного тока (магнитные потоки создаются в воздухе, что гарантирует отсутствие вихревых токов, отсутствие явления гистерезиса и т.п.), их использование ограничено из-за высокой стоимости.

### Магнитоэлектрические стрелочные амперметры

Появление в середине 20 века полупроводниковых диодов обеспечило массовое применение магнитоэлектрических приборов для измерения действующего значения тока. На рис. 2.4 представлены две схемы включения магнитоэлектрического прибора в цепь переменного тока – однополупериодная (а) и двухполупериодная (б). Для первой схемы средний момент отклонения подвижной части измерительного прибора  $M$ , рассчитываемый в соответствии с (1.1) и (1.2), равен

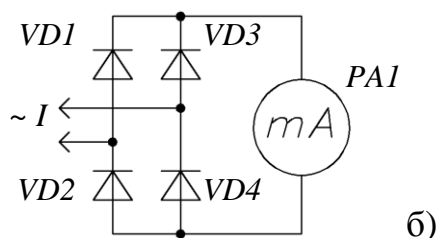
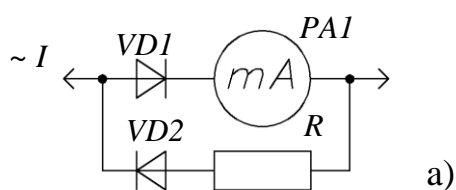


Рис. 2.4. Схема включения магнитоэлектрического прибора в цепь переменного тока

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T M(t) dt = Babw \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i(t) dt = \frac{1}{2} Babw I_a,$$

где  $T$  – период сигнала,  $I_a$  – среднее значение измеряемого тока (ток через прибор PA1 и диод VD1 протекает только в течении половины периода гармонического сигнала  $i(t) = I_m \sin \omega t$ ).

При двухполупериодном выпрямлении тока (в первой половине периода ток протекает по цепи VD1–PA1–VD4, во второй – по цепи VD3–PA1–VD2)

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T M(t) dt = Babw \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = Babw I_a$$

Из полученных выражений видно, что в обоих случаях отклонение подвижной части измерительного механизма PA пропорционально среднему измеряемому току, но в случае использования двухполупериодной схемы выпрямления чувствительность измерителя окажется вдвое выше. При измерениях в цепях переменного тока обычно нужно знать действующий ток в цепи  $I_d$ . Поскольку его величина через коэффициент формы кривой тока  $k_f$  связана со средним значением ( $I_d = I_a k_f$ ), градуировку шкалы прибора выполняют для известной формы кривой (для рассматриваемого случая  $i(t) = I_m \sin \omega t$   $k_f = 1,11$ ). Источниками погрешностей измерений в приборах со схемами выпрямления является, прежде всего, зависимость вольт-амперных характеристик выпрямительных диодов от температуры.

### Клещи токоизмерительные

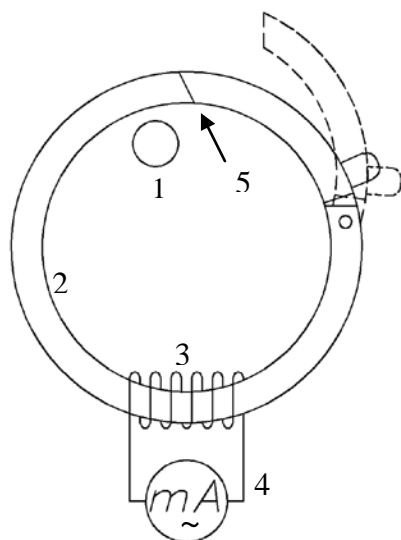


Рис. 2.5. Клещи токоизмерительные

Принцип действия прибора основан на явлении электромагнитной индукции. Они представляют собой легко-разъемный стальной сердечник в форме клещей – рис. 2.5, которым охватывают токоведущий провод (1). Этот сердечник (2) является магнитопроводом, обеспечивающим передачу части магнитного потока, возникающего вокруг провода с протекающим через него током, к измерительной обмотке (3). В целом прибор можно рассматривать как измерительный трансформатор, первичная обмотка которого образована проводом с протекающим переменным током. К выводам измерительной обмотки подключен измеритель действующего значения переменного тока (4), шкала которого проградуирована с учетом величины коэффициента трансформации  $k_I$ :

$$k_I = I / I_0 ,$$

где  $I$  – величина действующего значения тока, протекающего в проводе;  $I_0$  – величина действующего значения тока, протекающего в цепи измерительной обмотки.

Такой прибор позволяет проводить измерение величины тока без разрыва цепи для включения балластного резистора. Недостаток прибора – относительно высокая погрешность измерений, обусловленная нестабильностью магнитного потока в сердечнике из-за изменений характеристик зазора (5) при смыкании клещей, случайного пространственного положения тока с проводом относительно магнитопровода и др.

### 2.3. Измерение действующего значения напряжения

#### Электродинамический стрелочный вольтметр

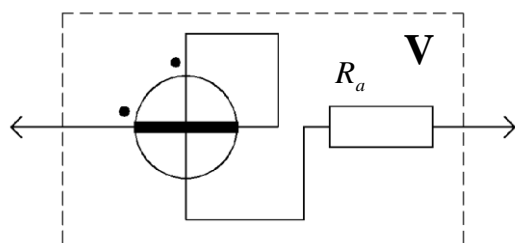


Рис. 2.6. Электродинамический стрелочный вольтметр

Основой вольтметра является электродинамический измеритель, обмотки которого включены последовательно – рис. 2.6. Угол поворота  $\alpha$  стрелки вольтметра определяется выражением

$$\alpha = k_E (U / R_a)^2 ,$$

где  $R_a$  – добавочное сопротивление, которое велико по сравнению с реактивным сопротивлением обмоток электродинамического измерителя,  $U$  – действующее значение напряжения. Таким образом, так же, как и в цепях постоянного тока, принцип измерения величины действующего напряжения основан на применении закона Ома.

