

Н.Г. Худорожкова

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Учебное пособие



Н.Г. Худорожкова

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Учебное пособие

2013

ВВЕДЕНИЕ

Измерения являются одним из важнейших путей познания природы человеком. Они дают количественную характеристику окружающего мира, раскрывая человеку действующие в природе закономерности. Математика, механика, физика стали именоваться точными науками потому, что благодаря измерениям они получили возможность устанавливать точные количественные соотношения, выражающие объективные законы природы. Д. И. Менделеев выразил значение измерений для науки следующим образом: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять. Точная наука немислима без меры».

Особенно возросла роль измерений в наш век широкого внедрения новой техники, развития электроники, автоматизации, атомной энергетики, космонавтики. В каждой области человеческой деятельности используются свои методы и средства измерения конкретных физических величин. Но в современной практике, как правило, в основе этих подходов лежат *электрические измерения*.

Причина широкого распространения электрических измерений – это простота и удобство получения, преобразования, передачи и хранения информации, представленной в электрической форме. Подавляющее большинство современных средств измерений основано на принципах электрических измерений, т.к. теоретическая и прикладная электротехника имеет дело с различными электрическими и магнитными величинами, которые не воспринимаются непосредственно нашими органами чувств. Поэтому обнаружение присутствия этих величин, количественное определение их, а также изучение электрических и магнитных явлений возможно только при помощи электроизмерительных устройств (приборы, преобразователи и т.д.).

В системах электроснабжения измеряют: ток (I), напряжение (U), активную (P) и реактивную мощности (Q), электроэнергию, активное, реактивное и полное сопротивление (R , X , Z), частоту (f), коэффициент мощности ($\cos \varphi$); при энергоснабжении измеряют температуру (θ), давление (p), расход энергоносителя (G), тепловую энергию (E), перемещение (X) и др.

В пособии рассмотрена классификация измерений, наиболее важная для теории и практики электрических измерений. К такой классификации можно отнести классификацию измерений с методологической точки зрения, т. е. в зависимости от общих приемов получения результатов измерений (виды или классы измерений), классификацию измерений в зависимости от использования принципов и средств измерений (методы измерений) и классификацию измерений в зависимости от динамики измеряемых величин.

1 ИЗМЕРЯЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Объектом измерения является физическая величина, характеризующая одно из свойств физического объекта, которое можно выражать количественно в принятых единицах. Всякое измерение реализует операцию сравнения однородных свойств физических величин по признаку «больше-меньше». В результате сравнения каждому размеру измеряемой величины приписывается положительное действительное число:

$$x = q [x], \quad (1.1.)$$

где q – числовое значение величины или результат сравнения;

$[x]$ – единица величины.

Можно сказать также, что **единица физической величины** – такое ее значение, которое принимают за основание для сравнения с ним физических величин того же рода при их количественной оценке.

Уравнение (1.1) является **основным уравнением измерения**. Числовое значение q находят как

$$q = x / [x],$$

следовательно, оно зависит от принятой единицы измерения.

Физическая величина, подлежащая измерению, измеряемая или измеренная в соответствии с основной целью измерительной задачи называется *измеряемой физической величиной* или *просто измеряемой величиной*.

Измеряемые величины – это величины непосредственно воспринимаемые средствами измерений. Их можно классифицировать с помощью различных признаков, основными из которых являются: **природа величины, вид отражаемой стороны эмпирических объектов, метризуемость и изменяемость**.

По природе измеряемые величины разделяются на 11 классов: *электрические, магнитные, электромагнитные, механические, акустические, тепловые, оптические, химические, радиоактивные, пространственные и временные*. Каждый класс включает конечное множество конкретных величин.

По виду отражаемой стороны эмпирических объектов каждый класс измеряемых величин разделяется на два подкласса: *энергетические* и *вещественные величины*.

К энергетическим величинам относятся, например, *сила электрического тока, электрическое напряжение, напряженность электрического поля, напряженность*

магнитного поля, механически сила, давление и т. п. Метрологическая общность энергетических величин заключается в использовании при их измерении энергии объектов исследования.

Вещественными величинами являются различные свойства веществ и материалов, а также параметры физических тел и объектов, например, *удельное электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость, магнитное сопротивление, акустическое сопротивление* и т.п. Метрологическая общность вещественных величин состоит в использовании при их измерении измерительных преобразований и других приемов косвенных измерений.

По признаку метризуемости измеряемые величины разделяются на *непосредственно* и *косвенно метризуемые* величины.

К непосредственно метризуемым величинам относится около двух десятков физических величин, остальные являются косвенно метризуемыми величинами. Непосредственно метризуемые величины измеряются наиболее просто и с высокой точностью.

Измерение косвенно метризуемых величин осуществляется с использованием различных функциональных связей и с преобразованием их в непосредственно метризуемые величины.

По признаку изменяемости выделяют состояния и изменения величин. Состояние величины в общем случае характеризуется размером величины, нахождение значения которого и является задачей измерения.

Изменение величины может происходить в пределах какого-либо диапазона размеров и во времени.

В зависимости от числа размеров **по диапазону** различают *непрерывные* и *квантованные* по размеру изменения величин.

При непрерывном по размеру изменении величины по диапазону имеется бесконечное число размеров по диапазону.

При квантованном по размеру изменении величины в данном диапазоне проявляется конечное число размеров величины.

Изменение величины **во времени** может быть *непрерывным* и *дискретным* (*прерывным во времени*).

При непрерывном изменении величины во времени значения размеров величины определены на данном отрезке времени при бесконечно большом числе моментов времени.

При дискретном изменении величины значения размеров величины отличны от нуля только в определенные моменты или интервалы времени. На рисунках 1.1 и 1.2 показаны четыре характерные разновидности изменения величин.

Проявления размеров величины по диапазону и во времени могут быть *неслучайными (детерминированными)* и *случайными*. Детерминированное изменение величины характеризуется тем, что закон его известен. Случайное изменение величины происходит случайным образом.

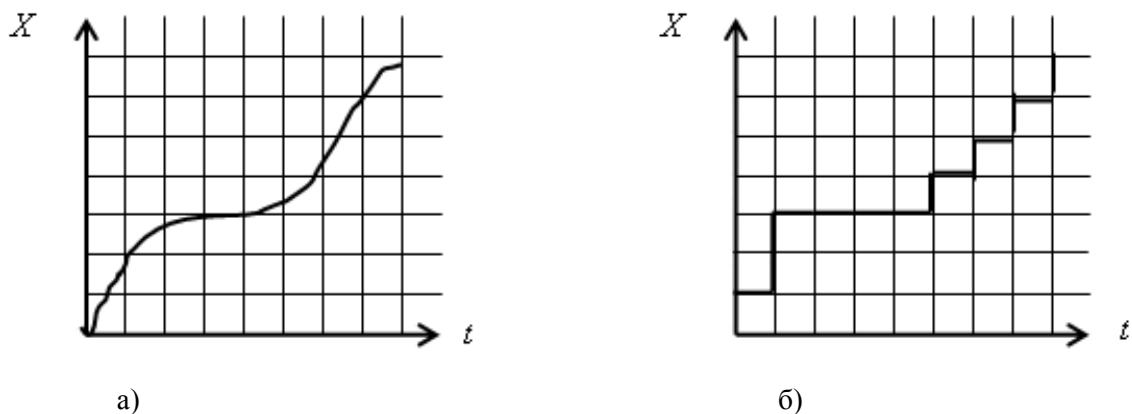


Рисунок 1.1 – Изменение измеряемых величин во времени:

а) непрерывное по размеру и во времени;

б) квантованное по размеру и непрерывное во времени.

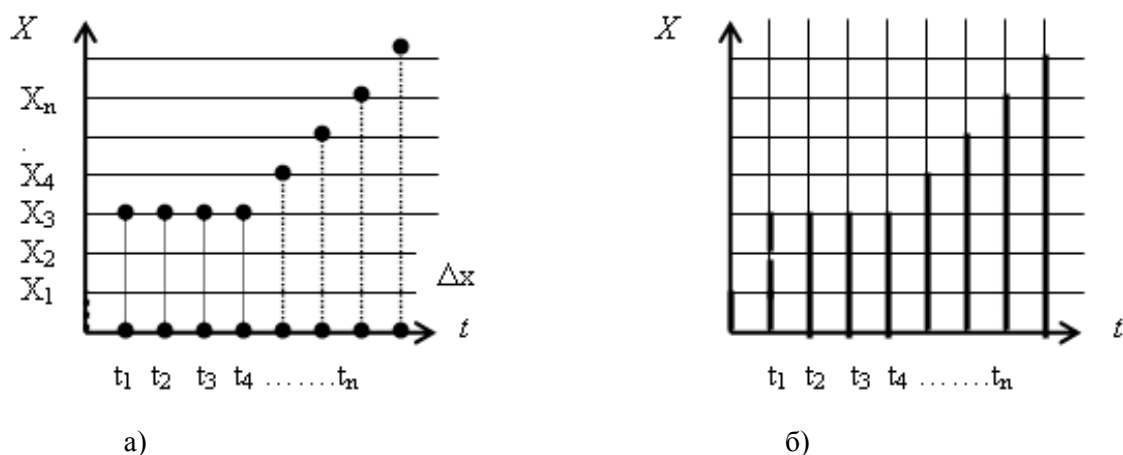


Рисунок 1.2 – Измерение измеряемых величин во времени:

а) непрерывное по размеру и дискретное по времени;

б) квантованное по размеру и дискретное по времени.

Детерминированные непрерывные и дискретные изменения величин подразделяются на *периодические* и *непериодические*. Непрерывные периодические и непериодические изменения величин далее подразделяются по виду описывающих их функций. Указанные изменения величин характеризуются обобщенными параметрами и диапазонами их значений.

Для периодически изменяющейся величины $x(t)$ любой формы с периодом T важными параметрами являются

амплитудное x_m , среднее $x_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$ и действующее $x_d = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$ значения,

а также частота изменения величин. Непериодическое изменение величины характеризуется максимальным значением, скоростью нарастания и скоростью спада.

Дискретные периодические и непериодические изменения величин подразделяются по форме импульса и характеризуются обобщенными параметрами (*мгновенным, амплитудным, средним значениями*, а также *длительностью импульса, временем нарастания (спада) импульса, частотой следования*) и диапазонами их значений.

Случайные непрерывные и дискретные изменения величин разделяются на *стационарные* и *нестационарные*. При стационарном изменении величин, в отличие от нестационарного, статистические параметры отдельных проявлений размеров не зависят от времени.

Случайные изменения величин описываются различными функциями (функцией распределения вероятностей, функцией плотности распределения вероятностей, автокорреляционной функцией, спектральной плотностью и другими), каждая из которых может определяться вероятностями и количеством реализации, а также диапазонами их значений.

Независимо от того, воспринимается состояние или изменение величины измеряемой величиной, в любом конкретном случае может быть определено мгновенное значение размера величины. При измерении состояния величины, т. е. не изменяющейся во времени величины или весьма медленно меняющейся, процесс измерения может осуществляться в течение длительного времени и к средствам измерения не предъявляется особых требований по быстродействию.

Измерение параметров изменений величин требует повышенного быстродействия средств измерений. При этом помимо мгновенного значения размера величины в качестве измеряемой величины может выступать любой из указанных выше параметров изменений величин.

Различают *истинное* и *действительное значения* размера величины.

Истинное значение размера величины есть значение размера величины, которое идеальным образом отражает количественную сторону соответствующего свойства объекта. Экспериментально определить его можно только в случае измерения количеств дискретных элементов каких-либо совокупностей, когда погрешность измерения практически может отсутствовать. Получить путем измерения истинное значение размера непрерывного изменения величины невозможно, так как в этом случае погрешности измерения неизбежны. Поэтому на практике часто вместо истинного пользуются действительным значением.

Действительное значение размера величина – это значение, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному, что может быть использовано вместо него. Определяют его с помощью образцовых средств измерения, погрешностями которых по сравнению с используемыми при измерении средствами можно пренебречь.

1.1 Системы единиц физических величин

При проведении любых измерений измеряемая величина сравнивается с другой однородной с ней величиной, принятой за единицу. Для построения системы единиц выбирают произвольно *несколько физических величин*. Они называются **основными**. Величины, определяемые через основные, называются **производными**. Совокупность основных и производных величин называется **системой физических величин**.

Система величин может состоять как из *размерных*, так и *безразмерных величин*.

Размерной называется величина, в размерности которой хотя бы одна из основных величин возведена в степень, не равную нулю.

Безразмерной называется величина, в размерность которой основные величины входят в степени, равной нулю. Безразмерная величина одной системы величин может быть размерной величиной в другой системе. Система физических величин используется для построения системы единиц физических величин.

Единица физической величины представляет собой значение этой величины, принятое за основание для сравнения с ней значений величин того же рода при их количественной оценке. Ей по определению присвоено числовое значение, равное 1.

Единицы основных и производных величин называются соответственно *основными* и *производными единицами*, их совокупность называется **системой единиц**. Выбор единиц в пределах системы в какой-то мере произволен. Однако в качестве основных единиц выбирают такие, которые, во-первых, могут быть воспроизведены с наивысшей точностью, а во-вторых, удобны в практике измерений или их воспроизведения. Единицы величин, входящих в систему, называются **системными**. Кроме системных единиц, применяются и внесистемные единицы. **Внесистемные единицы** – это единицы, не входящие в систему. Они удобны для отдельных областей науки и техники или регионов и поэтому получили широкое распространение. К внесистемным единицам относятся: *единица мощности* – лошадиная сила, *единица энергии* – киловатт·час, *единицы времени* – час, сутки, *единица температуры* – градус Цельсия и многие другие. Они возникли в процессе развития техники измерений для удовле-

творения практических потребностей или введены для удобства пользования ими при измерениях. С теми же целями применяются **кратные** и **дольные** единицы величин.

Кратной единицей называется такая, которая в целое число раз больше системной или внесистемной единицы: *килоГерц, мегаВатт*.

Дольной единицей называется такая, которая в целое число раз меньше системной или внесистемной единицы: *миллиАмпер, микроВольт*. Строго говоря, многие внесистемные единицы могут рассматриваться как кратные или дольные единицы.

В науке и технике широко распространены также **относительные** и **логарифмические величины** и их единицы, которыми характеризуются *усиление и ослабление электрических сигналов, коэффициенты модуляции, гармоник* и т. д.

Относительные величины могут выражаться в безразмерных относительных единицах, в процентах, в промилле.

Логарифмическая величина представляет собой логарифм (в радиоэлектронике обычно десятичный) безразмерного отношения двух одноименных величин. Единицей логарифмической величины является *бел (Б)*, определяемый соотношением

$$N = \lg P_1 / P_2 = 2 \lg F_1 / F_2, \quad (1.2)$$

где P_1, P_2 – *одноименные энергетические величины* (значения мощности, энергии, потока плотности мощности и т. п.);

F_1, F_2 – *одноименные силовые величины* (напряжение, сила тока, напряженность электромагнитного поля и т. п.).

Как правило, применяют дольную единицу от бела, называемую *децибелом*, равным 0,1 Б. В этом случае в формуле (2) после знаков равенства добавляется дополнительный множитель 10. Например, отношение напряжений $U_1/U_2 = 10$ соответствует логарифмической единице 20 дБ.

Имеется тенденция к применению естественных систем единиц, основанных на универсальных физических постоянных (константах), которые могли бы быть приняты в качестве основных единиц: *скорость света, постоянная Больцмана, постоянная Планка, заряд электрона* и т.п. Преимуществом такой системы является постоянство основания системы и высокая стабильность констант. В некоторых эталонах такие постоянные уже используются: эталон единицы частоты и длины, эталон единицы постоянного напряжения. Но размеры единиц величин, основанных на константах, на современном уровне развития техники неудобны для практических измерений и не обеспечивают необходимой точности получения всех производных единиц. Однако такие достоинства естественной системы единиц, как неразрушаемость, неизменность

во времени, независимость от местоположения, стимулируют работы по изучению возможности их практического применения.

Впервые совокупность основных и производных единиц, образующих систему, предложил в 1832 г. К. Ф. Гаусс. В качестве основных единиц в этой системе приняты три произвольные единицы – *длины, массы и времени*, соответственно равные *миллиметру, миллиграмму и секунде*. Позднее были предложены и другие системы единиц физических величин, базирующихся на метрической системе мер и различающихся основными единицами. Но все они, удовлетворяя одних специалистов, вызывали возражения других. Это требовало создания новой системы единиц. В какой-то мере удалось разрешить существовавшие противоречия после принятия в 1960 г. XI Генеральной конференцией по мерам и весам Международной системы единиц, названной сокращенно СИ (SI). В России она вначале была принята как предпочтительная (1961 г.), а затем после введения в действие ГОСТ 8.417–81 «ГСИ. Единицы физических величин» – как обязательные во всех областях науки, техники, народного хозяйства, а также во всех учебных заведениях.

В качестве основных в Международной системе единиц (СИ) выбраны семь следующих единиц: *метр, килограмм, секунда, ампер, Кельвин, кандела, моль*.

Единицы измерения электрических величин представлены в приложении А данного пособия.

Контрольные вопросы

1. Что называется измерением?
2. Что является объектом измерения?
3. Что такое единица измерения?
4. По каким признакам можно классифицировать измеряемые величины?
5. Как определяют размер величины?
6. Какие единицы величин будут являться основными, а какие производными?
7. Что такое система физических величин, ее структура?
8. Что такое внесистемные единицы?
9. Какие единицы измерения относятся к кратным, а какие являются дольными?
10. Как выражаются относительные и логарифмические единицы?

2 СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Средства измерений (СИ) – технические средства, используемые при измерении и имеющие нормированные метрологические свойства, т. е. свойства, оказываю-

щие влияние на результаты и погрешности измерения.

Измерительные средства можно разделить на: *эталон, образцовые и рабочие средства измерений*.

Эталон единицы - это средство измерений, обеспечивающее воспроизводство и (или) хранение единицы физической величины с целью передачи ее размера образцовым и рабочим средствам измерений.

Образцовое средство измерений - мера или измерительное устройство, служащие для поверки по ним других средств измерений и утвержденные в качестве образцовых.

