

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Глава 5

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

5.1. ВИДЫ И МЕТОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ



Измерением называется познавательный процесс сравнения измеряемой физической величины с некоторым значением той же величины, принятым за единицу. Физические

величины измеряют техническими средствами — *средствами измерения*.

В зависимости от способа получения результатов измерения бывают прямыми и косвенными.

В *прямых измерениях* физическая величина измеряется непосредственно. Прямыми измерениями являются, например, измерение длины линейкой, времени — секундомером, силы тока — амперметром.

В *косвенных измерениях* непосредственно измеряют не ту величину, значение которой нужно узнать, а другие величины, с которыми искомая величина связана определенной математической зависимостью. Например, плотность тела определяют по измерению его массы и объема, а сопротивление вычисляют по закону Ома, т. е. по измерению силы тока и напряжения.

В зависимости от способов и средств измерений различают методы непосредственной оценки и методы сравнения.

Метод непосредственной оценки состоит в том, что значение измеряемой величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора (значение тока — по амперметру, значение напряжения — по вольтметру и др.). Этот метод оценки прост, но отличается сравнительно невысокой точностью.

Метод сравнения заключается в том, что измеряемая величина сравнивается с величиной, воспроизводимой мерой. Этот метод обеспечивает большую точность измерения по сравнению с методом непосредственной оценки, но процесс измерения усложняется.

В силу несовершенства организационных мер и измерительных приборов, а также наших органов чувств, измерения не могут быть выполнены точно, т. е. всякое измерение дает лишь приближенный результат. Кроме того, нередко причиной отклонения результатов измерений является природа самой измеряемой величины. Например, температура, измеряемая термометром или термопарой в определенной точке печи, колеблется вследствие конвекции и теплопроводности в определенных пределах. Мерой оценки точности результата измерения служит погрешность измерения.

По способу выражения погрешности средств измерений делятся на абсолютные, относительные и приведенные.

Абсолютная погрешность Δ — это разность между показанием прибора A и действительным значением измеряемой величины A_A :

$$\Delta = A - A_A$$

Относительная погрешность — это отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины A_A , обычно выражается в процентах:

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{A_A} 100.$$

Чем меньше погрешность измерения, тем выше его точность.

Приведенная погрешность γ представляет собой отношение абсолютной погрешности Δ к нормирующему значению A_N измеряемой величины:

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{A_N} 100.$$

Нормирующее значение обычно принимают равным верхнему пределу измерения для данного прибора.

По источникам происхождения погрешности измерения подразделяют на систематические, случайные и грубые (промахи).

Систематические погрешности — это погрешности измерения, величина которых остается постоянной при повторных измерениях, проводимых одним и тем же методом, с помощью одних и тех же измерительных приборов. Причинами систематических погрешностей являются:

- неисправности, неточности измерительных приборов;
- неправомерность, неточность методики измерения.

Примером систематических погрешностей может быть измерение температуры термометром со смещенной нулевой точкой, измерение тока неправильно отградуированным амперметром.

Для устранения или уменьшения систематических погрешностей нужно тщательно проверить измерительные приборы, произвести измерение одних и тех же величин разными методами, ввести поправки, когда ошибки заведомо известны (например, поправки на показания термометра).

Случайная погрешность — это погрешность, изменяющаяся по случайному закону. Случайные погрешности нельзя исключить опытным путем, значение их можно уменьшить проведением многократных измерений.

Грубые погрешности (промахи) — существенное превышение величины погрешности, ожидаемой при данных условиях измерения. Промахи появляются в результате неправильной записи показаний прибора, неправильного отсчета по прибору, из-за ошибки в расчетах при косвенных измерениях. Источник промахов — невнимательность экспериментатора. Путь устранения этих погреш-

ностей — аккуратность экспериментатора, исключение переписывания протоколов измерения.

В зависимости от условий эксплуатации различают основную и дополнительную погрешности средств измерений.

Основная погрешность — это погрешность средств измерений, находящихся в нормальных условиях эксплуатации (температура внешней среды, влажность, атмосферное давление, напряжение и частота питания, внешние электрические и магнитные поля и др.).

Дополнительная погрешность — это погрешность средств измерений, возникающая при отклонении указанных условий от нормального значения.

Уровень точности средств измерений характеризуется классом точности. Для электроизмерительных приборов установлены следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4. Цифры указывают основную приведенную погрешность γ в процентах.

Пример 5.1. Образцовый и лабораторный амперметры соединены последовательно. По показаниям лабораторного прибора $I = 22$ А, по показаниям образцового $I_A = 21,95$ А. Определить абсолютную, относительную и приведенные погрешности измерений, если верхний предел измерения лабораторного прибора $A_N = 30$ А.

Решение

Абсолютная погрешность измерения

$$\Delta = A - A_A = 22,00 - 21,95 = 0,05 \text{ А.}$$

Относительная погрешность измерения

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{A_A} 100 = \frac{0,05}{21,95} 100 \approx 0,3 \text{ \%}.$$

Приведенная погрешность измерения

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{A_N} 100 = \frac{0,05}{30} 100 \approx 0,2 \text{ \%}.$$

Пример 5.2. Вольтметр имеет класс точности 2,5 и предел измерения 30 В. Этим прибором были произведены два измерения $U_1 = 6$ В и $U_2 = 25$ В. Какое из измерений будет иметь наименьшую относительную погрешность?

Решение

Указанный класс прибора соответствует приведенной погрешности $\gamma = 2,5 \text{ \%}$. Абсолютная погрешность измерения

$$\Delta = \gamma \frac{A_N}{100} = \frac{2,5 \cdot 30}{100} = 0,75 \text{ В.}$$

Определим действительные значения измеряемых величин:

$$A_{A1} = A_1 - \Delta = 6,00 - 0,75 = 5,25 \text{ В};$$

$$A_{A2} = A_2 - \Delta = 25,00 - 0,75 = 24,25 \text{ В}.$$

Рассчитаем относительные погрешности измерений:

$$\delta_1 = \pm \frac{\Delta}{A_{A1}} 100 = \frac{0,75}{5,25} 100 = 14,3 \%;$$

$$\delta_2 = \pm \frac{\Delta}{A_{A2}} 100 = \frac{0,75}{24,25} 100 = 3,1 \%.$$

Из решения очевидно, что второе измерение оказалось точнее.

Основными характеристиками электроизмерительных приборов являются: погрешность (см. ранее), вариация показаний, чувствительность, потребляемая мощность, время установления показаний и надежность.

Вариация показаний — это наибольшая разность показаний прибора при одном и том же значении измеряемой величины. Причиной вариации в основном является трение в опорах подвижной части прибора.

Чувствительность S — это отношение приращения перемещения указателя Δa к приращению измеряемой величины Δx :

$$S = \frac{\Delta a}{\Delta x}.$$

Если чувствительность постоянна (шкала равномерная), то ее можно определить как $S = \frac{a}{x}$.