### Магнитоэлектрический стрелочный вольтметр

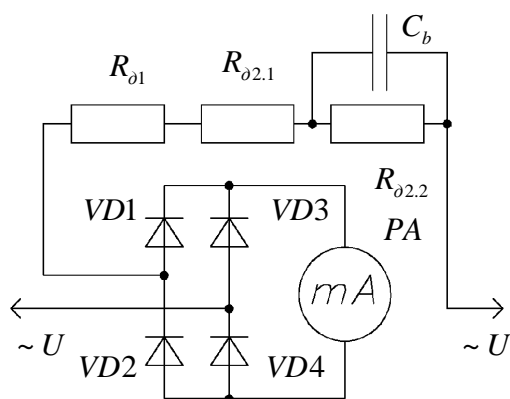


Рис. 2.7. Магнитоэлектрический стрелочный вольтметр с термической и частотной компенсацией

Основой таких вольтметров является магнитоэлектрический стрелочный измерительный прибор (см. п. 1.1), подключаемый к выходу двухполупериодного выпрямителя – рис. 2.7. Поскольку эквивалентное сопротивление выпрямителя уменьшается на 0,1...1,0 % при повышении температуры окружающей среды на 10 °С, предпринимаются специальные меры для компенсации этой зависимости с целью сохранения точности измерений прибора в рабочем диапазоне температур. Это явление оказывает наибольшее

влияние на результаты измерений малых напряжений, поскольку в этом случае величина добавочного сопротивления, как правило, соизмерима с эквивалентным сопротивлением выпрямителя. Для минимизации температурной зависимости результатов измерений часто используют последовательное соединение сопротивления  $R_{02}$ , выполненного из манганина (сплава на основе 85 % меди, 11,5...13,5 % марганца и никеля), характеризующегося малым изменением электрического сопротивления при комнатных температурах, и сопротивления  $R_{01}$ , выполненного из меди, удельное сопротивление которой возрастает с увеличением температуры.

При увеличении частоты увеличивается компонента тока, протекающего через емкости  $p-n$  переходов диодов выпрямителя, что приводит к занижению показаний прибора. Для компенсации частотных искажений используют шунтирующую емкость  $C_b$ , подключаемую к части резистора  $R_{02}$  – рис.2.7.

## **2.4. Измерение активной мощности в однофазной цепи**

Активная мощность в однофазной цепи переменного тока измеряется путем включения электродинамического ваттметра в соответствии с рис. 1.9. В общем случае через ка-

тушки электродинамического измерителя будут протекать токи, имеющие фазовый сдвиг  $\varphi$

$$i_1(t) = I_{1 \max} \sin(\omega t), \quad i_2(t) = I_{2 \max} \sin(\omega t + \varphi),$$

вследствие чего мгновенное значение вращающего момента не будет постоянным во времени:

$$M(t) = i_1(t) \cdot i_2(t) \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}.$$

Из-за собственного момента инерции подвижная рамка прибора повернется на угол  $\alpha$ , пропорциональный среднему значению вращающего момента  $M$

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T M(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_{1 \max} I_{2 \max} \sin(\omega t) \sin(\omega t + \varphi) \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} dt = I_1 I_2 \cos \varphi \frac{dM_{1,2}}{d\alpha},$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – действующие значения токов  $i_1(t)$  и  $i_2(t)$  соответственно. Поскольку  $I_2 \sim U$ , угол поворота подвижной катушки  $\alpha$ , указываемый стрелкой прибора, оказывается пропорциональным активной мощности  $P$  в исследуемой цепи, определяемой выражением  $P = UI_1 \cos \varphi$ .

## 2.5. Измерение частоты колебаний и периода следования импульсов

### Резонансный метод измерения частоты колебаний

Метод основан на обнаружении резонанса в какой-то из  $N$  колебательных систем, одновременно возбуждаемых сигналом  $u(t)$ . Как правило, колебательные системы проектируют так, чтобы резонансные кривые соседних (по основной частоте резонанса) колебательных систем несколько пересекались. Этот метод до появления миниатюрных электрон-

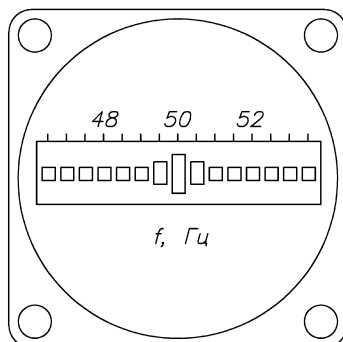


Рис. 2.8. Резонансный электромагнитный герцметр

ронных частотомеров широко использовался в контрольной аппаратуре электроэнергетики. Система консольно закрепленных стальных язычков возбуждается одним электромагнитом, обмотка которого подключается к электрической сети. Механические колебания возбуждаются в тех язычках, резонансные частоты которых соответствуют частоте колебаний магнитного поля электромагнита, т.е. частоте периодических колебаний в электрической сети. Колебания язычков видны в смотровом окне прибора – рис. 2.8. Его главное достоинство – надежность технической реализации. Недостаток – сложность обеспечения измерений в широком диапазоне частот.

### Измерение частоты и периода колебаний электронным частотомером

Определение частоты  $f$  колебаний основано на подсчете числа колебаний в течение заданного интервала времени  $T_c$ , который обычно выбирают кратным 1 с. Этот интервал времени формируется по сигналам высокостабильного термостатированного генератора, входящего в состав частотомера. Число импульсов  $N$ , подсчитанных счетчиком частотомера, пропорционально частоте колебаний  $f$  входного сигнала, поэтому  $f = N/T_c$ . Функциональная схема электронного частотомера представлена на рис. 2.9. Он содержит входной усилитель (1), компаратор (2), высокостабильный генератор (3), формирователь интервалов времени  $T_c$  (4), схему совпадения (5), счетчик числа импульсов (6) и цифровой индикатор (7). Чем меньше будет величина  $T_c$ , тем больше будет абсолютная ошибка определения  $f$ , возникающая из-за ошибок при подсчете первого и последнего импульсов в пределах  $T_c$ .