Рабочее средство измерений – средство, применяемое для измерений, не связанных с передачей размера единицы.

По назначению средства измерений делятся на следующие категории:

1. Меры.
2. Измерительные приборы.
3. Измерительные преобразователи.
4. Измерительные установки.
5. Измерительные системы.

Поверка средств измерений - совокупность операций, выполняемых органами государственной метрологической службы или другими уполномоченными на то органами и организациями с целью определения и подтверждения соответствия средства измерений установленным техническими требованиями и ГОСТ. Другими словами - проверка прибора на специальном оборудовании.

2.1 Меры

Меры – средства измерений, предназначенные для воспроизведения физической величины заданного размера с определенной точностью.

Примерами мер являются *меры затухания, магазины сопротивлений – меры сопротивления, измерительные генераторы, меры напряжения (мощности) и частоты сигналов* и т. д. К мерам относятся также образцы и образцовые вещества.

Существуют *однозначные* и *многозначные (переменные меры)* (рисунок 2.1). Мера, воспроизводящая физическую величину одного размера, называется **однозначной**. Например, *гиря, плоскопараллельная концевая мера длины, измерительная колба, мера ЭДС – нормальный элемент, конденсатор постоянной емкости*. Величины, для которых операция сложения выполняется сравнительно легко, воспроизводятся с помощью однозначных или многозначных мер, объединяемых в наборы или магазины мер. Мера, воспроизводящая ряд одноименных величин различного размера, называ-

ется *многозначной*. Этот ряд может быть *непрерывным* или *дискретным*. Наиболее распространенными многозначными мерами являются *миллиметровая линейка*, *вариометр индуктивности*, *конденсатор переменной емкости*.

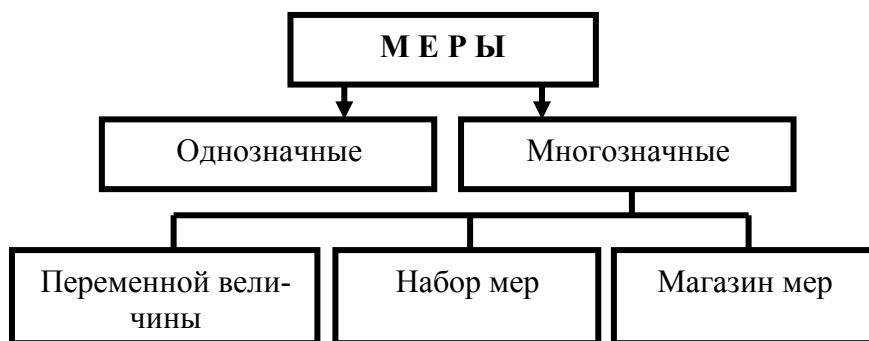


Рисунок 2.1 - Классификация мер

В качестве многозначной меры может быть использован набор мер – специально подобранный комплект мер, применяемых не только по отдельности, но и в различных сочетаниях с целью воспроизведения ряда одноименных величин различного размера. Например, *набор гирь*, *набор образцовых конденсаторов* и т. д.

Магазин мер – это набор мер, конструктивно объединенных в одно целое. Магазин мер имеет коммутирующее устройство для получения требуемого значения воспроизводимой величины, например, *магазин активных сопротивлений* – как *набор резисторов*.

При изготовлении наборов или магазинов мер к выбору ряда значений предъявляют особые требования. При этом стремятся наиболее рационально, используя наименьшее число мер, обеспечить возможность получения числа сочетаний. Например, набор гирь строится по ряду 1; 2; 2; 5 (в каждом десятичном числовом разряде), что дает возможность воспроизвести все значения от 1 до 10. Такой ряд признан более рациональным чем, ряд 1; 2; 3; 4, содержащий гири четырех размеров вместо трех. Это имеет большее значение при массовом производстве. Кроме того гири 2 и 3, а особенно 3 и 4 не очень заметно отличаются по размерам, что усложняет пользование ими.

Меры применяются как самостоятельные средства, так и в качестве элементов других средств измерений (приборов, преобразователей).

2.2 Измерительные приборы

Измерительные приборы – средства измерений, предназначенные для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для восприятия наблю-

дателем (например, *вольтметр*, *амперметр*).

Выработка измерительной информации может основываться на использовании различных физических принципов. Например, для измерения длины применяют *механические, оптические, пневматические и электрические измерительные приборы*.



Рисунок 2.2 – Классификация электрических измерительных приборов

Как правило, измерительный прибор имеет устройства для преобразования измеряемой величины в сигнал измерительной информации и устройство для его индикации в форме, наиболее доступной для восприятия. Во многих случаях устройство для индикации имеет шкалу со стрелкой, диаграмму, цифровое табло или дисплей, благодаря которым может быть произведен отсчет или регистрация результата измерений. В компьютеризированных СИ регистрация результата измерений может проводиться автоматически на носитель того или иного вида.

Различают следующие виды измерительных приборов (рисунок 2.2): **аналоговые** (выходной сигнал является непрерывной функцией измеряемой величины) и **цифровые** (выходной сигнал представлен в цифровом виде), **показывающие** (допускают только отсчитывание показаний) и **регистрирующие** (предусмотрена регистрация результатов измерений). Например, микрометр и цифровой вольтметр относятся к показывающим измерительным приборам, барограф - к регистрирующим.

Различают также измерительные приборы *прямого действия* и *сравнения*. В измерительном приборе **прямого действия** результат измерений снимается непосредственно с его устройства индикации. Примерами таких приборов являются амперметр, манометр, ртутно-стеклянный термометр. Измерительные приборы прямого действия предназначены для измерений методом непосредственной оценки.

В отличие от них, измерения методом сравнения с мерой проводится с помощью измерительных **приборов сравнения**, называемых также **компараторами**. *Измерительный прибор сравнения* - измерительный прибор, предназначенный для непосредственного сравнения измеряемой величины с величиной, значение которой известно. Примерами компараторов являются: двухчашечные весы, интерференционный компаратор мер длины, мост электрического сопротивления, электроизмерительный потенциометр, фотометрическая скамья с фотометром. Компараторы для выполнения своих функций могут не хранить единицу. Такие компараторы, строго говоря, нельзя считать средствами измерений. Тем не менее, они должны обладать рядом важных метрологических свойств, прежде всего, обеспечивать небольшую случайную погрешность и высокую чувствительность измерений.

Любой измерительный прибор прямого действия можно использовать в качестве компаратора, если последовательно регистрировать его показания при измерениях величины, воспроизводимой мерой, и неизвестной величины. Именно так и делается в аналитических измерениях: аттестация стандартных образцов, как правило, проводится методом сличения при помощи компаратора, в роли которого может выступить любой аналитический прибор, способный с приемлемой точностью измерить величину, воспроизводимую этими образцами. Как правило, такое применение измерительного прибора может обеспечить гораздо более высокую точность измерений, чем при его использовании для измерений методом непосредственной оценки. Это легко понять, если учесть, что при использовании измерительного прибора в качестве компаратора реализуется метод измерений, называемый методом замещения, при котором исключается систематическая погрешность измерительного прибора.

С другой стороны, при методе замещения результат измерений отягощают две случайные погрешности измерительного прибора, т. к. проводятся два измерения (измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой). Поэтому, если измерительный прибор имеет большую случайную погрешность, он непригоден для использования в качестве компаратора.

Если же его случайная погрешность мала, в связи с отсутствием систематической составляющей погрешность измерений будет меньше, чем при измерении методом непосредственной оценки.

Электрические измерительные приборы различаются по следующим признакам:

- **По роду измеряемой величины** применяются различные электроизмерительные приборы, например, по *току* - амперметр; по *напряжению* - вольтметр; по *электрическому сопротивлению* - омметр, мосты сопротивлений; по *мощности* -

ваттметр; по *электрической энергии* - счетчик; по *частоте переменного тока* - частотомер; по *коэффициенту мощности* - фазометр и др.

- **По роду тока** приборы делятся на виды: *постоянного тока, переменного тока, постоянного и переменного тока*. В таблице 2.1 приведены обозначения рода тока.

- **По степени точности** приборы делятся на 8 классов:

0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5 и 4.

Цифры указывают значение допустимой приведенной погрешности в процентах. Самый точный прибор имеет класс **0,05**. Погрешность тем меньше, чем ближе измеряемая величина к номинальному значению прибора. Поэтому предпочтительно использовать такие приборы, у которых во время измерения стрелка будет находиться во второй половине шкалы.

Таблица 2.1

№ п/п	Род тока	Обозначение
1	Постоянный	—
2	Переменный однофазный	~
3	Постоянный и переменный	— ~
4	Трехфазный ток (общее значение)	~ ~ ~
5	Трехфазный ток при неравномерной нагрузке фаз	~ ~ ~ / ~ ~ ~

- **По способу обработки сигнала измерительной информации** приборы делятся на *аналоговые* и *цифровые*.

В **аналоговых приборах** показания являются непрерывной функцией размера измеряемой величины, т.е. могут, как и измеряемая величина, принимать бесконечное множество значений.

В **цифровых приборах** непрерывная измеряемая величина дискретизируется по времени, квантуется по уровню, кодируется и в виде цифрового кода отображается на цифровом отсчете устройстве. В результате показания цифрового прибора можно принимать лишь конечное число значений. Цифровые средства измерения обеспечивают, как правило, *большую точность и быстроедействие*. Однако не всегда цифровое устройство лучше аналогового. При большом числе одновременно измеряемых величин (контроль сложного объекта) или при динамическом изменении входной величины показания аналоговых приборов воспринимаются легче, обеспечивая оперативность анализа контролируемого процесса. Поэтому для повышения информативности отсчетные устройства современных цифровых приборов могут дополняться, так называемыми, линейными шкалами - определенным образом расположенными сегментами на цифровом индикаторе.

- **По способу отображения результата измерения** аналоговые и цифровые приборы принято разделять на *показывающие*, допускающие только отсчитывание показаний, и *регистрирующие*, в которых предусмотрена возможность автоматической и (или) ручной регистрации показаний.

- **По способу получения отсчета** приборы могут быть с *непосредственным отсчетом и самозаписывающие*.

- **По принципу действия** приборы подразделяются на *магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические (ферродинамические), индукционные, тепловые, вибрационные, термоэлектрические, детекторные* и др. Обозначения принципа действия приборов приведены в Приложении В.

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

Кроме этих признаков, электроизмерительные приборы можно также отличать: *по способу монтажа; по способу защиты от внешних магнитных или электрических полей; по выносливости в отношении перегрузок; по пригодности к применению при различных температурах; по габаритным размерам* и другим признакам (см. Приложение Б).

2.2.1 Структура измерительного прибора

Принципиально измерительный прибор состоит из *ряда измерительных преобразователей, каналов связи, согласующих элементов, измерительного механизма, которые в совокупности образуют измерительную цепь прибора*. Измерительная цепь осуществляет все преобразования сигнала измерительной информации.

Измерительная цепь начинается *чувствительным элементом*, являющимся составной частью первичного преобразователя. На элемент непосредственно воздействует измеряемая величина. Оканчивается цепь *отсчетным устройством*, с помощью которого наблюдатель определяет значение измеряемой величины, выраженное в принятых единицах измерения. Это значение называют **показанием средства измерения**, которое образуется от отсчета (отвлеченного числа), снятого при измерении с отсчетного устройства прибора. Переход от отсчета к показанию осуществляется *умножением отсчета на цену деления шкалы*, под которой понимается *разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы*.

Структурную схему, например, аналогового электромеханического прибора в общем виде можно представить как схему, представленную на рисунке 2.3.

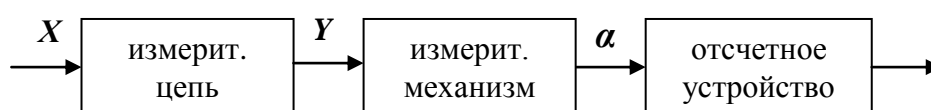


Рисунок 2.3 – Структурная схема аналогового электромеханического прибора

Измерительная цепь – обеспечивает преобразование электрической величины X в промежуточную электрическую величину Y , функционально связанную с величиной X и пригодную для непосредственной обработки измерительным механизмом.

Измерительный механизм – основная часть прибора, предназначенная для преобразования электромагнитной энергии в механическую, необходимую для создания угла поворота α .

$$\alpha = f(Y) = F(X).$$

Отсчетное устройство – состоит из указателя, связанного с измерительным механизмом и шкалы.

Указатели бывают стрелочные (механические) и световые. Они выполнены в виде стрелки или светового пятна с темной нитью посередине. По форме стрелки бывают нитевидными, ножевидными и копьевидными.

Шкала обычно представляет собой светлую поверхность с черными делениями и цифрами, соответствующими определенным значениям измеряемой величины. Форма шкалы зависит от конструкции прибора, класса точности и ряда других факторов.

На шкале каждого прибора наносятся следующие обозначения:

- обозначение единицы измеряемой величины;
- условное обозначение системы прибора (или принципа действия прибора);

- обозначение класса точности прибора;
- условное обозначение положения прибора;
- условное обозначение степени защищенности от магнитных и других влияний;
- величина испытательного напряжения изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу;
- год выпуска и заводской номер;
- обозначение рода тока;
- тип прибора;
- значения силы тока, соответствующие определенным значениям напряжения, и значения напряжения, соответствующие определенным значениям силы тока.

Шкалы приборов имеют деления. Для перевода числа делений в единицы измеряемой величины необходимо отсчет по шкале умножить на цену деления шкалы для данного предела измерения.

Цена деления – это число единиц измеряемой величины, приходящееся на одно деление шкалы.

Чтобы определить цену деления шкалы, нужно предел измерения прибора разделить на общее число делений шкалы.

Шкала измерительного прибора для измерения сопротивлений отличается от шкал для измерения токов и напряжений. Она читается справа налево, а не слева направо. Кроме того, эта шкала является нелинейной, поэтому количество малых делений между большими не одинаково в разных местах шкалы. Если стрелка указывает на отметку (∞), то измеряемое сопротивление лежит за пределами измерений прибора. В нормальных условиях, когда сопротивление не измеряется, стрелка находится на отметке бесконечность.

Пример: Предельное значение силы тока $I_{пред.}=75\text{ А}$, шкала амперметра имеет 150 делений. В этом случае цена деления шкалы:

$$C_I = I_{пред.}/150 = 75 / 150 = 0,5\text{ А/дел.}$$

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

При некоторых измерениях необходимо учитывать или подбирать определенное значение **внутреннего сопротивления**.

Чтобы определить внутреннее сопротивление прибора, пользуются данными, приведенными на шкале прибора: для *вольтметра* – **силой тока**, соответствующей

пределу вольтметра, для амперметра – **падением напряжения**, соответствующему пределу амперметра.

Расчет внутреннего сопротивления прибора производится по закону Ома для участка цепи:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Пример: Допустим, на шкале прибора имеется следующая таблица:

<i>mA</i>	0,15	0,3	0,6-1,5	6-60
<i>mV</i>	15	45	65	75

Предельное значение амперметра $I_{пред} = 6 \text{ mA}$, которому соответствует напряжение на шкале прибора $U_{шк} = 75 \text{ mV}$.

Тогда внутреннее сопротивление амперметра на пределе измерения 6 mA равно:

$$R_{в} = \frac{U_{шк}}{I_{пред}} = \frac{75}{6} = 12,5 \text{ Ом}.$$

2.3 Измерительные преобразователи

Согласно РМГ 29-99 **измерительный преобразователь** – это средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Принцип их действия основан на различных физических явлениях. Измерительные преобразователи преобразуют любые физические величины x (электрические, неэлектрические, магнитные) в выходной электрический сигнал $Y = f(x)$.

Измерительные преобразователи являются *составными частями измерительных приборов, установок и систем*. Измерительные преобразователи можно классифицировать *по: характеру входной и выходной величин, месту в измерительной цепи, физическим явлениям, положенным в их принцип действия, и другим признакам* (рисунков 2.4).

Физические величины могут быть непрерывными по значению и квантованными (они представляются обычно **кодовыми сигналами**). Если входная и выходная величины измерительного преобразователя – непрерывные величины, такой преобразователь называют – **аналоговым**.



Рисунок 2.4 - Классификация измерительных преобразователей

Измерительные преобразователи одного кодового сигнала в другой получили название **кодowych**. Преобразователи **аналог-код** превращают непрерывную величину в кодовый сигнал, а преобразователи **код-аналог** – кодовый сигнал в сигнал, непрерывный по значению (например, преобразователь двоичного числа в постоянное напряжение).

По месту, занимаемому в измерительной цепи, средства измерения, преобразователи подразделяются на *первичные, передающие, промежуточные, выходные и обратные*.

Первичный преобразователь – это преобразователь, к которому подведена измеряемая величина. Для первичных преобразователей характерно то, что на них воздействует непосредственно измеряемая величина. Физическая величина, в которую преобразует измеряемую величину первичный преобразователь, может быть подведена к измерительному механизму, может быть подана на другой преобразователь или использована, например, для целей телеизмерений.

Примером первичного преобразователя может служить термopа в цепи термоэлектрического термометра.

Конструктивно обособленный первичный измерительный преобразователь, от которого поступают сигналы измерительной информации, называется *датчиком*.

Датчик может быть вынесен на значительное расстояние от средства измерений, принимающего его сигналы. Например, датчики запущенного метеорологического радиозонда передают измерительную информацию о температуре, давлении, влажности и других параметрах атмосферы; тензопреобразователь, наклеенный на упругий элемент и воспринимающий его деформацию, также является датчиком.

Передающий преобразователь – измерительный преобразователь, служащий для дистанционной передачи измерительной информации. Для этих преобразователей

характерно назначение величины, образуемой на его «выходе». Очевидно, что преобразователь может одновременно выполнять функции первичного и передающего.

Промежуточный преобразователь – преобразователь, занимающий в измерительной цепи место после первичного.

Выходной преобразователь – преобразователь, стоящий последним в измерительной цепи. Он снабжается отсчетным или регистрирующим устройством, фиксирующим значение измеряемой величины.