Величина, обратная чувствительности ($C = \frac{l}{S}$), называется **ценой деления** (постоянной) прибора. Она равна числу единиц измеряемой величины, приходящихся на одно деление шкалы.

Потребляемая мощность — это мощность, которую потребляет прибор при включении его в цепь. Большое потребление мощности приводит к увеличению погрешности измерения, поэтому малое потребление мощности является достоинством прибора.

Время установления показаний — это промежуток времени с момента включения измеряемой величины до момента, когда указатель займет положение, отличающееся от установившегося значения не более чем на 1,5 %. Время установления показаний

для большинства аналоговых измерительных приборов не превышает 4 с.

Надежность — это способность электроизмерительных приборов сохранять заданные характеристики при определенных условиях работы в течение заданного времени. Количественной мерой надежности является среднее время безотказной или исправной работы прибора.



Запомните

- Измерение — это определение значения физической величины опытным путем.
- Из-за несовершенства средств и методов измерений, субъективных ошибок и случайных влияний результаты реальных измерений всегда будут отличаться от действительных значений измеряемых величин.
- Чем меньше измеряемая величина по сравнению с верхним пределом шкалы прибора, тем больше погрешность измерения.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется измерением?
2. В чем состоит отличие косвенного вида измерения от прямого? Приведите примеры косвенных измерений.
3. Каковы причины возникновения систематических погрешностей и пути их исключения?
4. В какой части шкалы прибора относительная погрешность измерения будет наибольшей?
5. Что является надежностью электроизмерительного прибора?



ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Предел измерения амперметра составляет 30 А. Этим амперметром измерены токи 5 А и 25 А. Установите, какое измерение точнее.
2. Рассчитайте относительную погрешность при измерении тока $I = 2,5$ А амперметром класса точности 0,5 и пределом измерения прибора 5 А.
3. Определите абсолютную и относительные погрешности показания амперметра, включенного последовательно с сопротивлением $R = 25$ Ом, если показание амперметра $I = 4,5$ А, а напряжение на зажимах сопротивления $U = 110$ В.

Электроизмерительные приборы классифицируются по различным признакам, например по роду и принципу действия.

По **роду измеряемой величины** электроизмерительные приборы подразделяются на амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, частотомеры и др. На схемах и лицевой панели электроизмерительного прибора род измеряемой величины указывается с помощью условных обозначений, некоторые из них приведены в табл. 5.1, 5.2.

Таблица 5.1. Условные обозначения на электроизмерительных приборах

Прибор	Условное обозначение
Амперметр	A
Вольтметр	V
Гальванометр	Г
Ваттметр	W
Омметр	Ω
Счетчик ватт-часов	Wh

Таблица 5.2. Условные обозначения на шкалах приборов

Условное обозначение	Назначение
	Прибор переменного тока
	Прибор постоянного тока
	Прибор постоянного и переменного тока
	Прибор трехфазного тока
	Вертикальное положение прибора при измерении
	Горизонтальное положение прибора при измерении

Условное обозначение	Назначение
 30°	Положение прибора при измерении под углом 30°
1,5	Класс точности, например, 1,5
	Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например, 2 кВ
2001	Год выпуска
31226	Заводской номер

В зависимости от физического явления, положенного в основу **принципа действия** измерительного прибора, различают приборы магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической и других систем.

Системы измерительных приборов, их условное обозначение, область применения, достоинства и недостатки приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3. Системы электроизмерительных приборов и их условные обозначения

Система прибора	Условное обозначение	Область применения	Достоинства и недостатки
Магнито-электрическая		Применяют для измерения постоянных токов, напряжений, сопротивлений и т. д.	Достоинства: высокая точность, равномерная шкала, обладает малым потреблением энергии от объекта. Недостатки: непригодность к работе в цепях переменного тока, чувствительность к перегрузкам и зависимость показаний от температуры окружающей среды

Система прибора	Условное обозначение	Область применения	Достоинства и недостатки
Электро-магнитная		Применяют для измерения в цепях постоянного и переменного тока в качестве амперметров, вольтметров и фазометров	<i>Достоинства:</i> самые распространенные щитовые приборы для измерения в цепях переменного тока. <i>Недостатки:</i> невысокая точность, большое собственное потребление мощности, ограниченный частотный диапазон, чувствительность к внешним магнитным полям
Электро-динамическая		Применяют в цепях постоянного и переменного тока для измерения тока напряжения, мощности	<i>Достоинства:</i> высокая точность, независимость показаний от формы кривой тока и напряжения. <i>Недостатки:</i> сравнительно низкая чувствительность, большое собственное потребление мощности, влияние внешних магнитных полей, ограниченный частотный диапазон
Электро-статическая		Применяют в качестве вольтметров постоянного и переменного тока	<i>Достоинства:</i> малое собственное потребление энергии, широкий частотный диапазон работы,

Условное обозначение	Назначение
	Положение прибора при измерении под углом 30°
1,5	Класс точности, например, 1,5
	Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например, 2 кВ
2001	Год выпуска
31226	Заводской номер

В зависимости от физического явления, положенного в основу **принципа действия** измерительного прибора, различают приборы магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической и других систем.

Системы измерительных приборов, их условное обозначение, область применения, достоинства и недостатки приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3. Системы электроизмерительных приборов и их условные обозначения

Система прибора	Условное обозначение	Область применения	Достоинства и недостатки
Магнито-электрическая		Применяют для измерения постоянных токов, напряжений, сопротивлений и т. д.	Достоинства: высокая точность, равномерная шкала, обладает малым потреблением энергии от объекта. Недостатки: непригодность к работе в цепях переменного тока, чувствительность к перегрузкам и зависимость показаний от температуры окружающей среды

Система прибора	Условное обозначение	Область применения	Достоинства и недостатки
Электромагнитная		Применяют для измерения в цепях постоянного и переменного тока в качестве амперметров, вольтметров и фазометров	<i>Достоинства:</i> самые распространенные щитовые приборы для измерения в цепях переменного тока. <i>Недостатки:</i> невысокая точность, большое собственное потребление мощности, ограниченный частотный диапазон, чувствительность к внешним магнитным полям
Электродинамическая		Применяют в цепях постоянного и переменного тока для измерения тока напряжения, мощности	<i>Достоинства:</i> высокая точность, независимость показаний от формы кривой тока и напряжения. <i>Недостатки:</i> сравнительно низкая чувствительность, большое собственное потребление мощности, влияние внешних магнитных полей, ограниченный частотный диапазон
Электростатическая		Применяют в качестве вольтметров постоянного и переменного тока	<i>Достоинства:</i> малое собственное потребление энергии, широкий частотный диапазон работы,