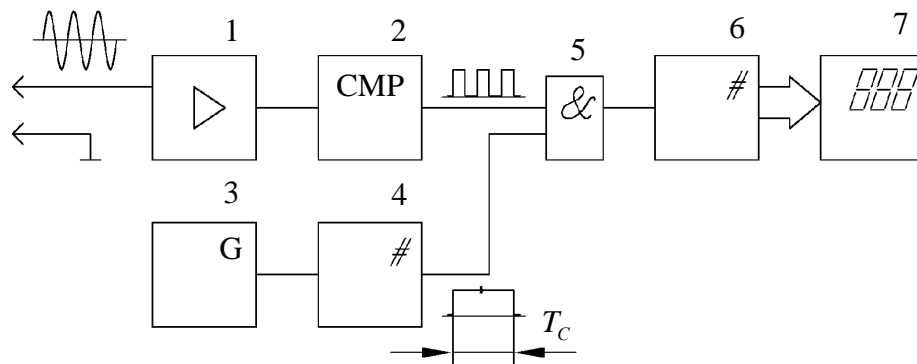


Рис. 2.9. Функциональная схема электронного частотомера

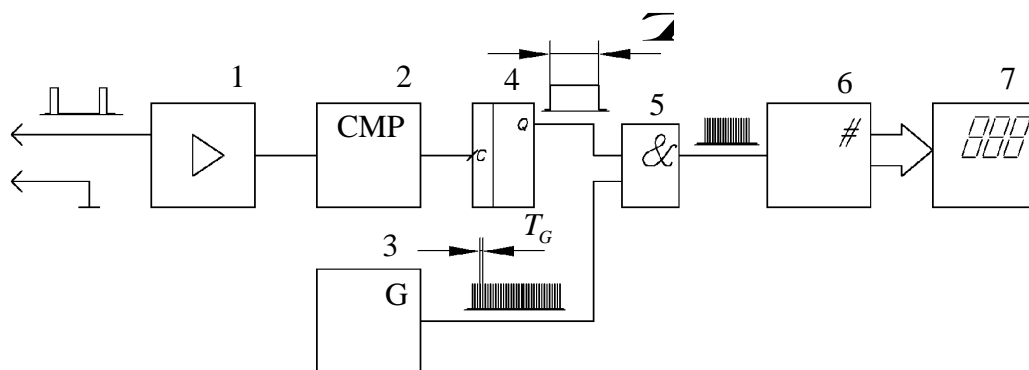


Рис. 2.10. Реализация режима измерения временных интервалов

Если необходимо с высокой точностью определить период следования импульсов  $T$ , используют режим измерения временных интервалов. В этом режиме выполняется подсчет числа тактовых импульсов с малым периодом следования  $T_G$  в пределах интервала времени  $T$ . Интервал времени  $T$  формируется компаратором (2) и триггером (4) – рис. 2.10. На вход компаратора сигнал поступает с выхода усилителя (1). Счетчик (6) подсчитывает число тактовых импульсов, формируемых генератором (3) и прошедших через логическую схему сравнения (5) за время  $T$ . Оценка  $\hat{T}$  истинного значения  $T$  находится из уравнения  $\hat{T} = N \cdot T_G$ , где  $N$  – число подсчитанных тактовых импульсов. Результат измерения отображается на цифровом индикаторе (7).

### Осциллографический метод измерения параметров сигналов

По зарегистрированной осциллограмме сигнала определяют период колебаний  $T$  (или период следования импульсов в случае импульсного сигнала), после чего рассчиты-

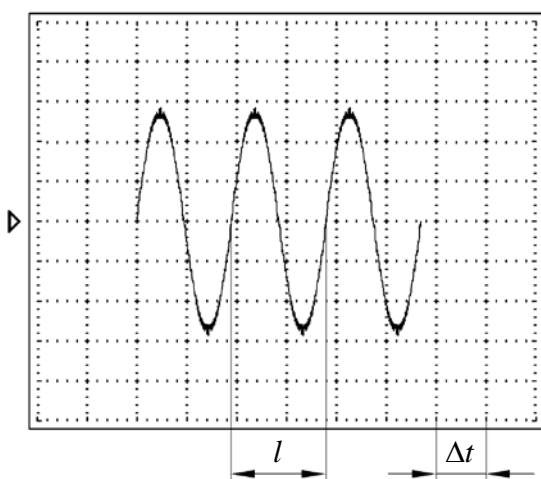


Рис. 2.11. Оценка периода колебаний по наблюдаемой осциллограмме

вают частоту колебаний  $f = 1/T$ . Величину  $T$  находят путем измерения расстояния между точками пересечения горизонтальной прямой с однотипными участками осциллограммы периодического сигнала, в пределах которых производная  $du(t)/dt$  максимальна. Поскольку это расстояние пропорционально искомой величине  $T$ , значение периода определяется из выражения:

$$T = \Delta t \cdot l,$$

где  $\Delta t$  – параметр осциллограммы [с/дел]

(при  $\Delta t = 5$  мкс/дел и  $l = 1,85$  дел  $T = 9,3$  мкс

– рис. 2.11). Выполнение условия  $du(t)/dt \rightarrow \max$  обусловлено стремлением обеспечить минимальную погрешность измерений. Так, например, определение периода гармонических колебаний при регистрации сигнала, представляющего собой аддитивную смесь гармонического сигнала и шума вида

$$u(t) = U_0 \sin(\omega t + \varphi) + n(t),$$

где  $n(t)$  – шумовая реализация, в зависимости от конкретных параметров  $n(t)$  – закона распределения, величины дисперсии – может привести к значительной погрешности измерения периода  $T$ , если в качестве опорных точек использовать локальные экстремумы сигнала  $u(t)$  – рис. 2.11.