Измерительные приборы сравнения имеют две цепи – прямого преобразования, начиная от входной величины, и обратного преобразования – к входной величине. Измерительные преобразователи, стоящие в цепи обратного преобразования, получили название **обратных**.

Для изменения в определенное число раз значения одной из величин, действующих в измерительной цепи, без изменения ее физической природы используют **масштабные преобразователи**: делители напряжения, измерительные трансформаторы тока, измерительные усилители и т. п.

Полезно также все измерительные преобразователи разделить на две группы: *генераторные* (энергетические) и *параметрические*. Первые характеризуются тем, что для осуществления преобразования не требуется постороннего источника энергии. Измерительный преобразователь её вырабатывает сам за счет воздействия преобразуемой величины. Параметрические же преобразователи должны быть возбуждены от постороннего источника энергии. Например, преобразователь в виде термопары для измерения температуры сам вырабатывает электрическую энергию, а термометр сопротивления (нагреваемая проволока) может осуществлять преобразование температуры в сопротивление только будучи нагретым источником электрического тока.

Измерительные преобразователи могут быть встроены в корпус прибора и вместе с другими его устройствами образовать единую конструкцию. В этом случае метрологические характеристики нормируются для измерительного прибора в целом. В тех случаях, когда измерительные преобразователи (один или несколько) являются конструктивно обособленными элементами, метрологические характеристики нормируются на эти элементы. Это очень важно при построении измерительных средств на базе блочно-модульного принципа, при построении измерительных установок и систем, которые могут включать десятки различных измерительных преобразователей.

Измерительные преобразователи бывают *взаимозаменяемыми*, *ограниченно-взаимозаменяемыми* и *невзаимозаменяемыми* или *индивидуальными*.

Взаимозаменяемые преобразователи могут без каких-либо ограничений заменять друг друга. При такой замене свойства прибора не должны измениться. Для того чтобы обеспечивалась такая взаимозаменяемость, нормируют ряд характеристик пре-

образователей. Для них устанавливают и стандартизуют рациональный ряд коэффициентов преобразования. Под коэффициентом преобразования понимается отношение значения величины на входе преобразователя к значению соответствующей ей величины на выходе.

Важные характеристики взаимозаменяемых преобразователей следующие:

- Значение входной и выходной величин каждой в отдельности. Так, например, государственными стандартами устанавливаются следующие диапазоны изменения входных и выходных величин: сила постоянного электрического тока $I = 0 \dots 5 \text{ мА}$; $0 \dots 20 \text{ мА}$, постоянное напряжение $U = 0 \dots 10 \text{ В}$, переменное напряжение $U_{\sim} = 0 \dots 2 \text{ В}$, частота электрических колебаний $f = 1500 \dots 2500 \text{ Гц}$; $4000 \dots 8000 \text{ Гц}$. Установление определенного ряда этих значений и обеспечивает широкую взаимозаменяемость преобразователей. Благодаря установлению таких рядов значительно сокращается количество разновидностей первичных преобразователей и вторичных устройств (конструктивно обособленная остальная часть элементов измерительной цепи).
- Точность и постоянство коэффициента преобразования на всем диапазоне его работы.

Для большинства взаимозаменяемых преобразователей устанавливают *классы точности*. При выборе преобразователя стремятся к тому, чтобы его класс точности, если это возможно, был выше класса точности измерительного прибора, применяемого с преобразователем, иначе говоря, чтобы применение преобразователя как можно меньше снижало общую точность измерения данным прибором.

Требования, предъявляемые к взаимозаменяемым преобразователям, весьма высоки. В ряде случаев некоторые из них невыполнимы или выполнение их экономически нецелесообразно. Тогда их применяют ограниченно, причем ограничение накладывают на какое-либо одно требование.

Чаще всего взаимозаменяемые преобразователи используют только для измерительного прибора одного вида или типа, а иногда даже только одной его конструкции, о чем на преобразователе делается соответствующая надпись.

Применение индивидуальных (невзаимозаменяемых) преобразователей позволяет улучшить метрологические характеристики измерительного прибора и установки за счет специальных регулировок.

2.3.1 Простейшие измерительные преобразователи

Простейшими измерительными преобразователями тока и напряжения являются *шунты, добавочные сопротивления*.

Шунт является простейшим преобразователем тока в напряжение (ПТН). Он представляет собой четырех зажимный резистор. Зажимы, к которым подводится ток I , называются **токовыми**, а зажимы, с которых снимается напряжение U – **потенциальными**.

К потенциальным зажимам обычно присоединяется *выходной прибор*.

Шунт характеризуется номинальным значением выходного тока $I_{ном}$ и номинальным значением выходного напряжения $U_{ном}$. Их отношение определяет номинальное сопротивление шунта $R_{ш} = U_{ном} / I_{ном}$.

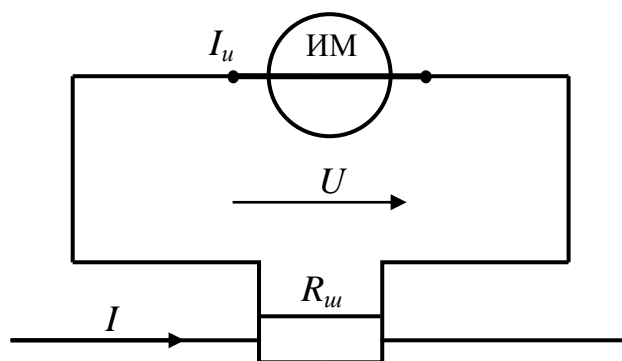


Рисунок 2.5 - Схема соединения измерительного механизма с шунтом

Шунты применяются для **расширения пределов измерения амперметров**, при этом *большую часть* измеряемого тока пропускают через шунт, а *меньшую* – через измерительный механизм (ИМ) прибора.

На рисунке 2.5 показана схема включения магнитоэлектрического механизма с шунтом $R_{ш}$. Ток I_u , протекающий через измерительный механизм, связан с измеряемым током I зависимостью:

$$I_u = \frac{I \cdot R_{ш}}{R_{ш} + R_u},$$

где R_u – сопротивление измерительного механизма.

Если необходимо, чтобы ток I_u был в n раз меньше тока I , то сопротивление шунта рассчитывается по формуле:

$$R_{ш} = \frac{R_u}{n - 1},$$

где $n = I / I_u$ – коэффициент шунтирования.

Номинальный ток шунтов может иметь значение от нескольких миллиампер до нескольких тысяч ампер. Шунты на малые токи выполняются в виде катушек или спиралей из манганинового провода, шунты на большие токи – в виде манганиновых пластин.

На рисунке 2.6 показан шунт на 2000 А. Он имеет массивные наконечники 1 из меди, которые служат для отвода тепла от манганиновых пластин 2, впаянных между ними. Зажимы шунта А и Б токовые. Измерительный механизм присоединяют к потенциальным зажимам В и Г, между которыми и заключено сопротивление шунта. При таком включении устраняются погрешности от контактных сопротивлений.

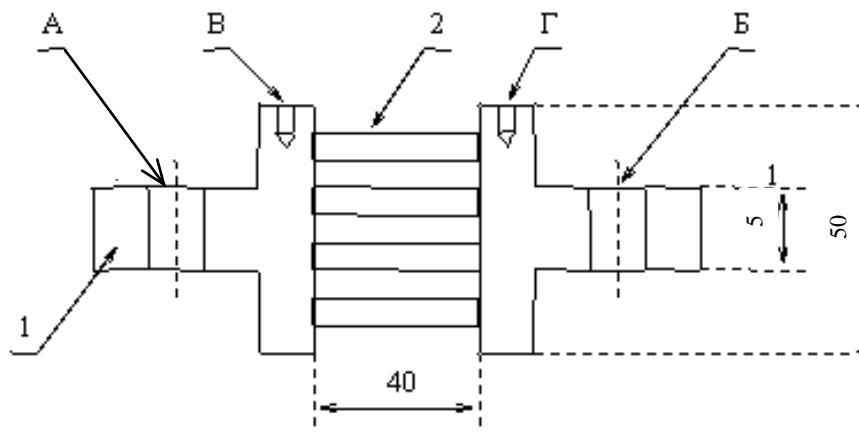


Рисунок 2.6 - Шунт на 2000 А

Добавочные сопротивления являются измерительными преобразователями напряжения в ток (ПНТ). Добавочные сопротивления могут состоять из одного или нескольких резисторов и служат для расширения пределов измерения по напряжению вольтметров и других приборов, имеющих параллельные цепи (например, ваттметры, фазометры). Добавочные сопротивления включают последовательно с ИМ (рисунок 2.7). Ток I_u в цепи, состоящей из ИМ с сопротивлением R_u и добавочного резистора с сопротивлением R_∂ , составит:

$$I_u = \frac{U_u}{R_\partial + R_u},$$

где U_u – измеряемое напряжение.

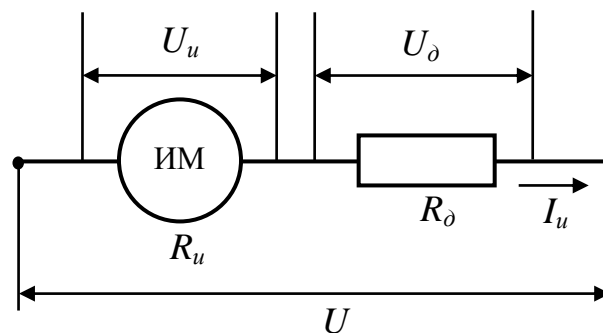


Рисунок 2.7 - Схема соединения измерительного механизма с добавочным сопротивлением

Если вольтметр имеет верхний предел измерений $U_{ном}$, сопротивление R_u , и при помощи добавочного сопротивления R_o надо расширить предел измерения в n раз, то, учитывая постоянство тока протекающего через вольтметр, можно записать:

$$\frac{U_{ном}}{R_u} = \frac{n \cdot U_{ном}}{R_o + R_u},$$

откуда

$$R_o = R_u (n-1).$$

Добавочные сопротивления изготавливаются из изолированной манганиновой проволоки, намотанной на пластины или каркасы из изолированного материала, и применяются для расширения пределов измерения вольтметров до 30 кВ.

В качестве широко применяемых *дополнительных измерительных преобразователей* являются **делители напряжения** в строго определенное число раз. Это фактически измерительные *преобразователи напряжения в напряжение* (ПНН). Схема простейшего ПНН представлена на рисунке 2.8.

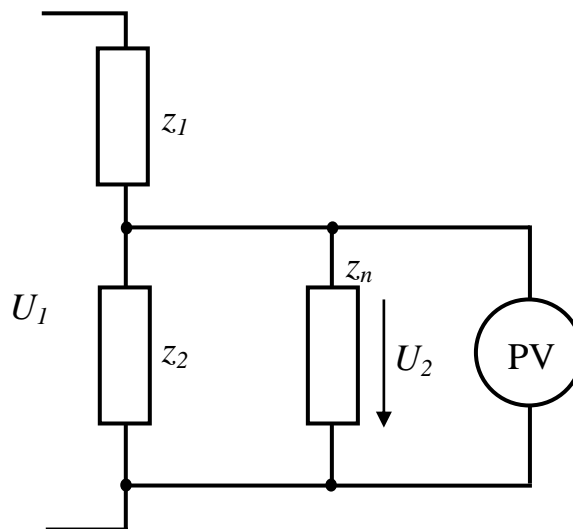


Рисунок 2.8 - Резистивный преобразователь напряжения в напряжение
Его коэффициент преобразования равен

$$K_{np} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{z_2}{z_1 + z_2} < 1.$$

В схеме рисунка 2.8 будет соотношение между $z_n \gg z_2$. Эти делители используются в основном для расширения верхних пределов измерения приборов с высоким

входным сопротивлением $z_{вх}$. Различают *резистивные, емкостные и индуктивные делители напряжения*.

2.3.2 Измерительные трансформаторы тока и напряжения

Измерительные трансформаторы переменного тока и напряжения служат в основном для преобразования больших переменных токов или напряжения в относительно малые их значения, допустимые для измерений приборами с небольшими стандартными пределами измерений (например, 5 А, 1 А; 150 В и т. д.). При применении измерительных трансформаторов достигается *гальваническое разделение вторичной (измерительной) цепи от первичной высокого напряжения*, а, следовательно, безопасность для персонала, обслуживающего приборы, так как приборы при этом включаются в заземленную цепь низкого напряжения (рисунок 2.9).

Кроме того, в зависимости от соотношения витков первичной и вторичной обмоток можно уменьшать или увеличивать значения токов и напряжений, следовательно, использовать трансформатор в качестве согласующих звеньев и частей измерительного устройства в целом.

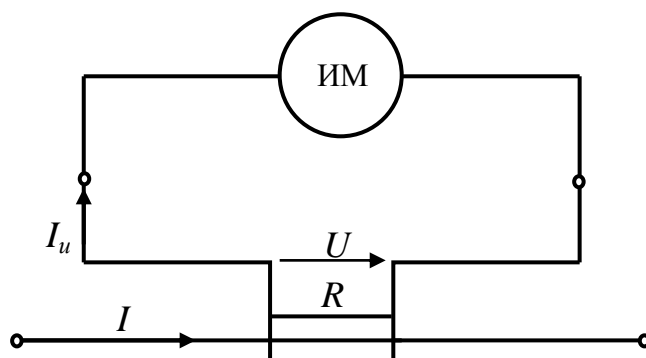


Рисунок 2.9 - Схема гальванического разделения измерительной цепи от первичного высокого напряжения

Таким образом, основным назначением измерительных трансформаторов тока и напряжения является:

- а) расширение пределов измерения приборов по току и напряжению;*
- б) гальваническое разделение частей измерительной цепи;*
- в) согласование отдельных частей в измерительных устройствах.*

Трансформаторы состоят из двух изолированных обмоток, помещенных на магнитопровод из магнитомягкого материала: первичной с числом витков w_1 и вторичной с числом витков w_2 (рисунок 2.10, а, б). Выводы первичной обмотки трансформатора подключают к цепи, в которой производится измерение; к зажимам вто-

ричной обмотки присоединяют нагрузку $Z_{\text{наг}}$, которой может быть измерительный прибор или часть его.

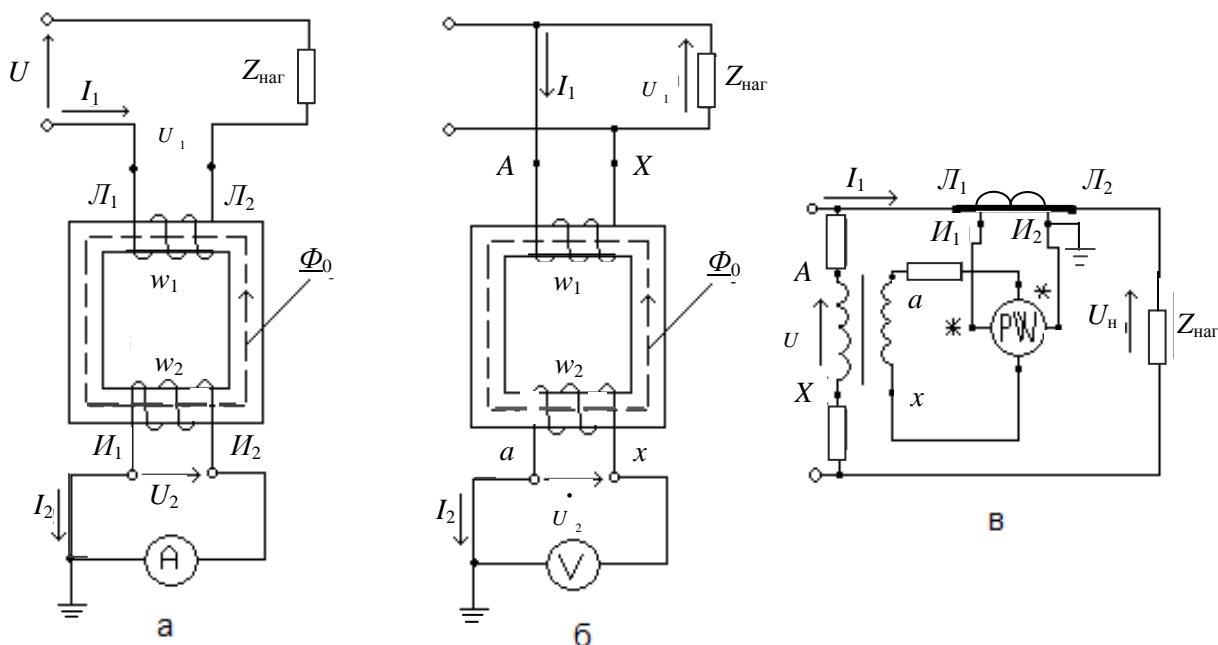


Рисунок 2.10 - Схемы включения измерительных трансформаторов для расширения пределов измерения амперметра (а), вольтметра (б) и ваттметра (в)

При измерениях в высоковольтных цепях трансформаторы обеспечивают безопасность обслуживания приборов, присоединенных к вторичным обмоткам. Это достигается электрической изоляцией (гальваническим разделением) первичной и вторичной обмоток трансформаторов и заземлением металлического корпуса и вторичной обмотки. При отсутствии заземления и повреждении изоляции между обмотками вторичная обмотка и подключенные к ней приборы окажутся под высоким потенциалом, что недопустимо.

Входной (первичной) величиной трансформатора тока является ток I_1 , протекающий в первичной цепи. Выходной (вторичной) величиной является I_2 , протекающий в нагрузке (рисунок 2.10, а).

В трансформаторе напряжения входной (первичной) величиной является напряжение U_1 , подведенное к его первичным зажимам, а выходной (вторичной) – напряжение U_2 на выходных зажимах (нагрузке), рисунок 2.10, б.