Система прибора	Условное обозначение	Область применения	Достоинства и недостатки
			нечувствительность к внешним магнитным полям и колебаниям температуры; их показания не зависят от формы кривой измеряемого напряжения. <i>Недостатки:</i> сравнительно низкая чувствительность
Индукционная		Применяют в качестве одно- и трехфазных счетчиков переменного тока	<i>Достоинства:</i> устойчивы к перегрузкам, имеют большой вращающийся момент и малую чувствительность к внешним магнитным полям. <i>Недостатки:</i> недостаточно чувствительны, и их показания зависят от частоты измеряемого тока и температуры окружающей среды

К электроизмерительным приборам предъявляют следующие технические требования:

- точность и надежность в работе;
- потребление по возможности как можно меньшей мощности;
- способность не вносить заметных изменений в электрические параметры измеряемой цепи;
- равномерные деления в пределах рабочей части шкалы;
- способность выдерживать как можно большую перегрузку;

- продолжительный срок службы без ухудшения своих качеств;
- надежная изоляция токоведущих частей от корпуса;
- независимость показаний прибора от внешних факторов;
- малое время установления показаний прибора;
- низкая стоимость.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Приборы какой системы измеряют только постоянный ток и напряжение?
2. Приборы какой системы являются самыми распространенными щитовыми приборами для измерения в цепях переменного тока?
3. Приборы какой системы имеют чувствительность к внешним магнитным полям?

5.3. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Измерение тока. Прибор, предназначенный для измерения силы тока, называется **амперметром**. Амперметр включается последовательно с участком цепи, в котором измеряется сила тока (рис. 5.1, а).

Для того чтобы включение амперметра не оказывало влияния на работу электрических установок и он не создавал больших потерь энергии, амперметры выполняют с малым внутренним сопротивлением. Амперметр можно включать в цепь только последовательно с нагрузкой.

Для расширения пределов измерения амперметров, предназначенных для работы в цепях постоянного тока, их включают в цепь

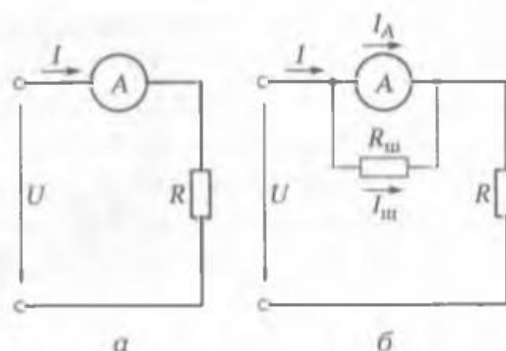


Рис. 5.1. Схема включения амперметра:

а — без шунта; б — с шунтом

параллельно шунту (рис. 5.1, б). При этом через прибор проходит только часть I_A измеряемого тока I , обратно пропорциональная его сопротивлению R_A . Большая часть $I_{ш}$ этого тока проходит через шунт. Зная сопротивления прибора R_A и шунта $R_{ш}$, можно по току I_A , фиксируемому прибором, определить измеряемый ток:

$$I = I_A \frac{R_A + R_{ш}}{R_{ш}} = I_A n,$$

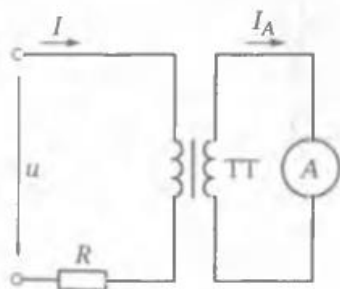
где n — коэффициент шунтирования, $n = \frac{I}{I_A} = \frac{R_A + R_{ш}}{R_{ш}}$. Его обычно выбирают равным или кратным 10.

Сопротивление шунта, необходимое для измерения тока I , в n раз большего, чем ток прибора I_A ,

$$R_{ш} = \frac{R_A}{n - 1}.$$

Конструктивно шунты либо монтируют в корпус прибора (шунты на токи до 50 А), либо устанавливают вне его и соединяют с прибором проводами. Если прибор предназначен для постоянной работы с шунтом, то шкала его градуируется сразу в значениях измеряемого тока с учетом коэффициента шунтирования и никаких расчетов для определения тока выполнять не требуется. Шунты делят на пять классов точности (0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5). Обозначение класса соответствует допустимой погрешности в процентах.

Для того чтобы повышение температуры шунта при прохождении по нему тока не оказывало влияния на показания прибора, шунты изготовляют из материалов с большим удельным сопротивлением и малым температурным коэффициентом (константан, манганин, никелин и пр.). Для уменьшения влияния температуры на показания амперметра последовательно с индукционной катушкой прибора в некоторых случаях включают добавочный резистор из константана или другого подобного материала. Для измерения больших токов (свыше 100 А) применяют амперметры магнитоэлектрической системы с использованием шунтов.



Для расширения пределов измерения тока в цепях переменного тока используют трансформаторы тока (ТТ) (рис. 5.2). Зна-

Рис. 5.2. Схема включения амперметра в цепь переменного тока с использованием измерительного ТТ

чение измеряемого тока I и значение I_A , измеряемое амперметром, связаны следующим соотношением:

$$I = kI_A$$

где k — коэффициент трансформации измерительного трансформатора.

Измерение напряжения. Прибор, предназначенный для измерения напряжения, называется **вольтметром** (рис. 5.3, а). Вольтметр включается параллельно участку цепи, на котором измеряется напряжение (рис. 5.3, б).

Для того чтобы включение вольтметра не оказывало влияния на работу электрических установок и он не создавал больших потерь энергии, вольтметры выполняют с большим сопротивлением. Для расширения пределов измерения вольтметров последовательно с обмоткой прибора включают добавочный резистор R_A (рис. 5.3, в). При этом на прибор приходится лишь часть U_V измеряемого напряжения U , пропорциональная сопротивлению прибора R_V . Сопротивление добавочного резистора, необходимое для измерения напряжения U , в n раз большего напряжения прибора U_V , определяется по формуле

$$R_A = (n - 1)R_V$$

Добавочный резистор может встраиваться в прибор и одновременно использоваться для уменьшения влияния температуры окружающей среды на показания прибора. Для этой цели резистор выполняется из материала, имеющего малый температурный коэффициент, и его сопротивление значительно превышает сопротивление индуктивной катушки, вследствие чего общее сопротивление прибора становится почти независимым от изменения температуры. По точности добавочные резисторы подразделяются на те же классы точности, что и шунты.