Главное достоинство рассматриваемого метода – визуальный контроль реализации  $u(t)$ , исключающий ошибки измерения частоты, связанные с неправильной оценкой формы сигнала.

## 2.6. Измерение разности фаз сигналов

### Осциллографический метод измерения разности фаз

Оценку разности фаз  $\Delta\varphi$  между двумя сигналами  $u_1(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$  и  $u_2(t) = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2)$ , которая имеет вид  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ , можно получить, используя метод наблюдения сигналов с помощью осциллографа. Поскольку величины  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  определены только для моделей сигналов, разность фаз  $\Delta\varphi$ , являющуюся величиной относительной, находят, приняв один из наблюдаемых сигналов – например, А – за опорный – рис. 2.12. Так как полный период колебания составляет величину  $2\pi$ , то  $\Delta\varphi = 2\pi(T/\tau)$ , где  $T$

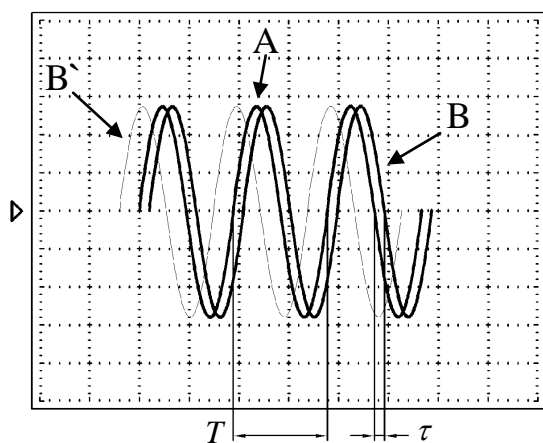


Рис. 2.12. Осциллографический метод измерения разности фаз

– величина временного интервала, соответствующая периоду колебаний, а  $\tau$  – интервал времени между отсчетами сигналов А (опорного) и В (измеряемого). Каждый из этих двух отсчетов характеризуется одинаковыми значениями аргументов гармонических функций сигналов А и В. Если осциллограмма сигнала В находится правее осциллограммы сигнала А, это значит, что аргумент гармонической функции сигнала В достигает такого же значения, что и аргумент сигнала А, позже. В этом случае говорят, что сигнал В опережает по фазе сигнала А и рассчитанный фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$  отрицателен. В противном случае (сигнал В' на рис. 2.12) величину  $\Delta\varphi$  следует брать с положительным знаком – говорят, что сигнал В' отстает по фазе от сигнала А.



### Измерение разности фаз фазометром

Принцип работы прибора основан на преобразовании фазового сдвига в напряжение (или ток) и последующем измерении этого напряжения (тока) с помощью стрелочного или цифрового измерителя. На рис. 2.13 представлена функциональная схема простейшего фазометра, реализующего преобразование фазового сдвига в интервал времени. На выходах компараторов входных сигналов формируются последовательности прямоугольных им-

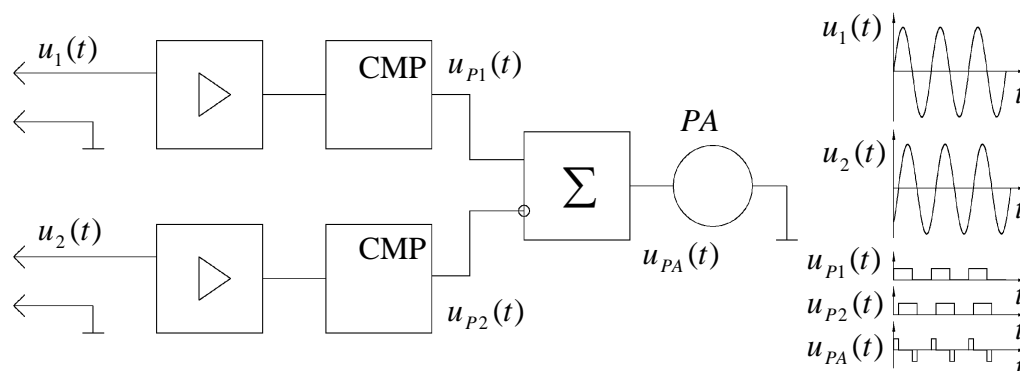


Рис. 2.13. Функциональная схема и временные диаграммы работы фазометра с измерительным прибором стрелочного типа

пульсов, которые поступают на вход разностного формирователя. Среднее значение напряжения этого сигнала, измеряемого выпрямительным вольтметром, пропорционально величине фазового сдвига  $\Delta\varphi$ :  $U_{aver} = U_0 \cdot \Delta\varphi / \pi$ . Поэтому шкала такого прибора, проградуированная в градусах, линейна. Фазометры такого типа позволяют измерять величины фазовых сдвигов в диапазоне значений  $0 \dots 180^\circ$  с погрешностью  $0,1 \dots 1,0^\circ$ .