Основными техническими характеристиками трансформатора тока являются номинальные значения первичного и вторичного токов I_{1T} и I_{2T} , номинальная частота и номинальное сопротивление нагрузки $Z_{\text{нагр}}$. Первичная обмотка выполняется из провода разного сечения в зависимости от номинального первичного тока. При $I_{1T} \gg 500 \text{ А}$ она может состоять из одного витка в виде прямой медной шины (или стержня), проходящей через окно магнитопровода. Вторичная обмотка у всех стан-

дартных трансформаторов тока выполняется проводами небольшого сечения. В соответствии с ГОСТ вторичной номинальный ток трансформаторов тока I_{2T} может быть 1, 2, 5 А при значениях I_{1T} в пределах от 0,1 до 60000 А. Аналогично основными характеристиками трансформатора напряжения являются номинальные значения первичного и вторичного напряжений U_{1T} , U_{2T} , частоты и вторичной мощности P_{2T} . Вторичное номинальное напряжение U_{2T} стандартных трансформаторов составляет $100 / \sqrt{3}$, 100 и 150 В при первичном номинальном напряжении U_{1T} от 220 В до 35 кВ. Условия работы и схемы включения трансформаторов тока и напряжения отличаются друг от друга.

Первичная обмотка трансформатора тока включается в измерительную цепь последовательно, ее зажимы обозначаются буквами Л1 и Л2 (линия). **Во вторичную обмотку**, зажимы которой обозначаются буквами И1 и И2 (измерение), включают амперметры, токовые обмотки ваттметров, счетчиков и других приборов. Нормальным режимом работы трансформаторов тока является режим, близкий к короткому замыканию.

Первичная обмотка трансформатора напряжения включается в измерительную цепь параллельно, а ее зажимы обозначаются А–Х (начало - конец). **К зажимам вторичной обмотки трансформатора напряжения**, обозначаемой соответственно буквами а–х, подключают вольтметры, параллельные цепи ваттметров и других приборов, то есть режим работы его близок к холостому ходу. По показанию приборов, включенных во вторичные обмотки измерительных трансформаторов, можно определить значения измеряемых величин. Для этого их показания надо умножить на действительные коэффициенты трансформации трансформатора тока K_I и трансформатора напряжения K_U , соответственно равные

$$K_I = \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1} \quad \text{и} \quad K_U = \frac{w_1}{w_2},$$

где w_1 и w_2 — число витков в обмотках.

Действительные значения коэффициентов трансформации зависят от режима работы трансформатора т. е. от значений токов и напряжений, характера и значения нагрузки вторичной цепи и частоты тока, а также от конструкции трансформатора и качества материала магнитопровода и обычно не известны. Поэтому показания приборов умножают на номинальные значения коэффициентов трансформации трансформатора тока K_{Im} трансформатора напряжения K_{Um} . Номинальные значения коэф-

коэффициентов трансформации являются **постоянными** для данного трансформатора и всегда указываются на щитке трансформатора в виде дроби, числитель которой есть номинальное значение первичной, а знаменатель – вторичной величины.

Относительная погрешность из-за неравенства действительного и номинального значений коэффициентов трансформации составляет:

для трансформаторов тока

$$\gamma_I = \frac{I_1' - I_1}{I_1} \cdot 100 \% = \frac{K_{Im} - K_I}{K_I} \cdot 100 \% ,$$

где $I_1' = K_{Im} \cdot I_2$; $I_1 = K_I \cdot I_2$.

для трансформаторов напряжения

$$\gamma_U = \frac{U_1' - U_1}{U_1} \cdot 100 \% = \frac{K_{Um} - K_U}{K_U} \cdot 100 \% ,$$

где $U_1' = K_{Um} \cdot U_2$; $U_1 = K_U \cdot U_2$.

Погрешность γ_I называется токовой погрешностью, а γ_U – погрешностью напряжения. Кроме того, в идеальном трансформаторе первичная величина (ток, напряжение) отличается от своего идеального значения не только по модулю, но и по фазе, т. е. имеется еще так называемая *угловая погрешность*.

В идеальном трансформаторе вектор вторичного тока I_2 сдвинут по фазе относительно вектора первичного тока I_1 на 180^0 . Такой же фазовый сдвиг должен быть между векторами вторичного U_2 и первичного U_1 напряжений в трансформаторе напряжения.

В реальном трансформаторе угол между повернутым на 180^0 вектором вторичной величины и соответствующим вектором первичной величины не равен нулю, а составляет угол δ , который называется **угловой погрешностью трансформатора**. Погрешность считается положительной, если повернутый на 180^0 вектор вторичной величины опережает вектор первичной величины.

Угловая погрешность измерительных трансформаторов сказывается на показаниях приборов, отклонение подвижной части которых зависит от фазового сдвига между токами в цепях этих приборов, таких как, например, ваттметры и счетчики. Поэтому удобно ввести понятие *комплексной погрешности измерительного трансформатора*. Под **комплексной погрешностью трансформатора тока** будем понимать отношение

$$\lambda_I = - \frac{I_2 \cdot K_{Im} + I_1}{I_1} = f_I + j\delta_I ,$$

а для комплексной погрешности трансформатора напряжения

$$\lambda_U = - \frac{U_2 \cdot K_{Um} - U_1}{U_1} = f_U + j\delta_U.$$

Схемы рисунка 2.10, б, в не дают точного представления о действительной конструкции трансформаторов, так как магнитопроводы в реальных трансформаторах бывают не только стержневые, но и тороидальные (кольцевые), и броневые. Поэтому, хотя эти схемы не отражают некоторых существенных особенностей конструкций трансформаторов, они удобны для анализа и вывода.

Переменное напряжение U_1 (рисунок 2.10), приложенное к зажимам первичной обмотки \mathcal{W}_1 , вызывает в ней ток I_1 . Вследствие индуктивной связи между обмотками во вторичной обмотке \mathcal{W}_2 наводится ЭДС E_2 . Если вторичная обмотка замкнута на сопротивление $Z_{\text{нагр}}$, то в ней появляется ток I_2 , на зажимах вторичной обмотки – напряжение U_2 .

2.4 Электроизмерительные установки

Электроизмерительная установка состоит из ряда средств измерений (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств, расположенных в одном месте (рисунок 2.11).

Электроизмерительные установки используют, например, для градуировки и поверки электроизмерительных приборов. Измерительные установки применяются для выполнения массовых технологических измерений.



Рисунок 2.11 - Установка испытания оболочек кабеля с изоляцией

2.5 Измерительные системы

Измерительная система - совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других

технических средств, размещенных в разных точках контролируемого пространства с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому пространству.

Измерительная система предназначена для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и/или использования в автоматических системах управления.

В зависимости от назначения измерительные системы подразделяются на: измерительные информационные, измерительные контролирующие, измерительные управляющие и др.

Измерительная информационная система (ИИС) - измерительная система, предназначенная для целей представления измерительной информации в виде необходимом потребителю. Объекты измерения часто имеют весьма сложное устройство и в них могут происходить многогранные процессы и явления, поэтому отдельные измерительные устройства, воспринимающие лишь один параметр сложного процесса, обычно не могут обеспечить получение достаточной информации об объекте, особенно когда нужно одновременно знать ряд его параметров. Это необходимо, например, для управления электростанцией, доменной печью, когда требуется одновременный анализ нескольких десятков, иногда сотен величин, характеризующих состояние этих объектов. Задача, решаемая ИИС, в какой-то мере обратна задаче отдельного измерительного устройства: не расчленять параметры объекта измерения с целью выделить и воспринять их по отдельности, а объединить данные о всех главных параметрах объекта и создать тем самым достаточно полное, совокупное его описание. Таким образом, отличительными особенностями ИИС являются: одновременное измерение многих параметров объекта (т.е. многоканальность) и передача измерительной информации в единый центр; представление полученных данных (в т.ч. их унификация) в виде, наиболее удобном для последующей обработки получателем.

Создание ИИС связано с решением чисто "системных" вопросов: метрологическая унификация средств измерений (датчиков, преобразователей, указателей) независимо от вида измеряемых величин; оптимизация распределения погрешностей между различными средствами измерений, входящими в ИИС; наиболее целесообразное размещение указателей перед оператором, например, указатели важнейших, определяющих параметров делают наглядными и размещают в центре щита или панели управления, а указатели менее важные - в поле бокового зрения оператора. Это необходимо потому, что человек-оператор не может одновременно воспринимать

показания даже двух приборов. Он делает это последовательно во времени, поочерёдно переключая своё внимание с одного указателя на другой

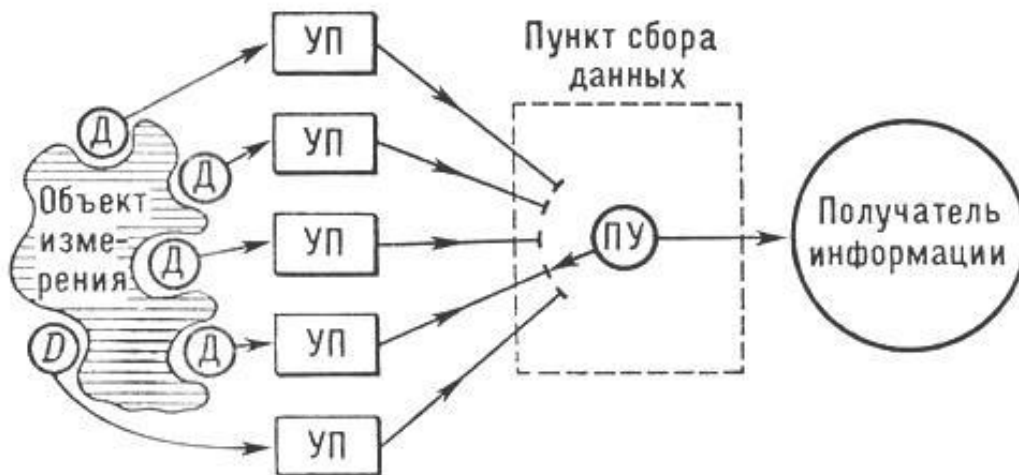


Рисунок 2.12 - Структурная схема измерительно-информационной системы:
Д и D – датчики; УП - унифицирующий преобразователь;
ПУ - программное устройство.

ИИС может быть представлена так, как это показано на рис. 2.12. Датчики воспринимают различные параметры объекта измерения, унифицирующие преобразователи унифицируют и передают по каналам связи сигналы датчиков в единый пункт сбора данных.

Программное устройство воспринимает информацию датчиков и передаёт её получателю информации. По такой структурной схеме строятся практически все ИИС, включая современные системы передачи информации со спутников и автоматических межпланетных станций.

Измерительная контролирующая система - измерительная система, предназначенная для целей контроля параметров технологического процесса, явления, движущегося объекта или его состояния (пример на рисунке 2.13).

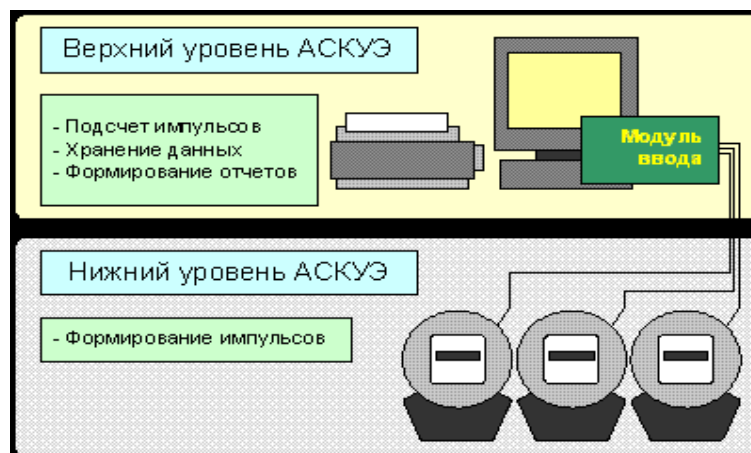


Рисунок 2.13 - Автоматизированная система контроля управления электроэнергией (АСКУЭ)

Измерительная управляющая система - измерительная система, предназначенная для целей автоматического управления технологическим процессом, автоматическим производством, движущимся объектом и т.д.



Рисунок 2.14 - Автоматическое управление технологическим процессом

Для целей управления измерительная управляющая система содержит: элементы сопоставления параметров измерительной информации с нормальными; элементы обратной связи, которые дают возможность приводить к номиналу параметры процесса, подлежащего управлению (рисунок 2.14).

Контрольные вопросы

1. На какие виды разделяют средства измерений?
2. Классификация мер.
3. Классификация электрических измерительных приборов.
4. По каким признакам различают электрические измерительные приборы?
5. Из чего состоит измерительная цепь прибора?
6. Классификация измерительных преобразователей.
7. Какие преобразователи относятся к простейшим?
8. Каковы основные назначения трансформаторов тока и напряжения?
9. Для чего нужен коэффициент трансформации?
10. Классификация измерительных систем.

3 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Все измерения могут производиться различными методами. Различают два основных метода измерений: *метод непосредственной оценки* и *методы сравнения с мерой*.

3.1 Метод непосредственной оценки

Этот метод характеризуется тем, что значение измеряемой величины определяется непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора, заранее градуированного в единицах измеряемой величины. Этот метод является наиболее простым и поэтому широко применяется при измерении различных величин, например: измерение веса тела на пружинных весах, силы электрического тока стрелочным амперметром, разности фаз цифровым фазометром и т. д.

Структурная схема измерения методом непосредственной оценки приведена на рисунке 3.1.

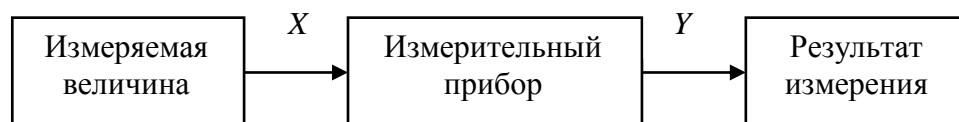


Рисунок 3.1 - Метод непосредственной оценки

Приборы непосредственной оценки всегда содержат измерительный преобразователь, который преобразует измеряемую величину в другую, доступную для сравнения наблюдателем или автоматическим устройством. Так, в стрелочных приборах происходит преобразование измеряемой величины в угол поворота подвижной части, который отмечается стрелкой. По положению стрелки, т. е. сравнением угла поворота с делениями на шкале, находится значение измеряемой величины. Мерой в приборах непосредственной оценки служат деления шкалы отсчетного устройства. Они поставлены не произвольно, а на основании градуировки прибора. Градуировка прибора непосредственной оценки состоит в том, что на его вход от меры подается величина заданного размера и отмечается показание прибора. Этому показанию затем присваивается значение известной величины. Таким образом, деления шкалы отсчетного устройства являются как бы заменителем («отпечатком») значения реальной физической величины и поэтому могут быть использованы непосредственно для нахождения значений измеряемых прибором величин. Следовательно, все приборы непосредственной оценки фактически реализуют принцип сравнения с физическими величинами. Но это сравнение разновременное и осуществляется опосредованно, с помощью промежуточного средства – делений шкалы отсчетного устройства.

3.2 Методы сравнения с мерой

Это такие методы измерений, в которых известную величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Эти методы по сравнению с методом непосредственной оценки более точны, но несколько сложены. Группа методов сравнения с мерой включает в себя следующие методы: противопоставления, нулевой, дифференциальный, совпадения и замещения.

Определяющим признаком методов сравнения является то, что в процессе каждого измерительного эксперимента происходит сравнение двух однородных независимых друг от друга величин – известной (воспроизводимой мерой) и измеряемой. При измерениях методами сравнения используются реальные физические меры, а не их «отпечатки».

Сравнение может быть одновременным, когда мера и измеряемая величина воздействуют на измерительный прибор одновременно, и разновременным, когда воздействие измеряемой величины и меры на измерительный прибор разнесено во времени. Кроме того сравнение может быть непосредственным и опосредствованным. В первом случае измеряемая величина и мера непосредственно воздействуют на устройство сравнения, а во втором – через другие величины, однозначно связанные с известной и измеряемой величинами.

Одновременное сравнение осуществляется обычно следующими методами: *противопоставления, нулевым, дифференциальным и совпадения, а разновременное – методом замещения.*

Метод противопоставления – метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между этими величинами. Структурная схема метода противопоставления приведена на рисунке 3.2.

В этом методе измеряемая величина X и мера X_0 воздействуют на два входа прибора сравнения. Результирующий эффект воздействия определяется разностью этих величин, т. е. $\varepsilon = X - X_0$ и снимается с отсчетного устройства прибора сравнения.

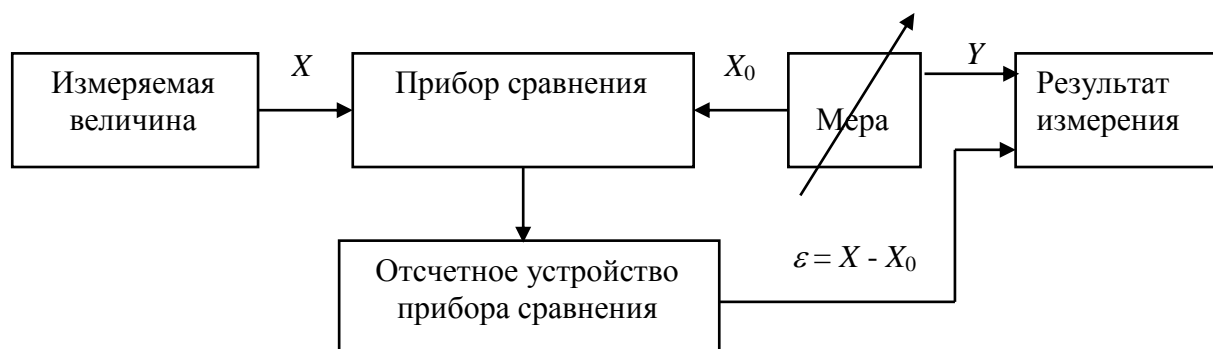


Рисунок 3.2 - Метод противопоставления

Результат измерения находят как

$$Y = X_0 + \varepsilon.$$

Этот метод удобен, если имеются точная многозначная мера и несложные устройства сравнения. Метод противопоставления позволяет значительно уменьшить воздействие на результат измерений влияющих величин, поскольку последние более или менее одинаково искажают сигналы, как в цепи преобразования измеряемой величины, так и в цепи преобразования величины, воспроизводимой мерой. Отсчетное устройство прибора сравнения реагирует на разность сигналов, вследствие чего эти искажения в некоторой степени компенсируют друг друга. Этот метод применяют при измерении ЭДС, напряжения, тока и сопротивления.