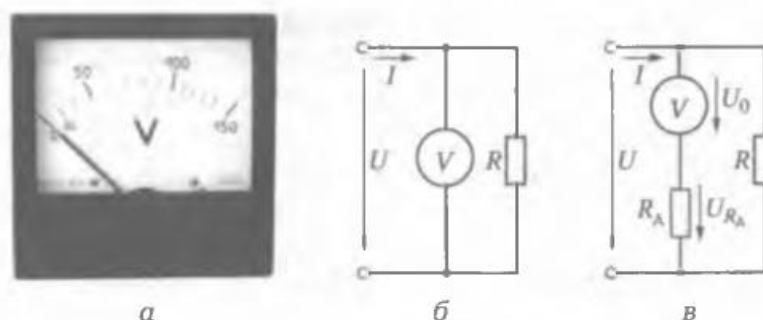


Рис. 5.3. Схема включения вольтметра:

а — внешний вид стрелочного вольтметра; б — без добавочного сопротивления; в — с добавочным сопротивлением

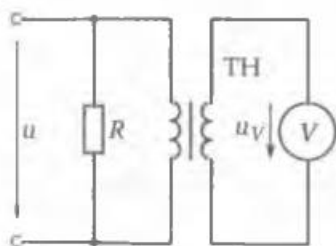


Рис. 5.4. Схема включения вольтметра в цепь переменного тока с использованием измерительного ТН

В цепях переменного тока для расширения пределов измерения вольтметров используются измерительные трансформаторы напряжения (ТН). Схема включения показана на рис. 5.4. В этом случае измеряемое напряжение $U = k_u U_V$, где k_u — коэффициент трансформации измерительного трансформатора напряжения. Измерительные трансформаторы напряжения, помимо расширения пределов измерения вольтметра в цепях переменного тока, обеспечивают изоляцию вторичной цепи от первичной, находящейся под высоким напряжением.

Делители напряжения. Для расширения пределов измерения вольтметров применяют делители напряжения. Они позволяют уменьшить подлежащее измерению напряжение до значения, соответствующего номинальному напряжению данного вольтметра (предельного напряжения на его шкале). Отношение входного напряжения делителя U_1 к выходному U_2 (рис. 5.5, а) называется **коэффициентом деления**. При холостом ходе $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$. В де-

лителях напряжения это отношение может быть выбрано равным 10, 100, 500 и т. д. в зависимости от того, к каким выводам делителя подключен вольтметр (рис. 5.5, б). Делитель напряжения вносит малую погрешность в измерения только в том случае, если сопротив-

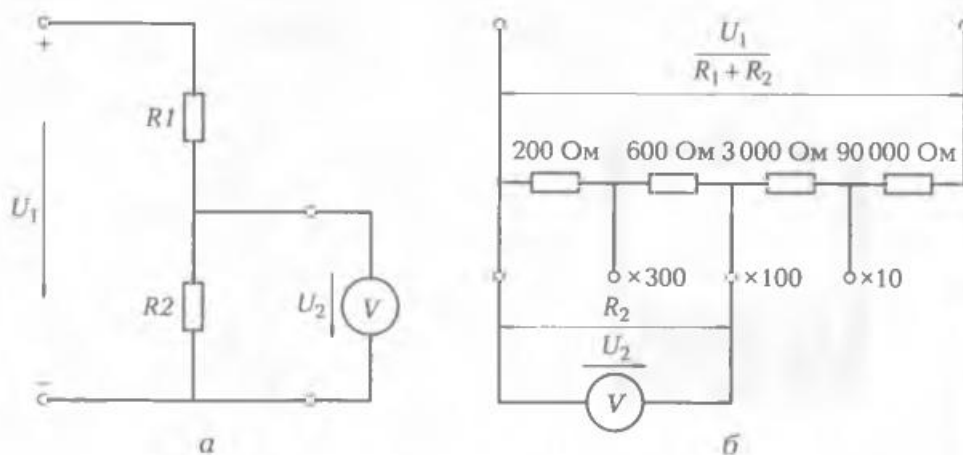


Рис. 5.5. Схемы включения делителей напряжения:

а — однопределный делитель напряжения; б — многопределный делитель напряжения

ление вольтметра R_V достаточно велико (ток, проходящий через делитель, мал), а сопротивление источника, к которому подключен делитель, мало.

! Запомните

- При измерении переменных токов важно, какое значение тока измеряется: действующее, амплитудное или среднее. Все приборы градуируются в действующих значениях синусоидального тока.
- Чем меньше сопротивление амперметра, тем меньше погрешность измерения.
- Чем больше внутреннее сопротивление вольтметра, тем меньше погрешность измерения.
- Для расширения пределов измерения амперметра и вольтметра в цепях переменного тока применяют измерительные трансформаторы тока и напряжения.

? КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как называется сопротивление, включаемое параллельно амперметру, для расширения его предела измерения?
2. Приборы какой системы применяют для измерения больших постоянных токов?
3. Из какого материала выполняют шунты для амперметра?

П ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Амперметр класса точности 1 с пределом измерения 5 А и внутренним сопротивлением 0,09 Ом включен параллельно шунту, расширяющему пределы измерения до 50 А. Определите сопротивление шунта и максимально возможную погрешность измерения.
2. Найдите величину добавочного сопротивления, расширяющего в 10 раз предел измерения вольтметра с внутренним сопротивлением 20 кОм и пределом измерения 30 В.
3. Амперметр класса точности 2,5 с пределом измерения 15 А и внутренним сопротивлением 0,018 Ом включен параллельно шунту, расширяющему его предел измерения в 10 раз. Рассчитайте сопротивление шунта и максимально возможную абсолютную погрешность измерения.
4. Амперметр, включенный через измерительный трансформатор тока 150/5 А, показал 4 А. Определите ток в первичной цепи.

5.4. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Измерение мощности в цепях постоянного тока. Мощность в электрических цепях измеряют прямым и косвенным способами. При прямом измерении используют ваттметры, а при косвенном — амперметры и вольтметры.

В цепях постоянного тока для измерения мощности ваттметр используют относительно редко, в основном применяют метод амперметра — вольтметра (рис. 5.6). Определив амперметром значение тока I и вольтметром напряжение U , вычисляют мощность по формуле

$$P = UI.$$

Для уменьшения погрешности, возникающей из-за влияния внутренних сопротивлений приборов, схему рис. 5.6, а используют при малом сопротивлении R , а схему рис. 5.6, б — при большом сопротивлении R нагрузки.

Измерение мощности в цепях переменного тока. Полную мощность S приемника измеряют, как правило, методом амперметра — вольтметра:

$$S = UI,$$

где U , I — действующие значения напряжения и тока соответственно.

Активную $P = UI \cos \varphi$ и реактивную $Q = UI \sin \varphi$ мощности приемников измеряют с помощью ваттметров.

Измерение активной мощности ваттметром в однофазных цепях производят по схеме, представленной на рис. 5.7, а. Токовую обмотку включают в цепь последовательно с приемником R_n (т. е. в цепь тока), а обмотку напряжения — параллельно приемнику R_n на напряжение U .