### 2.7. Измерение комплексного сопротивления участка цепи

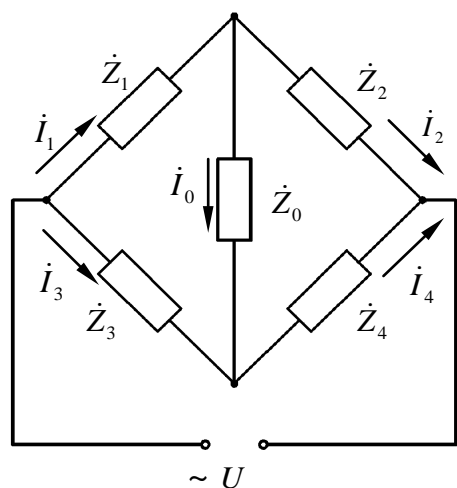


Рис. 2.14. Одинарный мост

Измерения комплексного сопротивления (иногда называемого импедансом) участка цепи обычно выполняют с использованием так называемых мостовых схем. Схема одинарного моста изображена на рис. 2.14. Участки цепи, называемые плечами моста, содержат в общем случае комплексные сопротивления  $\dot{Z}_1$ ,  $\dot{Z}_2$ ,  $\dot{Z}_3$  и  $\dot{Z}_4$ . В диагональ моста включается нагрузка – комплексное сопротивление  $\dot{Z}_0$  или так называемый

нуль-индикатор – измеритель тока стрелочного типа с центральным положением стрелки, которая может отклоняться влево или вправо в зависимости от направления протекающего через прибор тока  $\dot{I}_0$ :

$$\dot{I}_0 = \dot{U} \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_4 - \dot{Z}_2 \dot{Z}_3}{\dot{Z}_0 (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2) (\dot{Z}_3 + \dot{Z}_4) + \dot{Z}_1 \dot{Z}_2 (\dot{Z}_3 + \dot{Z}_4) + \dot{Z}_3 \dot{Z}_4 (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2)}.$$

Равновесие моста (такое состояние, когда  $\dot{I}_0 = 0$ ) достигается при выполнении равенства  $\dot{Z}_1 \dot{Z}_4 = \dot{Z}_2 \dot{Z}_3$ , откуда выводится важное соотношение для фазовых характеристик сопротивлений

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3,$$

а также два равенства для мнимых и действительных компонент этих сопротивлений:

$$\begin{cases} R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3 \\ R_1 X_4 + X_1 R_4 = R_2 X_3 + X_2 R_3 \end{cases} \quad (2.1)$$

Наличие двух уравнений равновесия (2.1) означает необходимость регулирования не менее двух параметров моста переменного тока для достижения равновесия. Из этих уравнения для фазовых характеристик сопротивлений следует важный вывод о том, что если смежные плечи моста содержат активные сопротивления (например,  $\varphi_4 = \varphi_3 = 0$ ), то оба сопротивления  $\dot{Z}_1$  и  $\dot{Z}_2$  могут иметь или индуктивный, или емкостной характер. Если противоположные плечи содержат активные сопротивления (например,  $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$ ), то одно из сопротивлений –  $\dot{Z}_1$  или  $\dot{Z}_4$  – должно быть емкостным, а другое – индуктивным.

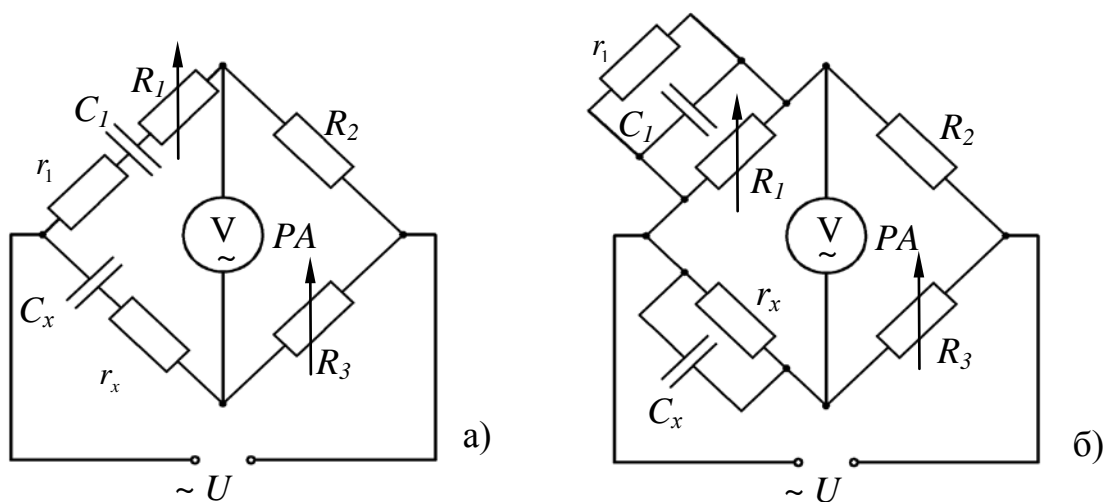


Рис. 2.15. Мосты для измерения емкости методом сравнения с мерой

На рис. 2.15 представлены принципиальные схемы мостов для измерения емкости методом сравнения с мерой:  $C_1$  – образцовая емкость с внутренним сопротивлением  $r_1$ ,  $C_x$  – измеряемая емкость с внутренним сопротивлением  $r_x$ . Если тангенс диэлектрических потерь имеет малое значение, применяют схему 2.15,а. Условия равновесия моста имеют вид:

$$r_x = (R_1 + r_1)(R_3 / R_2), \quad C_x = C_1(R_2 / R_3).$$

При этом тангенс диэлектрических потерь находится из выражения  $tg \delta_x = \omega C_1 R_3$ .

Сопротивления  $R_1$  и  $R_3$  регулируют до уравнивания моста, когда измерительный прибор  $PA$  покажет близкое к нулю значение напряжения (или тока, если в качестве  $PA$  используется амперметр переменного тока).

Для измерения емкости с высоким тангенсом угла диэлектрических потерь целесообразно использовать схему 2.15,б. В этом случае  $tg \delta_x = 1 / \omega C_1 R_1$ .

В зависимости от свойств реактивного элемента (индуктивности или емкости), параметры которого должны быть измерены, используют различные схемы мостов, обеспечивающие необходимую точность измерений [5].

### **3. Основные приемы работы с измерительными приборами**

#### **3.1. Подключение приборов**

Все приборы, имеющие клемму «Защитное заземление», должны быть подключены к этой шине.

Подключение приборов, за редким исключением (в случае применения токовых клещей, например), производят в обесточенной цепи. Тем самым обеспечивается режим электробезопасности измерений и гарантируется защита элементов цепи от выхода из строя при случайном коротком замыкании.