Нулевой метод является разновидностью метода противопоставления, в котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля. Структурная схема нулевого метода измерения приведена на рисунке 3.3.

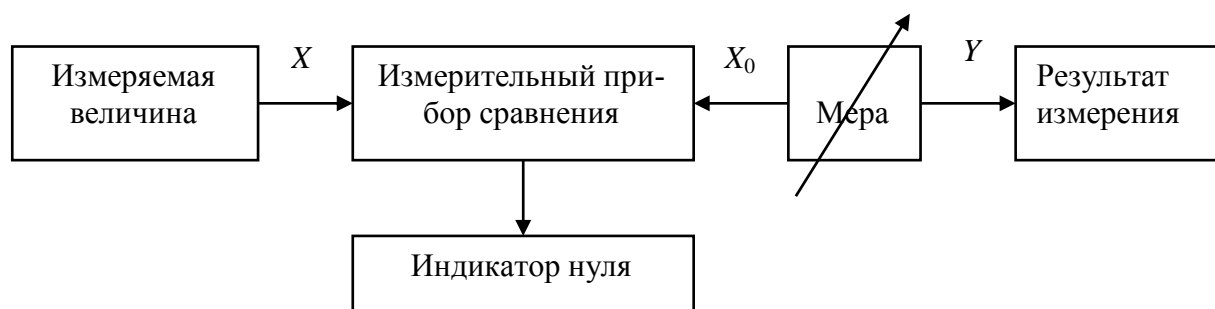


Рисунок 3.3 - Нулевой метод измерения

Здесь измеряемая величина X и мера X_0 воздействуют на два входа измерительного прибора сравнения. Результирующий эффект воздействия определяется разностью этих величин, т. е.

$$\varepsilon = X - X_0.$$

Изменяя величину, воспроизводимую мерой (это схематически указано на рисунке стрелкой), можно довести величину ε до 0. Это обстоятельство отмечается индикатором нуля. Если $\varepsilon = 0$, то $X = X_0$, результат измерения Y есть полученное значение меры, т. е. $Y = X_0$.

Поскольку на индикатор нуля воздействует разность величин, то его предел измерения может быть выбран меньшим, а чувствительность большей, чем у прибора для измерения X методом непосредственной оценки. Точность индикации равенства двух величин может быть весьма большой. А это ведет к повышению точности изме-

рения. Погрешность измерения нулевым методом определяется погрешностью меры и погрешностью индикации нуля. Вторая составляющая обычно много меньше первой, практически точность измерения нулевым методом равна точности меры.

Примерами нулевых методов измерений являются: измерение массы на равноплечих весах с помещением измеряемой массы и уравнивающих её гирь на двух чашках весов и полным уравниванием весов или измерение напряжения путем компенсации его напряжением образцового источника (в обоих случаях осуществляется непосредственное сравнение); а также измерение электрического сопротивления мостом с полным его уравниванием (опосредствованное сравнение).

Нулевой метод измерения требует обязательного применения многозначных мер. Точность таких мер всегда хуже однозначных мер, кроме того мы можем не иметь меры переменной величины. В таком случае нулевой метод не применим.

Дифференциальный метод представляет собой метод сравнения с мерой, в котором на измерительный прибор (обязательно прибор сравнения) воздействует разность измеряемой величины и известной величины, воспроизводимой мерой, причем эта разность не доводится до нуля, а измеряется измерительным прибором прямого действия. На рисунке 3.4 показана структурная схема дифференциального метода.

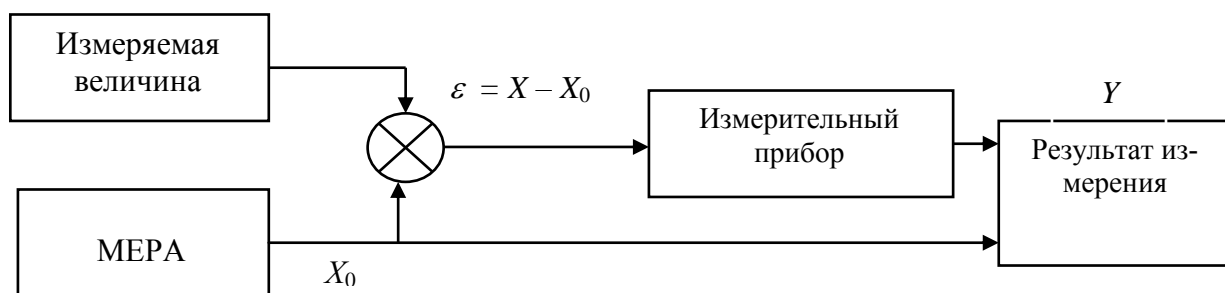


Рисунок 3.4 - Дифференциальный метод измерения

Здесь мера имеет постоянное значение X_0 , разность измеряемой величины X и меры X_0 , т. е. $\varepsilon = X - X_0$, не равна нулю и измеряется измерительным прибором. Результат измерения находится как

$$Y = X_0 + \varepsilon.$$

То обстоятельство, что здесь измерительный прибор измеряет не всю величину X , а только её часть ε позволяет уменьшить влияние на результат измерения погрешности измерительного прибора, причем, влияние погрешности измерительного прибора тем меньше, чем меньше разность ε .

ПРИМЕР: Действительно, при измерении напряжения $U = 97 \text{ В}$ вольтметром непосредственной оценки с пределом измерения 100 В и допущенной относительной погрешности измерения этого напряжения 1% ($0,01$) мы получаем абсолютную погрешность измерения

$$\pm\Delta_1 = 97 \cdot 0,01 = 0,97 \approx 1 \text{ В}.$$

Если же мы будем измерять это напряжение дифференциальным методом с использованием образцового источника напряжения $U_0 = 100 \text{ В}$, то разность напряжений

$$U - U_0 = 97 - 100 = -3 \text{ В},$$

т.е. мы можем измерить вольтметром с пределом измерения всего 3 В .

Пусть относительная погрешность измерения этого напряжения будет также равна 1% . Это даёт абсолютную погрешность измерения напряжения 3 В , равную

$$\pm\Delta_2 = 3 \cdot 0,01 = 0,03 \text{ В}.$$

Если эту погрешность привести к измеряемому напряжению U , мы получим относительную погрешность измерения напряжения, равную

$$\pm\Delta_2/U = 0,03/97 \approx 0,0003 \text{ (} 0,03 \text{ \%)},$$

т.е. приблизительно в 30 раз меньше, чем при измерении напряжения U методом непосредственной оценки. Это увеличение точности измерения произошло потому, что в первом случае прибором была измерена почти вся величина с относительной погрешностью в 1% , а во втором случае измеряется не вся величина, а только её $1/30$ часть.

В этих расчетах не учитывалась погрешность меры, которая полностью входит в результат измерения. Следовательно, при малых разностных величинах ε точность измерения дифференциальным методом приближается к точности измерения нулевым методом и определяется лишь погрешностью меры. Кроме того, дифференциальный метод не требует меры переменной величины.

В приведенном выше примере измерения напряжения дифференциальным методом использовалось *непосредственное сравнение*.

Другим примером дифференциального метода измерения может служить определение отклонения сопротивления резистора от номинала неуравновешенным (процентным) мостом (здесь реализуется опосредствованное сравнение).

Метод совпадений (или метод «нониуса») представляет собой метод сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов.

Этот метод применяется в тех случаях, когда измеряемая величина меньше цены деления заданной меры. При этом применяются две меры с разными ценами деления, которые отличаются на размер оцениваемого разряда отсчетов.

Примером измерения методом совпадения может служить измерение длины детали с помощью штангенциркуля с нониусом. Другим примером – измерение частоты вращения детали с помощью мигающей лампы стробоскопа: наблюдая положение метки на вращающейся детали в моменты вспышек лампы, по частоте вспышек и смещению метки определяют частоту вращения детали. Метод «нониуса» находит также широкое применение при измерении временных интервалов двух близких частот (биений) и в других случаях.

Такой метод измерения нашел применение также в цифровых приборах, измеряющих угловые и линейные перемещения. Метод совпадения требует наличия многозначных мер или масштабных преобразователей величины и величины, воспроизводимой мерой. Поэтому в измерительной технике он используется сравнительно редко.

Метод замещения есть метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой. В нем используется измерительный прибор непосредственной оценки рисунке 3.5.

Техника измерения состоит в следующем. Сначала на вход измерительного прибора подают измеряемую величину X и отмечают показания прибора (отсчет) Y_1 . После этого вместо измеряемой величины на тот же самый вход (это очень существенно) прибора подают величину X_0 , воспроизводимую мерой.

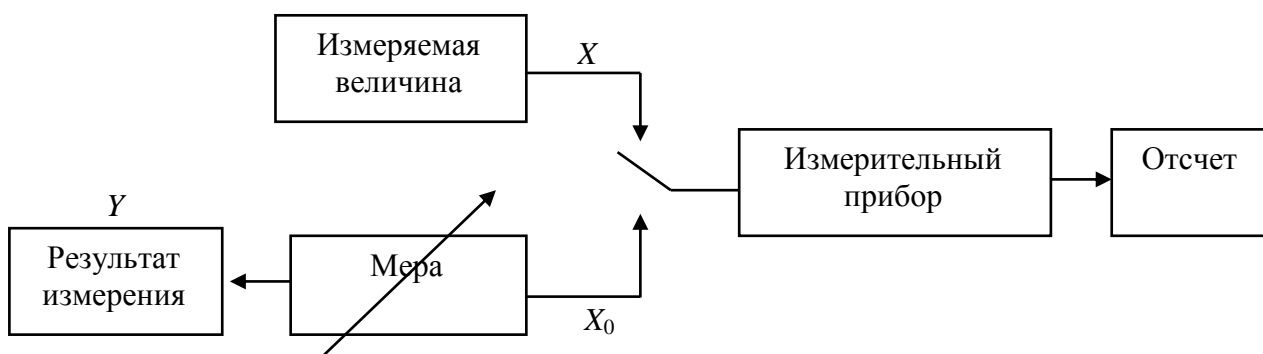


Рисунок 3.5 - Метод замещения

В этом случае показание прибора становится равным Y_2 . Изменяя величину, воспроизводимую мерой, добиваются равенства показаний, т. е. $Y_1 = Y_2$. При этом можно утверждать, что $X = X_0$ независимо от погрешности измерительного прибора. Действительно, в первом случае получаем

$$Y_1 = X + \Delta_1,$$

где Δ_1 – погрешность измерительного прибора при получении счета Y_1 .

При воздействии на прибор меры

$$Y_2 = X + \Delta_2.$$

Здесь Δ_2 – погрешность измерительного прибора при получении счета Y_2 .

Поскольку мы добиваемся одинаковых показаний $Y_1 = Y_2$, а интервал времени между двумя измерениями невелик, то на одной и той же отметке шкалы прибора погрешность одинакова, т.е. $\Delta_1 = \Delta_2$. Следовательно, из равенства $Y_1 = Y_2$ или $X + \Delta_1 = X + \Delta_2$ вытекает, что $X = X_0$.

Исключение погрешности измерительного прибора из результата измерений является новым достоинством метода замещения. В нулевом методе измерения погрешность измерительного прибора проявляет себя тем, что нулевое показание может не соответствовать равенству измеряемой величины и меры, а в дифференциальном методе она представляет собой погрешность измерения разности меры и измеряемой величины. Для получения большой точности измерения нулевым и дифференциальным методом необходимо, чтобы погрешности измерительных приборов были невелики. А вот метод замещения не требует этого условия! Даже если погрешность измерительного прибора достаточно велика, это не скажется на результате измерения. Таким образом, методом замещения можно осуществить точное измерение, имея прибор с большой погрешностью. Нетрудно сообразить, что точность измерения методом замещения определяется погрешностью меры. Правда, при более строгом подходе к методу замещения следует учитывать два обстоятельства.

Во-первых, здесь сравнение разновременное, а за время между двумя измерениями погрешность измерительного прибора может несколько измениться, так что равенство $\Delta_1 = \Delta_2$ несколько нарушится. Теперь становится ясно, почему измеряемая величина и мера должны подаваться на один и тот же вход прибора. Это, прежде всего, связано с тем, что погрешность измерительного прибора на разных входах даже при одинаковых показаниях может быть разной!

Во-вторых, метод замещения сводится к получению одинаковых показаний прибора. Само равенство показаний может быть установлено с конечной точностью. А это также ведет к погрешности измерения. Точность установления равенства показаний будет больше в приборе, обладающем большей чувствительностью.

Следовательно, при измерении методом замещения следует использовать пусть не точный, но зато чувствительный и быстродействующий прибор. Тогда остаточная погрешность, обусловленная измерительным прибором, будет невелика.

Метод замещения является самым точным из всех известных методов и обычно используется для проведения наиболее точных измерений. Сравнивая между собой метод замещения и метод непосредственной оценки, мы обнаружим их разительное сходство. Действительно, метод непосредственной оценки по своей сути представляет метод замещения. Почему он выделен в отдельный метод? Все дело в том, что при измерении методом непосредственной оценки мы выполняем только первую операцию – определение показаний. Вторая операция – градуировка (сравнение с мерой) производится не при каждом измерении, а лишь в процессе производства прибора и его периодических поверках. Между применением прибора и его предыдущей поверкой может лежать большой интервал времени, а погрешность измерительного прибора за это время может значительно измениться. Это и приводит к тому, что метод непосредственной оценки дает обычно меньшую точность измерения, чем метод сравнения.

Рассмотренные методы (см. рис. 3.6) определяют принципы построения измерительных приборов. Их не следует путать с методикой измерения и алгоритмом измерения.

Методика измерений – детально намеченный порядок процесса измерений, регламентирующий методы, средства, алгоритмы выполнения измерений, которые в определенных (нормированных) условиях обеспечивают измерения с заданной точностью.

Измерения должны осуществляться в соответствии с аттестованными в установленном порядке методиками. Порядок разработки и аттестации методик выполнения измерений определяется Госстандартом России.

Алгоритм измерения – точное предписание о выполнении в определенном порядке совокупности операций, обеспечивающих измерение значения физической величины.

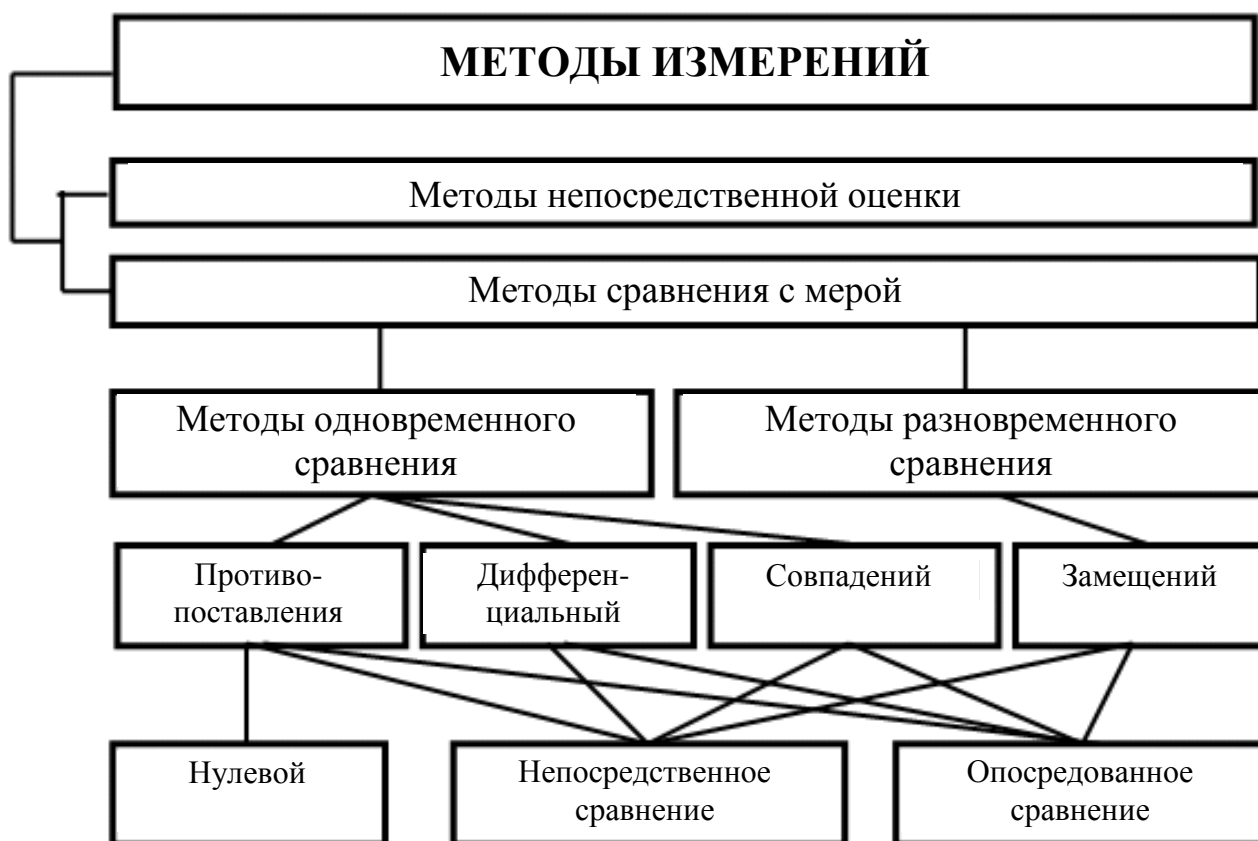


Рисунок 3.6 - Классификация методов измерений

Контрольные вопросы

1. Для измерения каких величин применяется метод непосредственной оценки?
2. Что является мерой в приборах непосредственной оценки?
3. Что является определяющим признаком методов сравнения?
4. Какие виды сравнения существуют?
5. В чем сущность метода противопоставления?
6. Для измерения каких величин удобен нулевой метод и почему?
7. Какие приборы необходимы для дифференциального метода?
8. В каких случаях применяется метод совпадения?
9. Почему метод замещения является самым точным методом измерения?
10. В соответствии с чем должны осуществляться измерения?