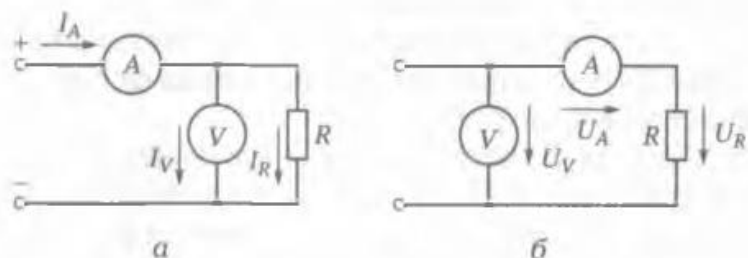


Рис. 5.6. Измерение мощности методом амперметра — вольтметра:
а — при малом сопротивлении нагрузки; б — при большом сопротивлении нагрузки

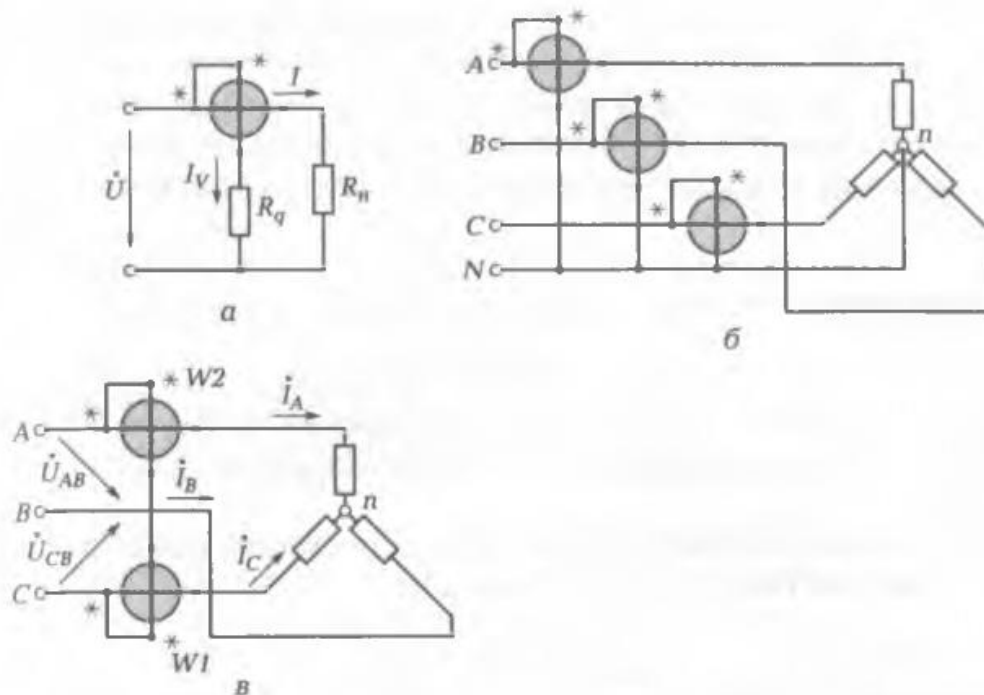


Рис. 5.7. Схемы измерения мощности:

а — в однофазной цепи переменного тока; б — в трехфазной четырехпроводной сети; в — в трехпроводной сети методом двух ваттметров

Реактивную мощность в однофазных цепях измеряют только в лабораториях при проведении каких-либо исследований включением обычных ваттметров по специальным схемам.

В трехфазной цепи переменного тока полная мощность приемника при симметричной нагрузке может быть измерена методом амперметра — вольтметра и вычислена по формуле

$$S = \sqrt{3}UI,$$

где U, I — действующие значения линейных напряжения и тока соответственно.

Полная мощность приемника при несимметричной нагрузке:

$$S = S_1 + S_2 + S_3,$$

где S_1, S_2, S_3 — полные мощности фаз приемника.

При измерении активной мощности в трехфазной четырехпроводной цепи включают три ваттметра (рис. 5.7, б). Активная мощность приемника определяется суммой их показаний:

$$P = P_1 + P_2 + P_3.$$

Широко распространено измерение активной мощности в трехфазных цепях методом двух ваттметров. Этот метод используют только для трехпроводной цепи. Одна из возможных схем включения ваттметров $W1$ и $W2$ представлена на рис. 5.7, в. Сумма показаний ваттметров определяет активную мощность приемника:

$$P = \alpha_{W_1} + \alpha_{W_2}.$$

При симметричной нагрузке эта сумма представляется в виде

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi,$$

где U, I — действующие значения линейных напряжения и тока соответственно; φ — сдвиг фаз между фазным напряжением U_ϕ и током I_ϕ .

Реактивная мощность трехфазного приемника равна разности показаний ваттметров, умноженной на $\sqrt{3}$:

$$Q = \sqrt{3}(\alpha_{W_1} - \alpha_{W_2}).$$

При симметричной нагрузке реактивную мощность измеряют методом двух или трех ваттметров, включенных по специальным схемам.

Измерение активной и реактивной энергии. Активную энергию в цепях однофазного переменного тока измеряют индукционными счетчиками, включаемыми в цепь по тем же схемам, что и ваттметры. Активная энергия выражается в ватт-секундах или киловатт-часах. Для измерения активной энергии в системах энергоснабжения широко применяют двух- и трехэлементные счетчики. В трехфазных цепях реактивная энергия учитывается с помощью трехфазных трехэлементных счетчиков.

! Запомните

- Электрическую мощность измеряют ваттметрами электродинамической или ферродинамической систем.
- Во избежание неправильного подключения ваттметра в контролируемую цепь начало измерительных цепей ваттметров отмечают знаком «звездочка». Эти зажимы называются *генераторными*, они должны быть подключены к одному полюсу источника электроэнергии.
- Для расширения пределов измерения ваттметров и счетчиков электроэнергии в их токовые цепи включают шунты или измерительные трансформаторы тока, а в цепи напряжения — добавочные сопротивления или трансформаторы напряжения.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие системы измерительных приборов могут быть использованы в качестве ваттметров?
2. Какой метод измерения мощности в основном применяют в цепях постоянного тока?
3. Как измеряют полную мощность в цепях переменного тока?

5.5.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Измерение методом амперметра—вольтметра. Сопротивление какой-либо электрической установки или участка электрической цепи можно определить методом амперметра—вольтметра (рис. 5.8), пользуясь законом Ома. Этот метод является наиболее простым для измерения малых и средних сопротивлений.

При включении приборов по схеме, приведенной на рис. 5.8, а, через амперметр проходит не только измеряемый ток I_x , но и ток I_V , протекающий через вольтметр. Поэтому сопротивление

$$R_x = \frac{U}{I - U/R_V},$$

где R_V — сопротивление вольтметра.

При включении приборов по схеме, представленной на рис. 5.8, б, вольтметр будет измерять не только падение напряжения U_x на определенном сопротивлении, но и падение напряжения в обмотке амперметра $U_A = IR_A$. Поэтому

$$R_x = \frac{U}{I} - R_A,$$

где R_A — сопротивление амперметра.