Измерители сопротивления должны подключаться только к обесточенным цепям. В противном случае либо измерения будут ошибочными, либо измерительный прибор выйдет из строя.

#### **3.2. Снятие показаний с приборов стрелочного типа**

Шкалой прибора называется поверхность, на которую нанесены отметки, по которым и определяются показания прибора. Оконечная часть стрелки, перемещающаяся в пределах шкалы, выполняется ножевидной с целью обеспечения точного снятия показаний. При определении показаний прибора необходимо выбрать такую точку наблюдения, при которой боковые поверхности ножевидной части стрелки не будут видны. Затем, проецируя наблюдаемую кромку стрелки на шкалу, необходимо определить индицируемое значение измеряемой величины. Достижимая погрешность оценки –  $\frac{1}{4}$  деления. Приборы высшего класса точности снабжаются зеркальной шкалой, в которой отражается стрелка. Отсчет производится при таком положении глаза, при котором стрелка закрывает свое изображение в зеркале.

Традиционно на стрелочных приборах не указывают цену деления, но обязательно указывают максимальное измеряемое значение тока или напряжения.

#### **3.3. Особенности проведения осциллографических измерений**

Из-за наличия нелинейных искажений в развертке электронно-лучевой трубки во всех осциллографах такого типа измерения проводятся в центральной части экрана, вертикальный и горизонтальный размеры которой составляют не более 80% от соответ-

вующего размера экрана осциллографа. Такие ограничения не действуют при работе с цифровыми осциллографами – измерения можно проводить в пределах всего экрана.

Современные осциллографы часто снабжаются переключателем величины входного сопротивления (для обеспечения наиболее точного воспроизведения широкополосных сигналов обычно используют входы, сопротивление которых составляет 50 Ом). Перед подключением осциллографа, во избежание повреждения как его входных цепей, так и исследуемой цепи, следует убедиться, что входное сопротивление выбрано верно.

Большинство осциллографов имеют переключатель, блокирующий прохождение постоянной составляющей исследуемого сигнала на вход усилителя вертикального отклонения (режим «Закрытый вход» или «АС» – Alternating Current). В этом режиме измерения потенциалов исследуемого сигнала невозможны.

Используя режим «Открытый вход» или «DC» – Direct Current, по величине смещения осциллограммы от положения изображения горизонтальной линии, наблюдаемом при отключенном источнике сигнала, можно судить о наличии постоянной составляющей во входном сигнале и определить его полярность.

### 3.4. Краткие сведения о погрешностях измерений

Погрешность измерений – обобщенное понятие, означающее отличие измеренной величины от ее истинного значения.

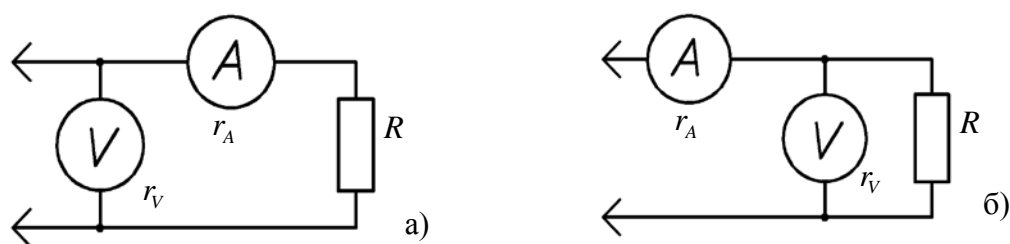


Рис. 3.1. Схемы включения амперметра и вольтметра

- **Погрешность абсолютная** выражается разностью между измеренным значением величины  $\hat{X}$  и ее истинным значением  $X$ :  $\Delta X = \hat{X} - X$ . Она выражается в единицах измеряемой величины (например, при измерении напряжения – [В]). Отсутствие знака погрешности означает, что истинное значение находится в пределах  $\pm \Delta X$  относительно измеренного значения  $\hat{X}$ .

- **Погрешность относительная** – отношение абсолютной погрешности к истинному значению:  $\delta X = \Delta X / X$ . Поскольку истинное значение при проведении измерений оста-

ся неизвестным, при расчетах вместо  $X$  используют измеренное значение  $\hat{X}$  и считают, что  $\delta X \approx \Delta X / \hat{X}$ . В большинстве случаев относительную погрешность выражают в процентах.

#### Основные источники погрешностей

• **Методическая погрешность** обусловлена несовершенством метода измерений или упрощениями, допущенными при измерениях. Ее причиной может быть не учитываемое взаимное влияние объекта измерений – электрической цепи – и измерительных приборов. Так, на рис. 3.1 представлены две схемы включения амперметра и вольтметра в цепь постоянного тока. Включение приборов по схеме рис. 3.1,а обеспечивает наиболее точное измерение величины тока  $I_R$ , протекающего через резистор  $R$ , а включение по схеме рис. 3.1,б – наиболее точное измерение падения напряжения  $V_R$  на этом резисторе. Вместе с тем, в первом случае вольтметр измерит сумму падений напряжения на резисторе  $R$  и внутреннем сопротивлении амперметра  $r_A$ , а во втором случае амперметр измерит величину суммы токов, протекающих через резистор  $R$  и внутреннее сопротивление вольтметра  $r_V$ . Вычисленные на основании совместных показаний приборов оценки сопротивления  $R$  будут различны и будут отличаться от его истинного значения:

$$\hat{R}|_{(a)} = U_V / I_A = (U_R + U_A) / I_A = R + r_A,$$

$$\hat{R}|_{(б)} = U_V / I_A = U_R / (I_R + I_V) = \frac{R}{1 + R/r_V}.$$

Найдем относительные методические погрешности измерений  $\delta R$ :

$$\delta R|_{(a)} = \frac{\Delta R|_{(a)}}{R} = \frac{r_A}{R}; \quad \delta R|_{(б)} = \frac{\Delta R|_{(б)}}{R} = \frac{R}{R + r_V}.$$

Поскольку  $r_V \gg r_A$ , схема, приведенная на рис. 3.1,а, обеспечит меньшие погрешности при измерении больших сопротивлений  $R$ , а схема, приведенная на рис. 3.1,б – при измерении малых сопротивлений. В остальных случаях следует поочередно использовать обе схемы для обеспечения точного измерения величин  $U_R$  и  $I_R$ .