4 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*.

Измерительные механизмы магнитоэлектрических амперметров и вольтметров принципиально не различаются. В зависимости от назначения прибора (для измерения тока или напряжения) меняется его измерительная цепь. В амперметрах измерительный механизм включается в цепь непосредственно или при помощи шунта. В вольтметрах последовательно с измерительным механизмом включается добавочный резистор, и прибор подключается к тем точкам схемы, между которыми необходимо измерить напряжение.

4.1 Измерение тока

Электрический ток - величина непосредственно измеряема. Единица измерения в системе СИ – Ампер [А].

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.

Рассмотрим стрелочный амперметр магнитоэлектрического типа. Основа такого прибора – магнитоэлектрический механизм (рисунок 4.1), обеспечивающий изменение угла поворота указательной стрелки (1), соединенной с диамагнитной рамкой (2) при изменении тока в проводнике (3), намотанном на эту рамку. Через рамку, длины сторон 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, создаваемом постоянным магнитом (6). В результате протекания тока I через w витков проводника (3), размещенных на рамке, к каждой ее стороне b , оказывается, приложена электромагнитная сила

$$F_A = b \cdot I \cdot B \cdot w \quad (4.1)$$

и возникает вращающий момент

$$M = 2 F \cdot a / 2 . \quad (4.2)$$

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

$$M = \alpha \cdot C_s , \quad (4.3)$$

где α - угол поворота рамки относительно начального положения;

C_s - удельный момент противодействия пружины.

Таким образом, угол поворота рамки пропорционален величине протекающего через проводник тока

$$\alpha = b \cdot B \cdot w \cdot I / C_s . \quad (4.4)$$

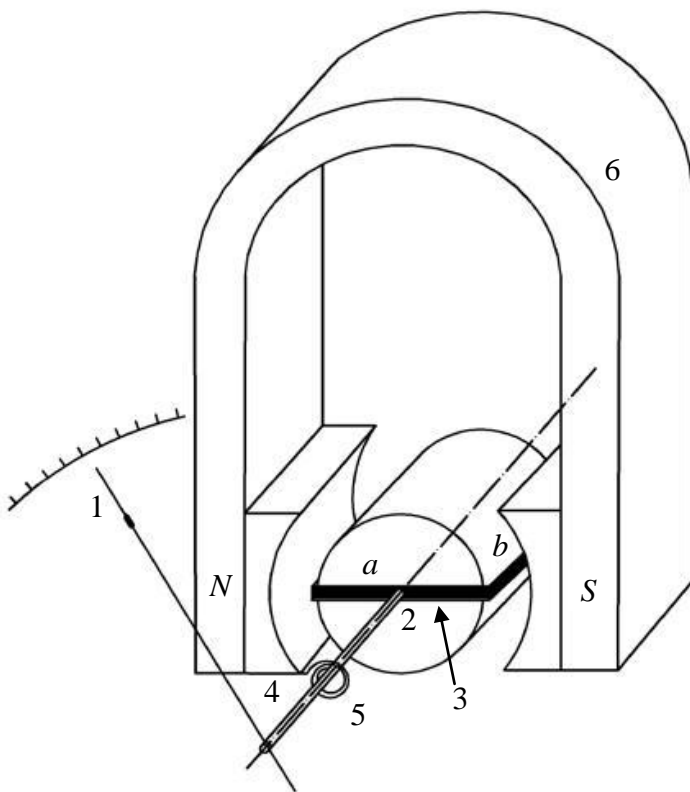


Рисунок 4.1 – Магнитоэлектрический механизм

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 $\Gamma\text{ц}$ – 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 $R_{ш}$, включаемое в разрыв цепи, к которому подключается измерительный магнитоэлектрический механизм – рисунок 4.2.

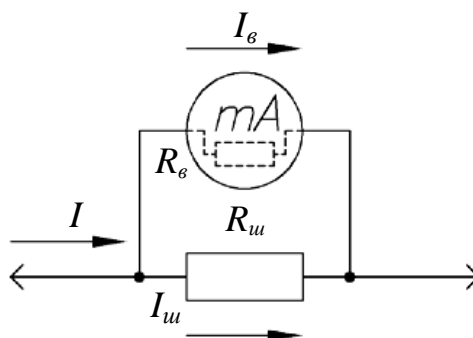


Рисунок 4.2 – Схема включения шунта

В этом случае ток I_g , протекающий через измерительный прибор, оказывается в n раз меньше, чем измеряемый ток I :

$$n = (R_g + R_u) / R_u , \quad (4.5)$$

где R_g - внутренне сопротивление прибора, определяемое суммой активных сопротивлений провода, намотанного на рамку магнитоэлектрического механизма прибора, и токоподводящих шин. Очевидно, что

$$I = I_g + I_u , \quad (4.6)$$

$$R_u = \frac{R_g}{n - 1} , \quad (4.7)$$

следовательно, должно выполняться условие $R_u \ll R_g$.

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

Существует 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 – отрица-

тельно заряженные и возникает разность потенциалов, которую называют *холловским напряжением*.

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_x можно судить о напряженности магнитного поля и, следовательно, о величине тока в проводнике I – рисунок 4.3. 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 .

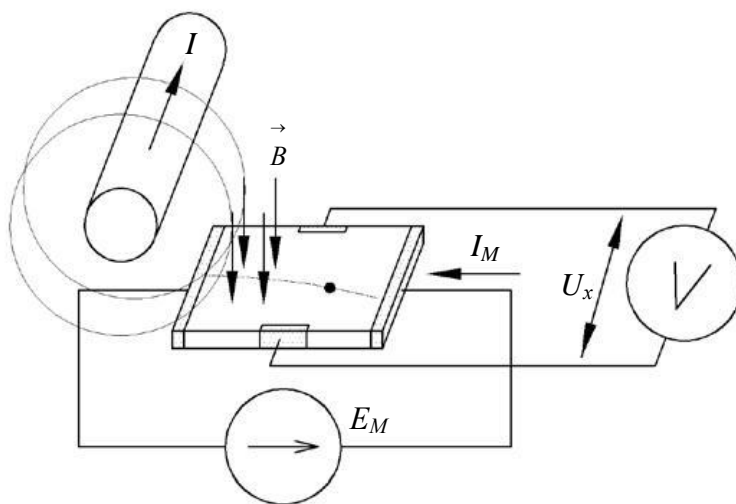


Рисунок 4.3 - Измерение тока I в проводнике с помощью датчика Холла

Цифровой амперметр. Развитие микроэлектроники способствовало широкому распространению измерительных приборов с цифровой индикацией результата измерений. Эти приборы получили название цифровых измерительных приборов. Они, как правило, состоят из преобразователя, который измеряемую величину преобразует в аналоговый электрический сигнал, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), обеспечивающий преобразование величины напряжения U 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 рисунке 4.4.

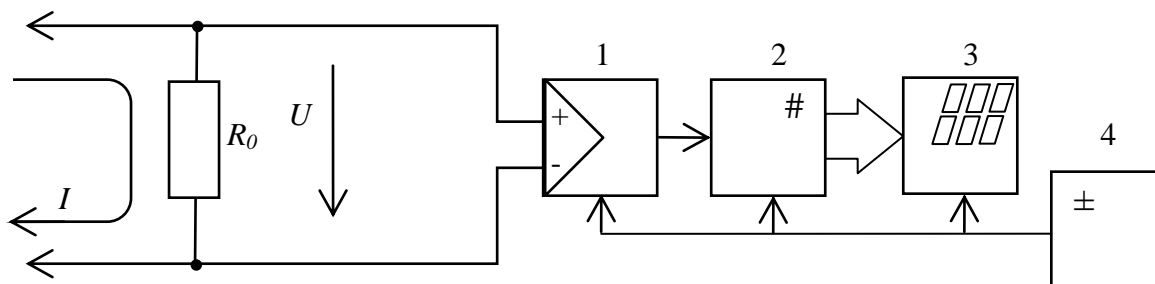


Рисунок 4.4 – Структурная схема цифрового амперметра:
1 – усилитель напряжения; 2 – АЦП; 3 – цифровой индикатор;
4 – источник питания

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 $U = I \cdot R_0$. Если резистор R_0 нагревается от температуры T_0 до некоторой температуры T

$$U = I \cdot (R_0 + R_0 \alpha_T (T - T_0)), \quad (4.8)$$

где α_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.

4.2 Измерение постоянного напряжения

Под *напряжением* между двумя точками цепи понимают разность потенциалов между этими точками. Величина непосредственно измеряема, а единица измерения в системе СИ – Вольт [В].

Электростатический вольтметр - прибор, позволяющий измерить разность потенциалов, характеристики которого, с точки зрения отсутствия влияния на измеряемую цепь, близки к идеальным. Этот прибор содержит смонтированные в диэлектрическом корпусе электроды – подвижный и неподвижный. Один электрод подключается к точке *A* цепи, другой – к точке *B* (рисунок 4.5). 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.

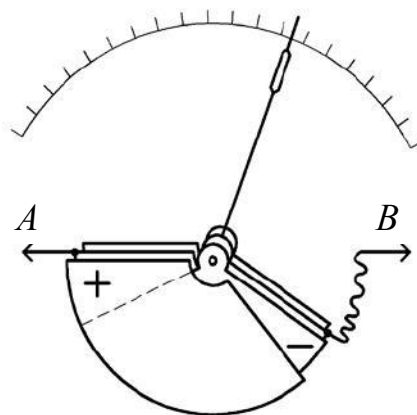


Рисунок 4.5 – Электростатический стрелочный вольтметр

Стрелочный вольтметр магнитоэлектрического типа. Принцип действия такого прибора основан на использовании закона Ома.

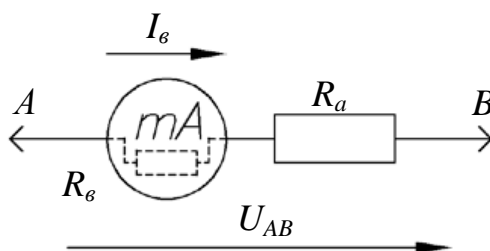


Рисунок 4.6 – Стрелочный вольтметр магнитоэлектрического типа

К точкам электрической цепи, разность потенциалов между которыми должна быть измерена, подключаются последовательно соединенные образцовое сопротивление R_o (которое обычно называют добавочным) и магнитоэлектрический измеритель тока – рисунок 4.6. Величина тока I_ϵ в измерительной цепи определяется выражением

$$I_\epsilon = \frac{U_{AB}}{R_o + R_\epsilon}, \quad (4.9)$$

где R_ϵ – сопротивление обмоточного провода рамки и токоведущих шин магнитоэлектрического механизма. Поскольку угол отклонения его стрелки будет пропорционален величине тока I_ϵ , а $R_\epsilon \ll R_o$, можно считать, что $I_\epsilon = \frac{U_{AB}}{R_o}$, т.е. угол отклонения

стрелки будет пропорционален измеряемому напряжению. Величину R_o 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_o должна быть на несколько порядков больше эквивалентного сопротивления R_{AB} участка основной цепи. Как правило, это условие уверенно выполняется, если ток $I_{\epsilon \max}$, обеспечивающий отклонение стрелки прибора до последнего деления шкалы, составляет несколько десятков мкА. Величину $s = \frac{1}{I_{\epsilon \max}}$ [кОм/В] называют *чувствительностью прибора*.

Она определяет величину добавочного сопротивления R_o 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_o монтируется в корпусе магнитоэлектрического механизма, а измерительная головка может быть непосредственно подключена к электрической цепи (об этом свидетельствует специальный значок, наносимый на шкалу прибора – см. Приложение 2). Для расширения диапазона измеряемых напряжений часто используют резистивный делитель напряжения – рисунок 4.7. Если выход делителя не нагружен, то коэффициент передачи K определяется выражением:

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{AB}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (4.10)$$

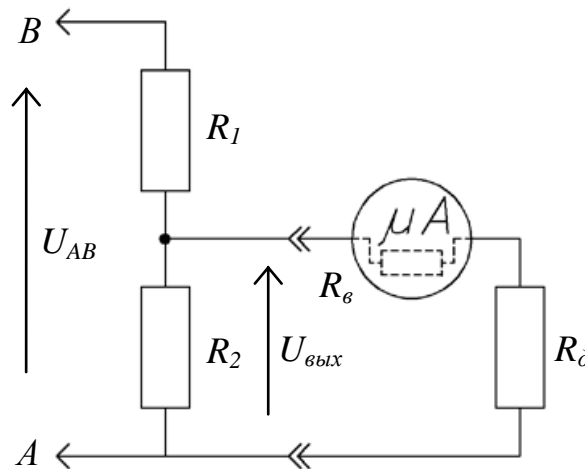


Рисунок 4.7 – Схема подключения резистивного делителя

На практике часто используют понятие коэффициента деления n , определяемого как $n = 1/K$. При подключении к выходу делителя вольтметра с эквивалентным сопротивлением $R_{\text{в}} \gg R_{\text{д}}$, можно считать, что $n = 1 + \frac{R_1}{R_2} \left(1 + \frac{R_2}{R_{\text{д}}} \right)$ и, выбрав соответствующие значения R_1 и R_2 , выполнить измерение напряжения U_{AB} вольтметром, верхнее значение рабочего диапазона которого меньше U_{AB} .

Цифровой вольтметр. Входной аттенюатор такого прибора (рисунок 4.8) 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.

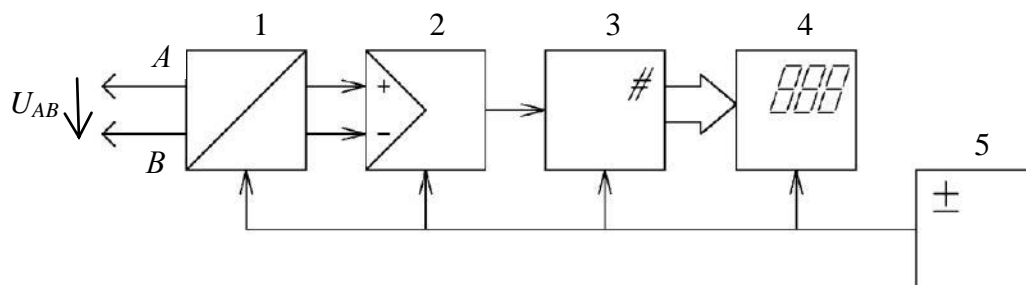


Рисунок 4.8 – Структурная схема цифрового вольтметра:

1 – аттенюатор; 2 – усилитель; 3 – АЦП; 4 – цифровой индикатор; 5 – источник питания.

4.3 Измерение мощности в цепях постоянного тока

Мощность - 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 (косвенный метод измерения):

$$P = I \cdot U . \quad (4.11)$$

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 (рисунок 4.9) 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 .

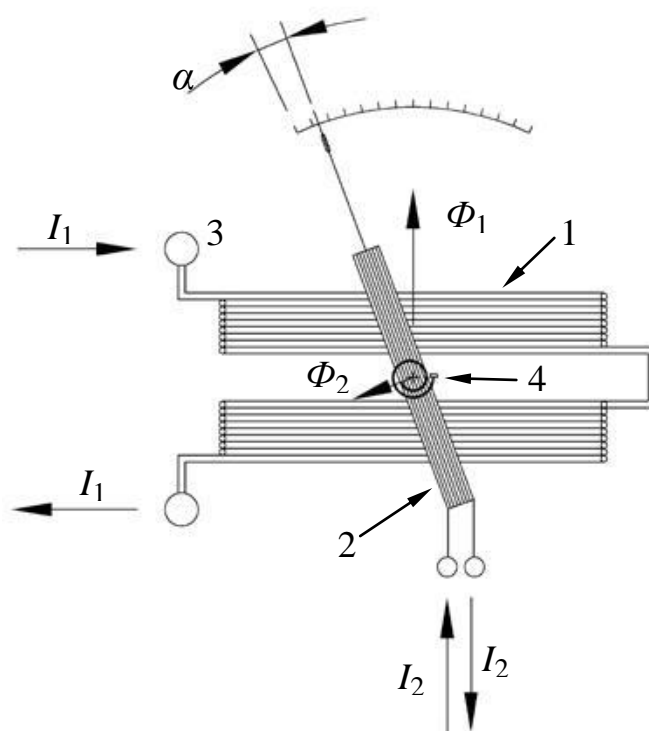


Рисунок 4.9 – Электродинамический стрелочный прибор

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 Φ , пронизывающий витки подвижной катушки. Если через подвижную катушку будет протекать I_2 ток, то к каждой стороне b рамки будет приложена сила Ампера (4.1), возникнет вращающий момент (4.2) и рамка повернется на угол, определяемый рассмотренным ранее условием равенства моментов сил

$$\alpha \cdot C_s = M_\phi, \quad (4.12)$$

где C_s – удельный момент противодействия пружины (4), а M_ϕ – момент, создаваемый в результате взаимодействия магнитного потока Φ и рамки с током:

$$M_\phi = \frac{dW}{d\alpha}, \quad (4.13)$$

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

$$W = \frac{L_1 I_1^2}{2} + \frac{L_2 I_2^2}{2} + I_1 I_2 M_{1,2}. \quad (4.14)$$

Поскольку собственные индуктивности катушек не зависят от их взаимного положения,

$$M_\phi = \frac{dW}{d\alpha} = I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \quad (4.15)$$

$$\alpha = \frac{1}{C_s} I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}. \quad (4.16)$$

Отметим, что множитель $\frac{dM_{1,2}}{d\alpha}$ определяется формой катушек и их взаимным положением. Для того, чтобы шкала прибора была линейной, стремятся обеспечить выполнение условия $\frac{dM_{1,2}}{d\alpha} = \text{const}$. 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 рисунке 4.10, 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_θ , и неподвижной, имеющей сопротивление $r_\theta \cong 0$. Такое соединение катушек обеспечивает отклонение стрелки измерителя в правильном направлении.