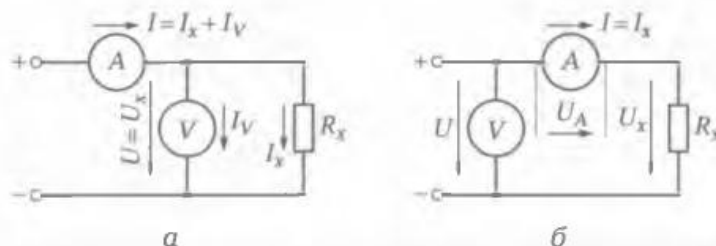


Рис. 5.8. Измерение сопротивления методом амперметра—вольтметра:
а — схема для измерения малых сопротивлений; б — схема для измерения больших сопротивлений

В тех случаях когда сопротивления приборов неизвестны и, следовательно, не могут быть учтены, нужно при измерении малых сопротивлений пользоваться схемой рис. 5.8, а, а при измерении больших сопротивлений — схемой рис. 5.8, б. При этом погрешность измерений, определяемая в первой схеме током I_V , а во второй — падением напряжения U_A , будет невелика по сравнению с током I_x и напряжением U_x .

Измерение сопротивлений электрическими мостами. Мостовая схема состоит из источника питания, чувствительного прибора (гальванометра Γ) и четырех резисторов, включаемых в плечи моста: с неизвестным сопротивлением R_x (резистор R_4) и известными сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 , которые могут при измерениях изменяться (рис. 5.9, а).

Прибор включают в одну из диагоналей моста (измерительную), а источник питания — в другую (питающую).

Сопротивления R_1 , R_2 и R_3 можно подобрать такими, что при замыкании контакта В показания прибора будут равны нулю (в таком случае принято говорить, что мост уравновешен). При этом неизвестное сопротивление

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3.$$

В некоторых мостах отношение плеч $\frac{R_1}{R_2}$ установлено постоянным, а равновесие моста достигается только подбором сопротивле-

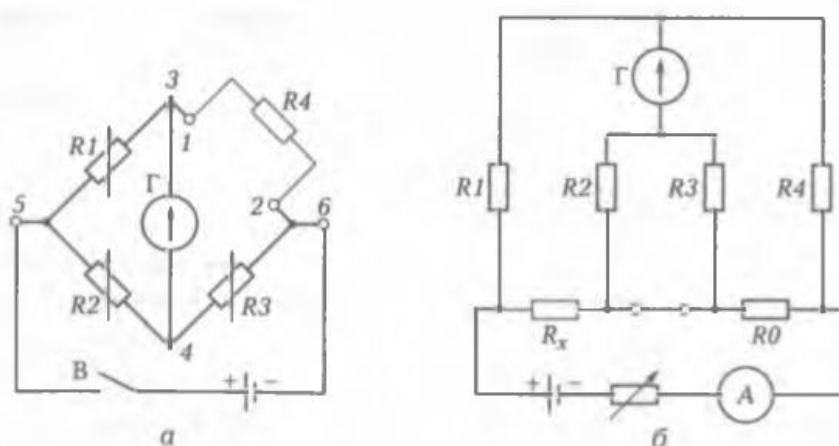


Рис. 5.9. Мостовые схемы постоянного тока, применяемые для измерения сопротивлений:

а — мостовая схема постоянного тока; б — двойной мост постоянного тока для измерения малых сопротивлений

ния R_3 . В других, наоборот, сопротивление R_3 постоянно, а равновесие достигается подбором сопротивлений R_1 и R_2 .

Существуют различные конструкции мостов постоянного тока, при использовании которых не требуется выполнять вычисления, так как неизвестное сопротивление R_x отсчитывают по шкале прибора. Смонтированные в них магазины сопротивлений позволяют измерять сопротивления от 10 до 100 000 Ом.

При измерении малых сопротивлений обычными мостами сопротивления соединительных проводов и контактных соединений вносят большие погрешности в результаты измерения. Для их устранения применяют двойные мосты постоянного тока (рис. 5.9, б). В этих мостах провода, соединяющие резистор с измеряемым сопротивлением R_x и некоторый образцовый резистор с сопротивлением R_0 с другими резисторами моста, и их контактные соединения оказываются включенными последовательно с резисторами соответствующих плеч, сопротивление которых устанавливается не менее 10 Ом. Поэтому они практически не влияют на результаты измерений. Провода же, соединяющие резисторы с сопротивлениями R_x и R_0 , входят в цепь питания и не влияют на условия равновесия моста. Поэтому точность измерения малых сопротивлений довольно высока. Мост выполняют так, чтобы при регулировках его соблюдались следующие условия: $R_1 = R_2$ и $R_3 = R_4$. В этом случае

$$R_x = \frac{R_0 R_1}{R_4}.$$

Двойные мосты позволяют измерить сопротивления от 0,000001 до 10 Ом.

Если мост не уравновешен, то стрелка в гальванометре будет отклоняться от нулевого положения, так как ток измерительной диагонали при неизменных значениях сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 и ЭДС источника тока будет зависеть только от изменения сопротивления R_x . Это позволяет проградуировать шкалу гальванометра в единицах сопротивления R_x или каких-либо других единицах (температура, давление и пр.), от которых зависит это сопротивление. Поэтому неуравновешенный мост постоянного тока широко используют в различных устройствах для измерения незлектрических величин электрическими методами.

Измерение омметром. Омметр представляет собой миллиамперметр 1 с магнитоэлектрическим измерительным механизмом и включается последовательно с измеряемым сопротивлением R_x (рис. 5.10) и добавочным резистором R_A в цепь постоянного тока. При неизменных ЭДС источника и сопротивления резистора R_A ток

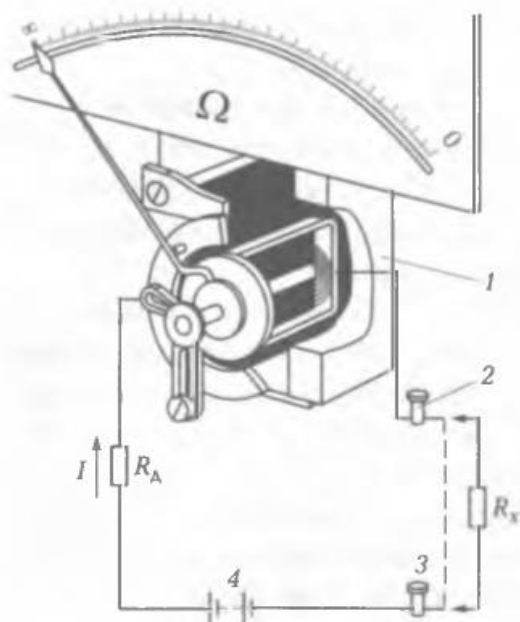


Рис. 5.10. Схема включения омметра:

1 — миллиамперметр; 2, 3 — зажимы прибора; 4 — сухой гальванический элемент

в цепи зависит только от сопротивления R_x . Это позволяет градуировать шкалу прибора непосредственно в омах. Если выходные зажимы прибора 2 и 3 замкнуты накоротко (см. штриховую линию), то ток I в цепи максимален и стрелка прибора отклоняется вправо на наибольший угол; на шкале этому соответствует сопротивление, равное нулю. Если цепь прибора разомкнута, то $I = 0$ и стрелка находится в начале шкалы; этому положению соответствует сопротивление, равное бесконечности.