• **Погрешность квантования** – имеет место в средствах измерения или методах, использующих эту процедуру – цифровых измерительных приборах, аппроксимационных методах измерений и т.п.

• **Погрешность средства измерения** (иногда ее называют инструментальной) – составляющая погрешности измерений, обусловленная несовершенством средства измерений (прибора).

- **Погрешность наблюдения** – погрешность, возникающая при наблюдении положения стрелки стрелочного прибора, визуального определения параметров осциллограммы и т.п. Зависит, прежде всего, от квалификации оператора. Её составляющие – погрешность считывания, погрешность интерполяции (неточное определение дробной части деления шкалы) и др.

#### Оценка конечных результатов измерений

В результате обработки серии измеренных значений различают следующие три вида погрешностей.

- **Погрешность грубая** (промах) – погрешность измерений, значительно превосходящая по значению ожидаемую при данных условиях измерений. Основным источником таких погрешностей – ошибки оператора или дефекты измерительного прибора. Наличие этих погрешностей выявляется при обработке результатов измерений (рис. 3.2,а), после чего эти результаты исключаются из дальнейшего рассмотрения.

- **Погрешность систематическая** – обусловлена несовершенством средства измерений и метода измерений (рис. 3.2,б).

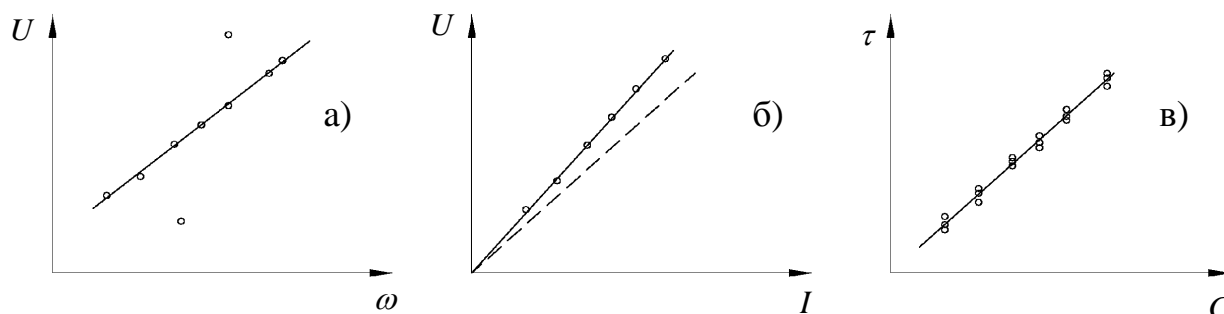


Рис. 3.2. Различные погрешности результатов измерений

- **Погрешность случайная** – причиной возникновения этой погрешности являются непредвиденные изменения параметров исследуемой цепи, средства измерений, окружающей среды (рис. 3.2,в).

Класс точности прибора – количественная оценка гарантированных границ основной погрешности. Он численно равен погрешности, определенной в процентах от конечного значения диапазона измерений в нормальных условиях эксплуатации, указываемых в паспорте прибора (см. Погрешность относительная). Так, вольтметр 1-го класса точности, предназначенный для измерения напряжения в диапазоне значений от 0 до 10 В, обеспечивает погрешность измерений  $\pm 0,01 \cdot 10 = \pm 0,1$  В. С другой стороны, вольтметр, обеспе-

чивающий измерение напряжений до 5 В с такой же погрешностью  $\pm 0,1$  В, относится к классу точности 1,5.

Таким образом, измеряя напряжение на выводах источника постоянного напряжения с номинальным значением  $5,00 \pm 0,01$  В различными вольтметрами 1-го класса точности, можно получить результаты измерений в диапазоне значений 4,9...5,1 В и сделать ошибочный вывод о стабильности выходного напряжения источника. Вот почему класс точности применяемого прибора (таблица 1) должен соответствовать требованиям решаемой задачи.

Таблица 1.

Значения классов точности приборов (ГОСТ 8.401-80)	
Тип прибора	Классы точности
Образцовые и точные	0,05; 0,1; 0,2; 0,5
Рабочие	1; 1,5; 2; 2,5; 5

### 3.5. Практические советы по применению измерительных приборов

1. **НИКОГДА** не пытайтесь измерить сопротивление участка цепи, подключенной к источнику напряжения или генератору сигналов – в лучшем случае цепь и измерительный прибор останутся целы.
2. **НИКОГДА** не пытайтесь подключить амперметр непосредственно к источнику напряжения – в лучшем случае прибор выйдет из строя, а естествоиспытатель не получит ожоги или электротравму.

Единственное исключение из этого правила – проверка степени разряда батареек AAA или AA. В течение 1...2 секунд можно оценить величину тока короткого замыкания, используя предел измерения амперметра 5 или 10 А. Если ток меньше 0,1 А – внутренне сопротивление батарейки велико, ее следует заменить.

3. **НИКОГДА** не включайте приборы, предназначенные для работы в цепях постоянного тока, в цепи переменного тока. В лучшем случае вообще ничего не удастся измерить.
4. **НИКОГДА** не пытайтесь изучить форму сигналов в электросети с помощью осциллографа, подключая его входы непосредственно к токоведущим шинам. Вероятность получения электротравмы и возникновения короткого замыкания – ровно 50%. Один из входов осциллографа, как правило, соединен с его корпусом, который, в свою очередь, подключен к общему проводу электросети. Если этот вход окажется подключен к фазному проводу, возникнет короткое замыкание.