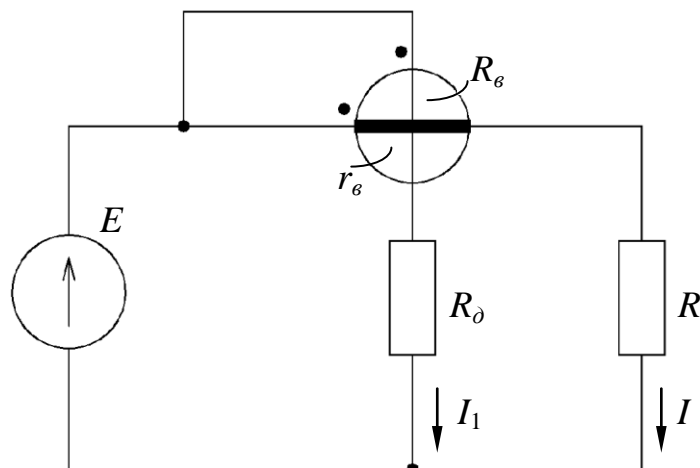


Рисунок 4.10 – Схема подключения электродинамического ваттметра для измерения мощности

Поскольку $I_1 = \frac{E}{R_\theta + R_\theta}$, то

$$\alpha = \frac{1}{C_s (R_\theta + R_\theta)} E \cdot I \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} = k \cdot P, \quad (4.17)$$

где k - коэффициент пропорциональности, а R_θ – добавочное сопротивление.

4.4 Измерение активного сопротивления

Сопротивление - 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 (рисунок 4.11) реализуют метод измерения величины тока, протекающего через активное сопротивление R_x , величина которого должна быть определена. В

каждом из таких приборов есть источник ЭДС и магнитоэлектрический механизм PA , с помощью которого измеряется величина тока, протекающего через R_x .

В получившем наибольшее распространение омметре с последовательным включением (рисунок 4.11, а) резистор R_1 , часто обозначаемый на панели прибора надписью «установка нуля», служит для компенсации вариаций величины E . Измеряемый стрелочным прибором PA ток I_θ имеет величину $I_\theta = I / n$, где I – ток, протекающий через резистор R_x :

$$I = \frac{E}{R_x + R_2 + \frac{R_1 R_\theta}{R_1 + R_\theta}}, \quad (4.18)$$

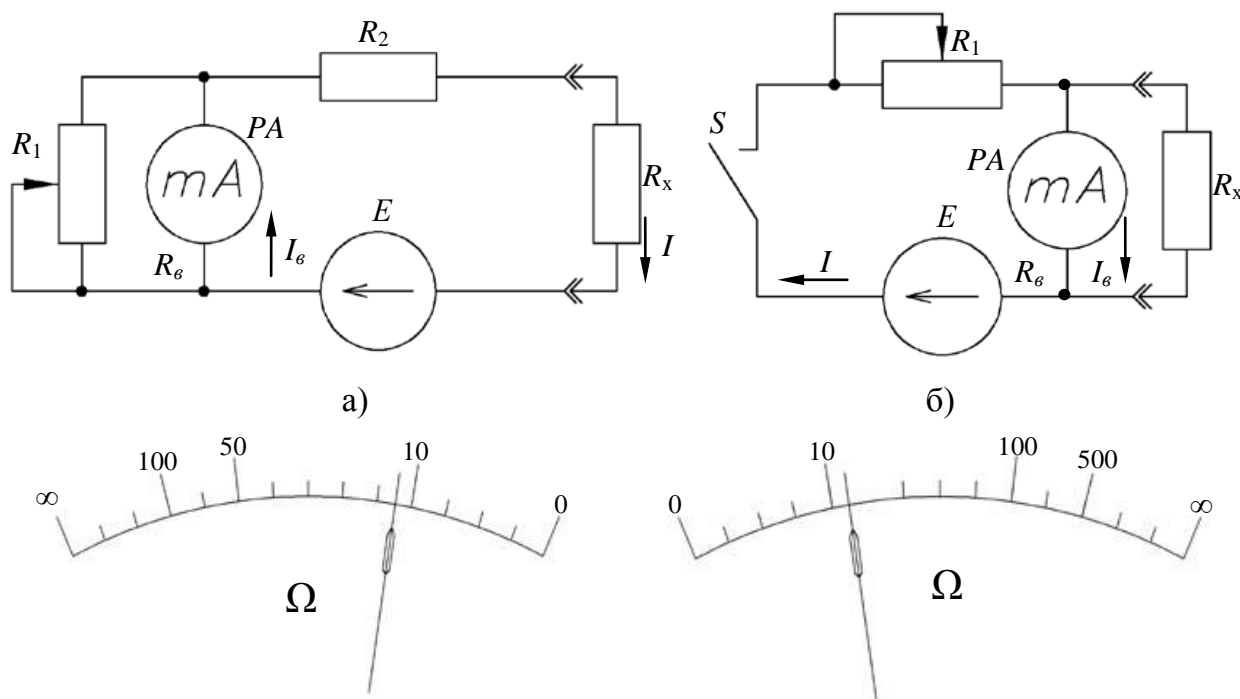


Рисунок 4.11 – Схемы электрические принципиальные и вид шкал омметров:

а) с последовательным включением измеряемого сопротивления;

б) с параллельным включением измеряемого сопротивления.

а коэффициент деления n для схемы резистивного шунта находится из выражения $n = (R_\theta + R_1) / R_1$. Поэтому $I_\theta = E / ((R_x + R_2) \cdot n + R_\theta)$, и, так как R_θ мало, выбрав $R_1 \gg R_\theta$, можно считать, что $I_\theta = E / (R_x + R_2) \cdot n$, причем $n \approx 1$. Отсюда видно, что шкала омметра будет выражена 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 таково, что $I_\theta = E \cdot k / R_2 n = I_{\theta_{\max}}$, где k характеризует изменение ЭДС относи-

тельно расчетного значения E_0 , для которого определялось значение $I_{\epsilon_{\max}} = E_0 / R_2$. Омметр с параллельным включением (рисунок 4.11, б) используют для измерения малых сопротивлений R_x . В этой схеме

$$I = \frac{E}{R_1 + \frac{R_x R_{\epsilon}}{R_x + R_{\epsilon}}}, \quad (4.19)$$

$$I_{\epsilon} = I / n = \frac{E \cdot R_x}{R_1 (R_{\epsilon} + R_x) + R_{\epsilon} \cdot R_x}, \quad (4.20)$$

$$I_{\epsilon_{\max} \text{ } R_x \rightarrow \infty} = \frac{E_0}{R_1 + R_{\epsilon}} \quad (4.21)$$

и, следовательно, $I_{\epsilon} = 0$ 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.

Контрольные вопросы

1. Что такое цепи постоянного тока?
2. Какие методы и приборы необходимо использовать для измерения величины постоянного тока?
3. Каков принцип действия магнитоэлектрического измерительного механизма?
4. Какова структура цифрового прибора?
5. Какие приборы необходимо использовать для измерения напряжения в цепях постоянного тока?
6. Каков принцип действия электростатического измерительного механизма?
7. Что такое чувствительность прибора?
8. Каким методом и приборами измеряют мощность?
9. Каков принцип действия электродинамического измерительного механизма?
10. Какие методы и приборы необходимо использовать для определения величины активного сопротивления.

5 ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО И ИМПУЛЬСНОГО ТОКА

Большинство потребителей электрической энергии работает на переменном токе. В настоящее время почти вся электрическая энергия вырабатывается в виде энергии переменного тока. Это объясняется преимуществом производства и распределения этой энергии. Переменный ток получают на электростанциях, преобразуя с помощью генераторов механическую энергию в электрическую. Основное преимущество переменного тока по сравнению с постоянным заключается в возможности с помощью трансформаторов повышать или понижать напряжение, с минимальными потерями передавать электрическую энергию на большие расстояния, в трехфазных источниках питания получать сразу два напряжения: *линейное* и *фазное*. Кроме того, генераторы и двигатели переменного тока более просты по устройству, надежнее в работе и проще в эксплуатации по сравнению с машинами постоянного тока.

В электрических цепях переменного тока наиболее часто используют синусоидальную форму, характеризующуюся тем, что все токи и напряжения являются синусоидальными функциями времени. В генераторах переменного тока получают ЭДС, изменяющуюся во времени по закону синуса, и тем самым обеспечивают наиболее выгодный эксплуатационный режим работы электрических установок. Кроме того, синусоидальная форма тока и напряжения позволяет производить точный расчет электрических цепей с использованием метода комплексных чисел и приближенный расчет на основе метода векторных диаграмм. При этом для расчета используются законы Ома и Кирхгофа, но записанные в векторной или комплексной форме.

В современной технике широко используют разнообразные по форме переменные токи и напряжения: синусоидальные, прямоугольные, треугольные и др. Значение тока, напряжения, ЭДС в любой момент времени t называется *мгновенным значением* и обозначается малыми строчными буквами, соответственно

$$i = i(t); u = u(t); e = e(t).$$

Токи, напряжения и ЭДС, мгновенные значения которых повторяются через равные промежутки времени, называют *периодическими*, а наименьший промежуток времени, через который эти повторения происходят, называют *периодом* T .

Если кривая изменения периодического тока описывается синусоидой, то ток называют *синусоидальным*. Если кривая отличается от синусоиды, то ток *несинусоидальный*. В промышленных масштабах электрическая энергия производится, передается и расходуется потребителями в виде синусоидальных токов, напряжений и ЭДС.

Трёхфазная система электроснабжения — частный случай многофазных систем электрических цепей, в которых действуют созданные общим источником синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые друг относительно друга во времени на определённый фазовый угол. В трёхфазной системе этот угол равен $2\pi/3$ (120°).

Многопроводная (шестипроводная) трёхфазная система переменного тока изобретена Николой Теслой. Значительный вклад в развитие трёхфазных систем внёс М. О. Доливо-Добровольский, который впервые предложил трёх- и четырёхпроводную системы передачи переменного тока, выявил ряд преимуществ малопроводных трёхфазных систем по отношению к другим системам и провёл ряд экспериментов с асинхронным электродвигателем.

Каждая из действующих ЭДС находится в своей фазе периодического процесса, поэтому часто называется просто «фазой». Также «фазами» называют проводники — носители этих ЭДС. В трёхфазных системах угол сдвига равен 120° . Фазные проводники обозначаются в РФ латинскими буквами L с цифровым индексом $1 \dots 3$, либо A , B и C (таблица 5.1).

Таблица 5.1

Распространённые обозначения фазных проводов

Россия, ЕС (выше 1000 В)	Россия, ЕС (ниже 1000 В)	Германия	Дания
A	L1	L1	R
B	L2	L2	S
C	L3	L3	T

5.1 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 $u(t) = \sin(\omega_0 t)$) 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 — рисунок 5.1.

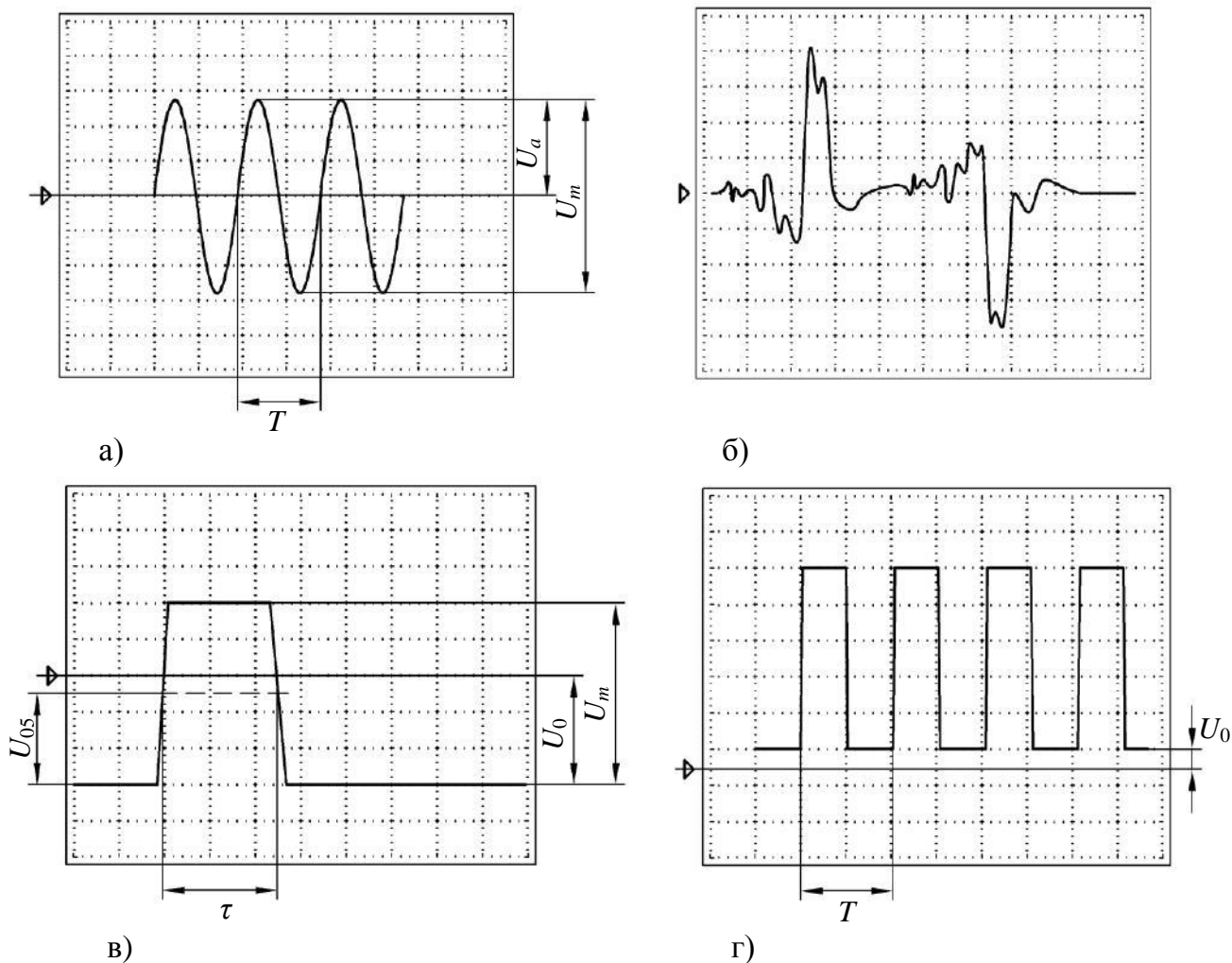


Рисунок 5.1 – Осциллограммы различных сигналов
(курсор▷ указывает положение линии нулевого входного напряжения):
гармонического сигнала (а); шумоподобного сигнала сложной формы (б);
импульсного двуполярного (в); однополярного импульсно-периодического (г)

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 φ_0 . Удвоенная величина U_A называется размахом колебаний U_m – рисунок 5.1, а).

К **импульсным** относят сигналы с выраженным во времени изменением величины и/или направления тока. Такие сигналы могут быть как периодическими, так и непериодическими – рисунки 5.1, в, г. Для периодических сигналов определены период их повторения T и скважность Q (скважность Q находится как отношение периода повторения импульсов к их длительности τ). Величину τ определяют как интервал времени, в течение которого напряжение превышает уровень $0,5U_{\max}$, где U_{\max} – на-

пряжение, соответствующее вершине импульса – рисунок 5.1, в. Напряжение смещения U_S определяют, как показано на рисунках 5.1, в и 5.1, з.

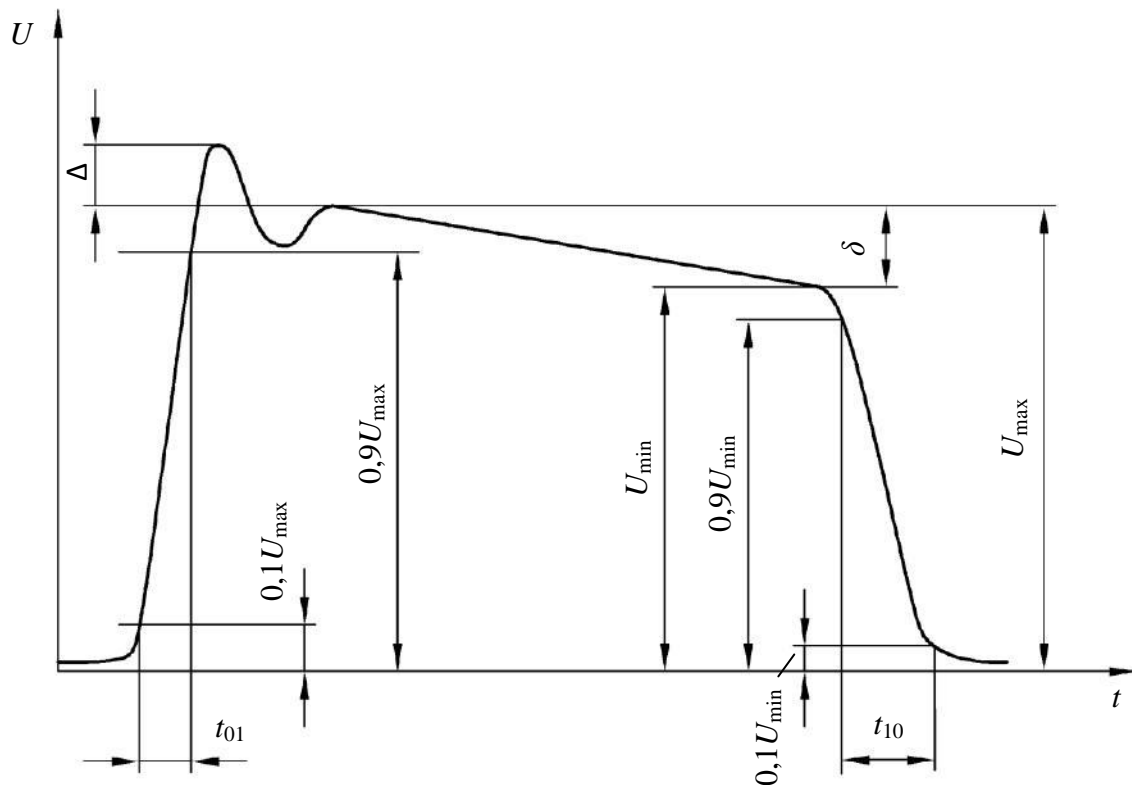


Рис. 5.2. Параметры импульсного сигнала

Для детального описания формы импульсов (рисунки. 5.1 и 5.2) используют следующие параметры:

- полярность импульса (различают однополярные – рисунок 5.1, з и двуполярные – рисунок 5.1, в импульсы);
- длительность импульса τ ;
- длительность переднего фронта импульса t_{01} (время нарастания);
- длительность заднего фронта импульса t_{10} (время спада);
- величина выброса Δ ;
- величина спада вершины импульса δ , определяемая разностью между начальной и конечной амплитудами вершины импульса, выражаемая в процентах:

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

где U_{\min} – напряжение, соответствующее наименьшему значению импульса.