Питание прибора осуществляется от сухого гальванического элемента 4, который устанавливается в корпусе прибора. Прибор будет давать правильные показания только в том случае, если источник тока имеет неизменную ЭДС (такую же, как и при градуировке шкалы прибора). В некоторых омметрах имеются два или несколько пределов измерения, например от 0 до 100 Ом и от 0 до 10 000 Ом. В зависимости от этого резистор с измеряемым сопротивлением R_x подключают к различным зажимам.

Омметры удобны на практике, но имеют большую погрешность из-за неравномерности шкалы и нестабильности источника питания. Для измерения сопротивления изоляции чаще всего применяют мегомметры магнитоэлектрической системы.

Измерение сопротивления заземления. Для измерения сопротивления изоляции отдельных частей электротехнических установок по отношению к «земле» и друг относительно друга применяют мегомметры. Согласно правилам сопротивление изоляции проводов должно быть не менее чем 1 000 Ом на каждый вольт ра-

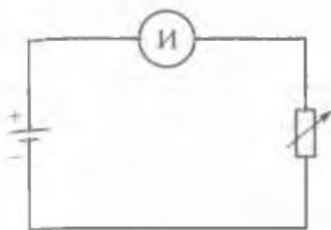


рис. 5.11. Схема градуировки стрелочного мегомметра



Рис. 5.12. Внешний вид современного мегомметра

бочего напряжения. Например, для сети с рабочим напряжением 220 В сопротивление изоляции должно быть не менее 220 000 Ом, или 0,22 МОм.

Стрелочные мегомметры, показания которых зависят от напряжения, состоят из источника напряжения и измерителя. Если последовательно в цепь включить регулируемое сопротивление R , то показания измерителя (вольтметра) будут зависеть от величины этого сопротивления (при постоянном напряжении цепи). При $R = 0$ показание вольтметра будет наибольшим, при $R = \infty$ вольтметр покажет нуль. Включая в цепь различные сопротивления, можно отградуировать шкалу измерителя непосредственно в омах (килоомах, мегаомах) (рис. 5.11).

В настоящее время применяются электронные мегомметры (рис. 5.12).

? КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими способами измеряют сопротивление резисторов постоянному току?
2. Какой метод является наиболее простым для измерения малых и средних сопротивлений?
3. Почему омметры имеют большую погрешность измерения?
4. Какие приборы применяют для измерения сопротивления изоляции?

5.6. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ

Индуктивность L и емкость C в основном измеряются косвенным методом с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра. Для более точных результатов применяют мостовой метод.

Метод амперметра — вольтметра — ваттметра (рис. 5.13) является наиболее доступным при определении параметров пассивных двухполюсников. Результаты измерений действующих значений тока I , напряжения U и мощности P позволяют вычислить полное сопротивление $Z_x = U/I$, активное сопротивление $R = P/I^2$ и реактивное сопротивление $X = \sqrt{Z_x^2 - R^2}$.

Если измеряемой величиной является индуктивность, то она определяется по формуле

$$L = \frac{X_L}{\omega},$$

а если емкость, то по следующей формуле:

$$C = \frac{1}{\omega X_C}.$$

Для измерения индуктивности и емкости также широко применяется **мостовой метод**. Схема моста, применяемого для определения параметров индуктивной катушки (R_x, L_x), приведена на рис. 5.14. При уравнивании моста омическое сопротивление провода обмотки индуктивной катушки

$$R_x = \frac{R_1 R_2}{R_3},$$

Измеряемая индуктивность

$$L_x = C_3 R_1 R_2,$$

где C_3 — образцовая (эталонная) емкость.

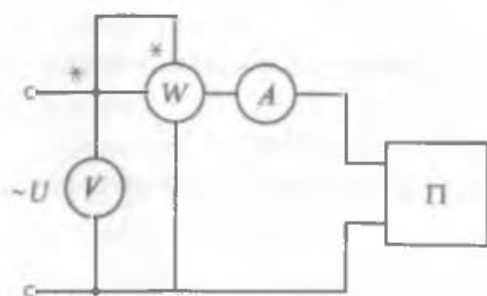


Рис. 5.13. Схема измерения индуктивности и емкости методом амперметра — вольтметра — ваттметра:

П — пассивный двухполюсник

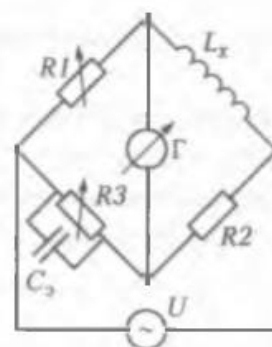
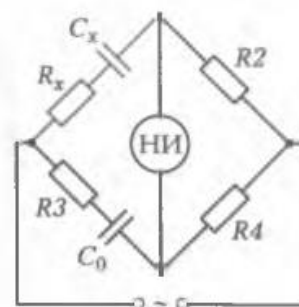


Рис. 5.14. Схема моста для измерения индуктивности

рис. 5.15. Схема моста для измерения емкости:
НИ — нулевой индикатор



Погрешность мостовых методов измерения составляет около 1 — 3 %; пределы измерения — 0,1 — 1 000 Гн.

Схема моста для измерения емкости C_x и сопротивления R_x конденсатора с малыми потерями приведена на рис. 5.15. Обеспечивая условие равновесия моста, получаем выражения:

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_2}; \quad R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4}.$$



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой метод измерения индуктивности и емкости является наиболее точным?
2. Можно ли измерить индуктивность катушки, используя только амперметр и вольтметр?
3. В чем сложность и ограниченность применения мостового метода для измерения индуктивности и емкости?

5.7. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ И СДВИГА ФАЗ

Измерение частоты. Измерение частоты является одной из важнейших задач измерительной техники. Для этой цели используют методы непосредственной оценки и метод сравнения. В области низких частот (до 2 кГц) для измерения частоты применяют электромеханические частотомеры. Для измерения высоких частот используют электронные аналоговые и цифровые частотомеры. Частоту нередко измеряют осциллографом (рис. 5.16).

При измерениях *методом непосредственной оценки* не требуется дополнительных измерительных приборов. В соответствии с инструкцией по эксплуатации осциллографа производят калибровку длительности развертки и подают исследуемый сигнал на «Вход Y». Переключением частоты развертки и регулировкой



Рис. 5.16. Внешний вид осциллографа двухлучевого

уровня синхронизации добиваются устойчивого изображения сигнала на экране. Измеряют целое число периодов сигнала (в делениях), укладывающихся на линии горизонтальной развертки, и определяют частоту исследуемого сигнала, Гц, по формуле

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

где n — число периодов исследуемого сигнала; l — длина линии развертки (в делениях масштабной сетки), на которой укладывается возможно большее целое число периодов исследуемого сигнала; T_p — коэффициент развертки в исследуемом диапазоне, с/дел.