5. **ВСЕГДА** проверяйте полярность приборов, подключаемых в цепь постоянного тока.
6. **ВСЕГДА** перед подключением прибора в цепь устанавливайте самый грубый предел измерений для предотвращения выхода прибора из строя.

## Контрольные вопросы

1. В чем отличие прямого и косвенного методов измерения тока?  
[ОТВЕТ](#)
2. Почему при использовании приборов магнитоэлектрического типа следует соблюдать правильную полярность их подключения?  
[ОТВЕТ](#)
3. В чем заключается преимущество применения амперметра на основе датчика Холла? Возможно ли его применение для измерения переменного тока в цепи?  
[ОТВЕТ](#)
4. В каких случаях для измерения напряжения используют электростатический стрелочный вольтметр?  
[ОТВЕТ](#)
5. В чем проявляется воздействие на участок цепи подключенного к нему стрелочного вольтметра магнитоэлектрического типа?  
[ОТВЕТ](#)
6. Каковы принципиальные особенности использования цифровых амперметров и вольтметров?  
[ОТВЕТ](#)
7. Почему для измерения мощности широко применяют электродинамические стрелочные приборы, а не комбинацию двух приборов – вольтметра и амперметра?  
[ОТВЕТ](#)
8. В каких случаях используют омметры с последовательным включением измеряемого сопротивления, а в каких – с параллельным включением?  
[ОТВЕТ](#)
9. Перечислите основные параметры гармонического сигнала.  
[ОТВЕТ](#)
10. Перечислите основные параметры импульсного сигнала.  
[ОТВЕТ](#)
11. Почему для измерения действующего значения тока с помощью электродинамического прибора используют разные схемы его включения?  
[ОТВЕТ](#)
12. В чем состоит преимущество использования схемы двухполупериодного выпрямления в амперметре на основе магнитоэлектрического измерительного прибора?  
[ОТВЕТ](#)
13. В каких случаях применяют токоизмерительные клещи? Можно ли с их помощью выполнить высокоточные измерения?  
[ОТВЕТ](#)
14. Объясните назначение и принцип функционирования термо- и частотной компенсации в магнитоэлектрическом вольтметре.  
[ОТВЕТ](#)
15. Почему стрелка электродинамического ваттметра остается неподвижной при протекании через обмотки измерителя переменного тока?  
[ОТВЕТ](#)
16. В каких случаях в электронном частотомере используют режим измерения временных интервалов?  
[ОТВЕТ](#)
17. В чем состоит преимущество применения фазометра для измерения разности фаз, а в чем – преимущество осциллографического метода измерений?

[ОТВЕТ](#)

18. Почему при различных величинах тангенса угла диэлектрических потерь измеряемой емкости используют различные мостовые схемы?

[ОТВЕТ](#)

19. Почему измерительные приборы, за редким исключением, подключают к обесточенной цепи?

[ОТВЕТ](#)

20. В чем состоят особенности проведения осциллографических измерений?

[ОТВЕТ](#)

21. Перечислите основные погрешности измерений. Какие из них устранимы, а какие – нет?

[ОТВЕТ](#)

22. Что понимают под классом точности прибора?

[ОТВЕТ](#)

23. Почему нельзя подключать измеритель сопротивления к не обесточенному участку цепи?

[ОТВЕТ](#)

24. Почему нельзя подключать амперметр непосредственно к источнику напряжения?

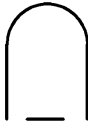
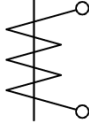
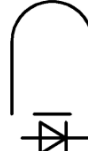
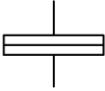

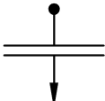
[ОТВЕТ](#)

25. Следует ли соблюдать полярность подключения цифрового вольтметра к цепи, в которой протекает постоянный ток?

[ОТВЕТ](#)

## Приложение

Условные графические обозначения типа измерительного механизма, наносимые на шкалу измерительного прибора

Тип измерительного элемента	Условное обозначение	Тип измерительного элемента	Условное обозначение
Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой		Прибор электромагнитный	
Прибор магнитоэлектрический с выпрямителем		Прибор электродинамический	
Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой		Прибор электростатический	

Условные графические обозначения условий применения, наносимые на шкалу измерительного прибора

Единицы измерения					Множитель
Ток, А	Напряжение, В	Мощность, Вт	Частота, Гц	Сопротивление, Ом	
			<b>MHz</b>	<b>M Ω</b>	$10^6$
<b>kA</b>	<b>kV</b>	<b>kW</b>	<b>kHz</b>	<b>kΩ</b>	$10^3$
<b>A</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Hz</b>	<b>Ω</b>	1
<b>mA</b>	<b>mV</b>				$10^{-3}$
<b>μA</b>					$10^{-6}$

Род тока			
Постоянный	Переменный	Постоянный и переменный	Трёхфазный
—	~	≈	≏

## Литература

1. Электрические измерения. Средства и методы измерений (общий курс) / Дьяченко К.П., Зорин Д.И., Новицкий П.В. и др. Под ред. Е.Г. Шрамкова. – М.: Высш. школа, 1972. – 520 с.
2. Электрические измерения: Учебник для вузов. / Байда Л.И., Добротворский Н.С., Душин Е.М. и др. – Л.: Энергия, 1980. – 392 с.
3. Основы метрологии и электрические измерения: учебник для вузов / Авдеев Б.Я., Антонюк Е.М., Душин Е.М. и др. Под ред. Е.М. Душина. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
4. Шульц Ю. Электроизмерительная техника: 1000 понятий для практиков. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.
5. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений. – М.: Мир, 1990. – 535 с.
6. Маркин Н.С. Основы теории обработки результатов измерений. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 176 с.