Измерение частоты этим способом не требует, как отмечено ранее, других измерительных приборов, но не обладает высокой точностью.

Для измерений **методом сравнения** дополнительно требуется генератор сигналов. Измерения производят методом *фигур Лиссажу*.

Сигнал известной частоты от генератора сигналов подают на «Вход X» осциллографа, исследуемый сигнал — на «Вход Y». Генератор горизонтальной развертки выключают. Органами управления устанавливают приблизительно одинаковые размахи отклонения луча по горизонтали и вертикали. Изменяя частоты генератора сигналов, стараются получить на экране фигуру Лиссажу первого порядка — эллипс или круг (рис. 5.17). При этом частоты исследуемого сигнала и генератора оказываются равными. Значение измеренной частоты считывают со шкалы генератора.

Если максимальное значение частоты имеющегося генератора ниже частоты исследуемого сигнала, можно воспользоваться более сложными фигурами Лиссажу, получаемыми на экране осциллографа при кратном соотношении частот.

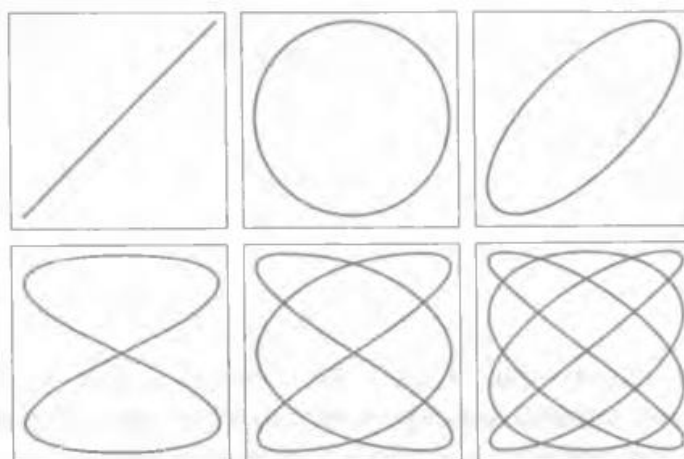


Рис. 5.17. Фигуры Лиссажу

Расшифровывают подобные осциллограммы следующим образом. Регулировками положения луча по вертикали и горизонтали перемещают фигуру Лиссажу так, чтобы горизонтальная и вертикальная линии масштабной сетки экрана оказались касательными к боковой и нижней (верхней) сторонам фигуры (рис. 5.18). Подсчитывают число точек касания фигуры с линиями сетки. Отношение числа этих точек показывает отношение частот генератора f_r и исследуемого f сигналов. Например, для фигуры, изображенной на рис. 5.18, соотношение частот f и f_r равно $5 : 2$, поэтому частоту исследуемого сигнала находят по формуле

$$f = \frac{5f_r}{2}.$$

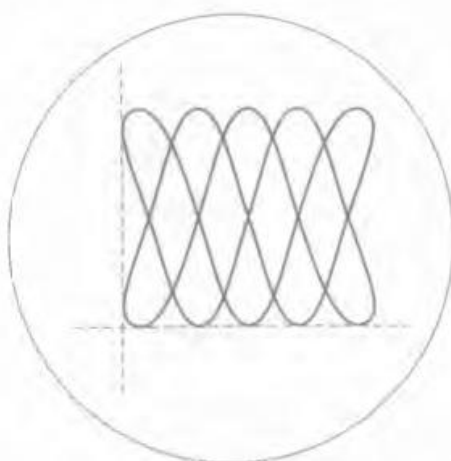


Рис. 5.18. Фигура Лиссажу при соотношении частот исследуемого и эталонного сигналов $5:2$

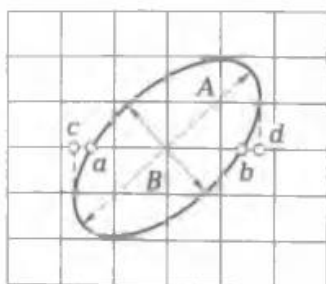


Рис. 5.19. Измерение сдвига фаз методом эллипса

Измерение сдвига фаз. Сдвиг фаз между двумя напряжениями определяется **методами непосредственной оценки** и **сравнения** при исследовании различного рода четырехполюсников (трансформаторов, фильтров, усилителей и др.) в заданном диапазоне частот, а также зависимости сдвига фаз от частоты. Сдвиг фаз выражается в радианах или градусах.

Наиболее распространены для измерения сдвига фаз электродинамический (на низких частотах), электронный, цифровой фазометры и осциллограф (на высоких частотах).

Способ оценки сдвига фаз между двумя напряжениями с помощью электронно-лучевого осциллографа **методом эллипса** демонстрируется на рис. 5.19.

Одно из исследуемых напряжений $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$ подают на вход Y , а другое $u_2 = U_{2m} \sin \omega t$ — на вход X электронно-лучевого осциллографа. На экране появится фигура — эллипс. Центр эллипса совмещают с началом координат. Находят точки пересечения эллипса с осями и определяют максимальную абсциссу (ординату). При $t = 0$ и $t = 2\pi/\omega$ напряжение $u_1 = 0$, а напряжение $u_2 = \pm U_{2m} \sin \varphi$. Отрезок ab эллипса пропорционален $2U_{2m} \sin \varphi$, а отрезок cd , соответствующий максимальному отклонению луча по горизонтали, пропорционален $2U_{2m}$. В этом случае

$$\varphi = \arcsin \frac{ab}{cd}.$$

Можно вычислить сдвиг по фазе и по отношению большой B и малой A осей эллипса:

$$\varphi = 2 \arctg \frac{B}{A}.$$

Погрешность измерения сдвига фаз осциллографом составляет 5—10 % и определяется неточностью отсчета длин отрезков, деформацией эллипса из-за наличия высших гармоник в исследуемых напряжениях, наличием собственного сдвига фаз в каналах прибора.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы способы измерения частоты?
2. Каким образом по фигуре Лиссажу на экране осциллографа можно определить неизвестную частоту?
3. В чем состоит суть способа измерения сдвига фаз методом эллипса?



ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И РЕФЕРАТОВ

1. Назначение и типы электроизмерительных приборов.
2. Измерение электрическими методами неэлектрических величин.
3. Способы расширения пределов измерения электроизмерительных приборов и их реализация.
4. Тенденции развития аналоговых измерительных приборов.
5. Тенденции развития цифровых измерительных приборов.
6. Использование микропроцессорной техники в развитии цифровых измерительных приборов.