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

5.2 Измерение действующего значения переменного тока

Амперметр (миллиамперметр) – прибор, обеспечивающий измерение действующего значения переменного тока (\sim). На рисунке 5.3 представлены схемы включения электродинамического измерителя для измерения тока до 1000 мА (рисунок 5.3, а) и для измерения тока более 1 А (рисунок 5.3, б). Поскольку вращающий момент при последовательном соединении катушек измерителя пропорционален квадрату действующего значения тока (см. (4.15)), шкала такого амперметра *нелинейна*.

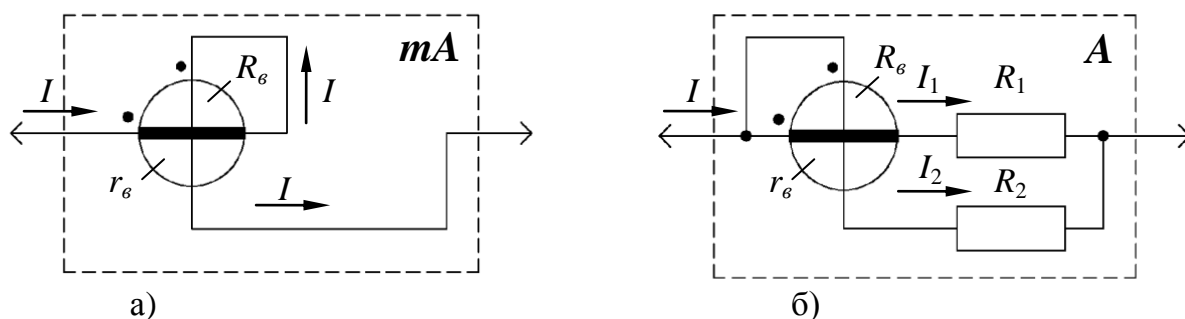


Рисунок 5.3 – Миллиамперметр (а) и амперметр (б)
на основе электродинамического измерителя

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 α стрелки миллиамперметра в соответствии с (4.15) составляет $\alpha = k_E I^2$, а угол поворота стрелки амперметра находится из выражения

$$\alpha = k_E \cdot \frac{(R_1 + r_с) \cdot (R_2 + R_с)}{(R_1 + r_с + R_2 + R_с)} \cdot I^2 \approx k_E \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)^2} \cdot I^2, \quad (5.1)$$

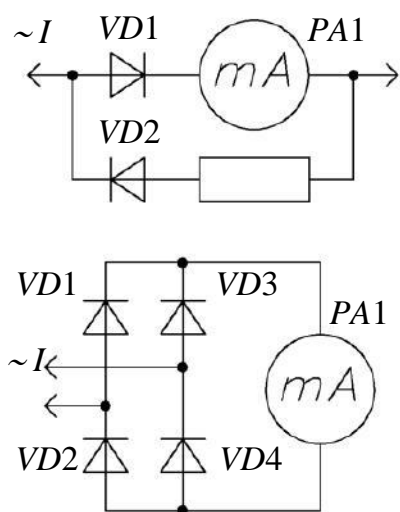
где k_E - коэффициент, определяемый конструкцией электродинамического измерителя, а $r_с \cong 0$ и $R_2 \gg R_с$. Несмотря на то, что электродинамические приборы являются одними из самых точных средств прямого измерения токов и напряжений в цепях переменного тока (магнитные потоки создаются в воздухе, что гарантирует от-

сутствие 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 рисунке 5.4 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 (4.1) и (4.2), равен

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T M(t) dt = Babw \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i(t) dt = \frac{1}{2} Babw I_a, \quad (5.2)$$

где T - период сигнала, I_a - среднее значение измеряемого тока (ток через прибор $PA1$ и диод $VD1$ протекает только в течении половины периода $VD1-PA1-VD4$, во второй – по цепи $VD3-PA1-VD2$)



$$M = \frac{1}{T} \int_0^T M(t) dt = Babw \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{2} Babw I_a. \quad (5.3)$$

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_o .

Рисунок 5.4 - Схема включения магнитоэлектрического прибора в цепь переменного тока

Поскольку его величина через коэффициент формы кривой тока k_f связана со средним значени-

ем ($I_o = I_a k_f$), 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 вольтамперных характеристик выпрямительных диодов от температуры.

Принцип действия токоизмерительных клещей основан на явлении электромагнитной индукции. Они представляют собой легкоразъемный стальной сердечник в форме клещей – рисунок 5.5, которым охватывают токоведущий провод (1).

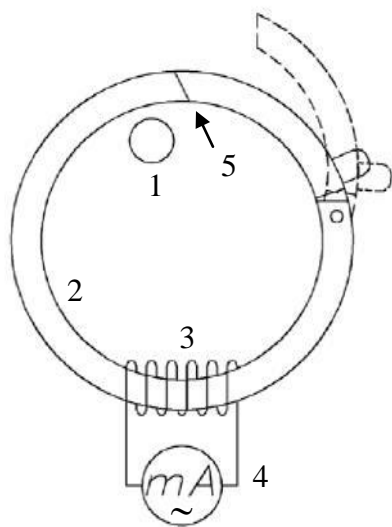


Рисунок 5.5 – Клещи токоизмерительные

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 :

$$k_I = \frac{I}{I_0},$$

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.

5.3 Измерение действующего значения напряжения

Электродинамический стрелочный вольтметр

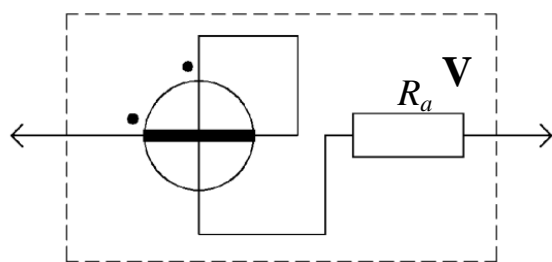


Рисунок 5.6 – Электродинамический стрелочный вольтметр

Основой вольтметра является электродинамический измеритель, обмотки которого включены последовательно – рисунок 5.6. Угол поворота стрелки вольтметра определяется выражением α :

$$\alpha = k \cdot \left(\frac{U}{R_o} \right)^2,$$

где R_{∂} - 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. Основой таких вольтметров является магнитоэлектрический стрелочный измерительный прибор, подключаемый к выходу двухполупериодного выпрямителя – рисунок 5.7. Поскольку эквивалентное сопротивление выпрямителя уменьшается на $0,1 \dots 1,0$ % при повышении температуры окружающей среды на 10°C , 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 $R_{\partial 2}$, 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 $R_{\partial 1}$, 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 $R_{\partial 2}$ – рисунок 5.7.

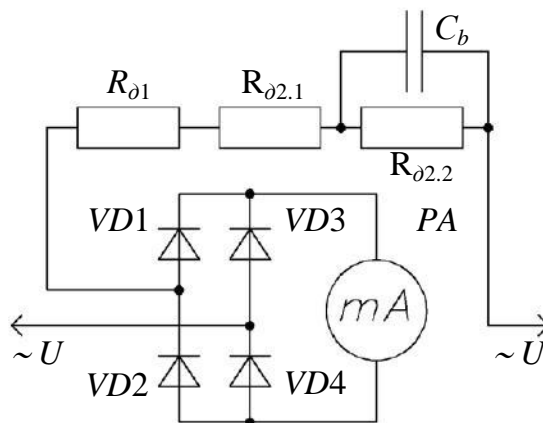


Рисунок 5.7 - Магнитоэлектрический стрелочный вольтметр с термо- и частотной компенсацией

5.4 Измерение активной мощности в однофазной цепи

Активная мощность в однофазной цепи переменного тока измеряется путем включения электродинамического ваттметра в соответствии с рисунком 4.9. В общем

случае через катушки электродинамического измерителя будут протекать токи, имеющие фазовый сдвиг φ

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

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

$$M(t) = i_1(t) \cdot i_2(t) \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}. \quad (5.4)$$

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

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T M(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_{1\max} I_{2\max} \sin(\omega t) \sin(\omega t + \varphi) \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} dt = I_1 I_2 \cos \varphi \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}, \quad (5.5)$$

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 α , указываемый стрелкой прибора, оказывается пропорциональным активной мощности в исследуемой цепи, определяемой выражением $P = U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$.

5.5 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

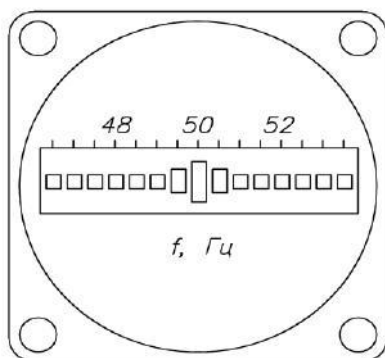


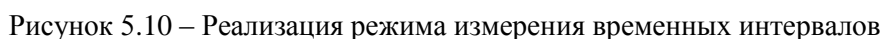
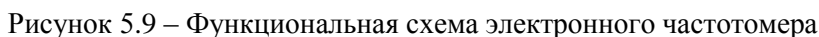
Рисунок 5.8 – Резонансный электромагнитный герцметр

миниатюрных электронных 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 колеба-

Измерение частоты и периода колебаний электронным частотомером.

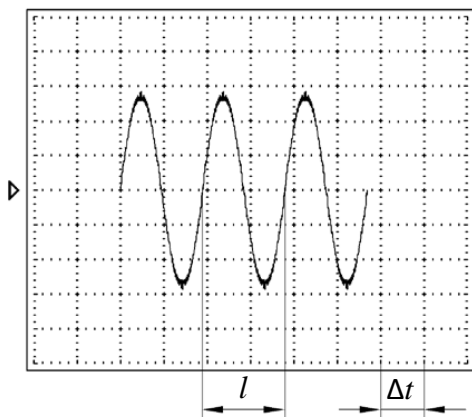
Определение частоты f колебаний основано на подсчете числа колебаний в те-

Если необходимо с высокой точностью определить период следования импуль-



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 рассчитывают 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:

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

Рисунок 5.11 – Оценка колебаний по наблюдаемой осциллограмме

где Δt – параметр осциллограммы [с/дел] (при $\Delta t = 5 \text{ мкс} / \text{дел}$ и $l = 1,85 \text{ дел}$, $T = 9,3 \text{ мкс}$ – рисунок 5.11). 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

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

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 $u(t)$ – рисунок 5.11.

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

5.6 Измерение разности фаз сигналов

Осциллографический метод измерения 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 φ_1 и φ_2 определены только для моделей сигналов, разность фаз $\Delta \varphi$, являющуюся величиной относительной, находят, приняв один из наблюдаемых сигналов – например, А – за опорный – рисунок 5.12.

Так как полный период колебания составляет величину 2π , то $\Delta \varphi = 2\pi(T / \tau)$, где T – величина временного интервала, соответствующая периоду колебаний, а τ – 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 то аргумент гармонической функции сигнала В достигает такого же значения, что и аргумент сигнала А, позже.

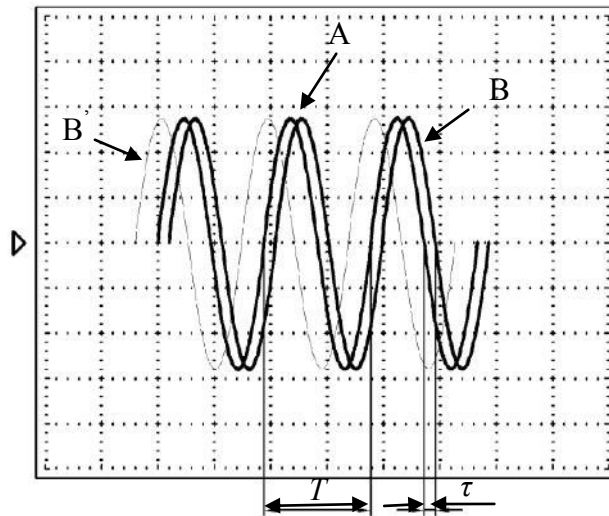


Рисунок 5.12 – Осциллографический метод измерения разности фаз

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 рисунке 5.12) 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 рисунке 5.13 представлена функциональная схема простейшего фазометра, реализующего преобразование фазового сдвига в интервал времени.

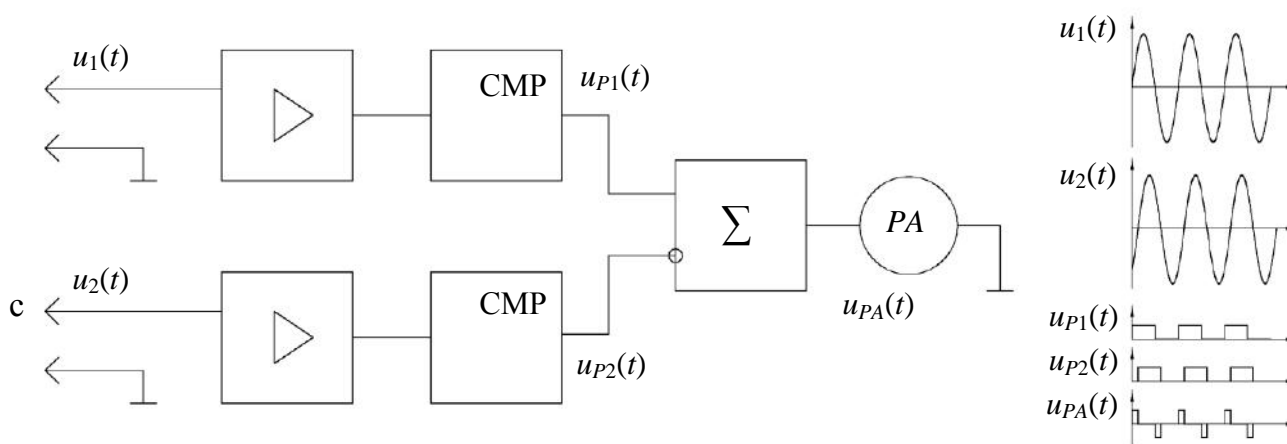


Рисунок 5.13 – Функциональная схема и временные диаграммы работы фазометра с измерительным прибором стрелочного типа

На выходах компараторов среднее значение напряжения этого сигнала, измеряемого выпрямительным вольтметром, пропорционально величине фазового сдвига

$\Delta \varphi : U_{aver} = \frac{U_0 \cdot \Delta \varphi}{\pi}$. Поэтому шкала такого прибора, проградуированная в градусах и линейна. Фазометры такого типа позволяют измерять величины фазовых сдвигов в диапазоне значений $0 \dots 180^\circ$ с погрешностью $0,1 \dots 1,0^\circ$.

5.7 Измерение комплексного сопротивления участка цепи

Измерения комплексного сопротивления (иногда называемого импедансом) участка цепи обычно выполняют с использованием так называемых мостовых схем. Схема одинарного моста изображена на рисунке 5.14. Участки цепи, называемые пле-

чами 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 или так называемый нуль-индикатор – измеритель тока стрелочного типа с центральным положением стрелки, которая может отклоняться влево или вправо в зависимости от направ-

ления протекающего через прибор тока \dot{I}_0 :

$$\dot{I}_0 = \dot{U} \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_4 - \dot{Z}_2 \dot{Z}_3}{\dot{Z}_0 \left(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 \right) \left(\dot{Z}_3 + \dot{Z}_4 \right) + \dot{Z}_1 \dot{Z}_2 \left(\dot{Z}_3 + \dot{Z}_4 \right) + \dot{Z}_3 \dot{Z}_4 \left(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 \right)}. \quad (5.6)$$

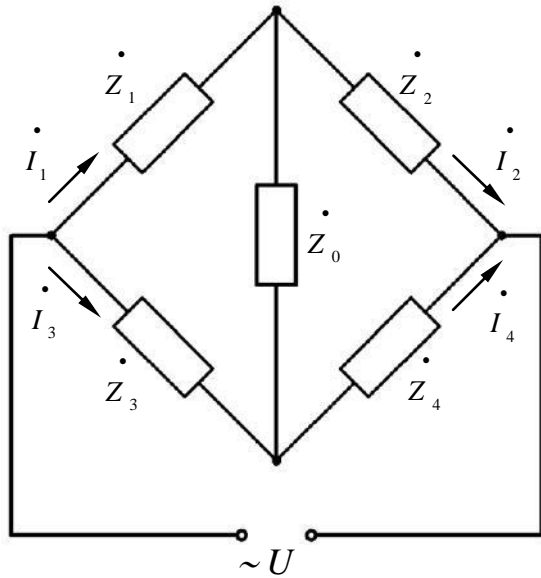


Рисунок 5.14 – Одинарный мост

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:

$$\begin{cases} R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_1 \\ R_1 R_4 + X_1 X_4 = R_2 R_3 + X_2 X_3 \end{cases}. \quad (5.7)$$

Наличие двух уравнений равновесия (5.7.) означает необходимость регулирования не менее двух параметров моста переменного тока для достижения равновесия. Из этих уравнения для фазовых характеристик сопротивлений следует важный вывод 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, $\varphi_4 = \varphi_3 = 0$), то одно и сопротивлений – \dot{Z}_1 или \dot{Z}_4 – должно быть емкостным, а другое – индуктивным.

На рисунке 5.15 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 5.15, а. Условия равновесия моста имеют вид:

$$r_x = (R_1 + r_1) \cdot (R_3 / R_2),$$

$$C_x = C_1 (R_2 / R_3).$$

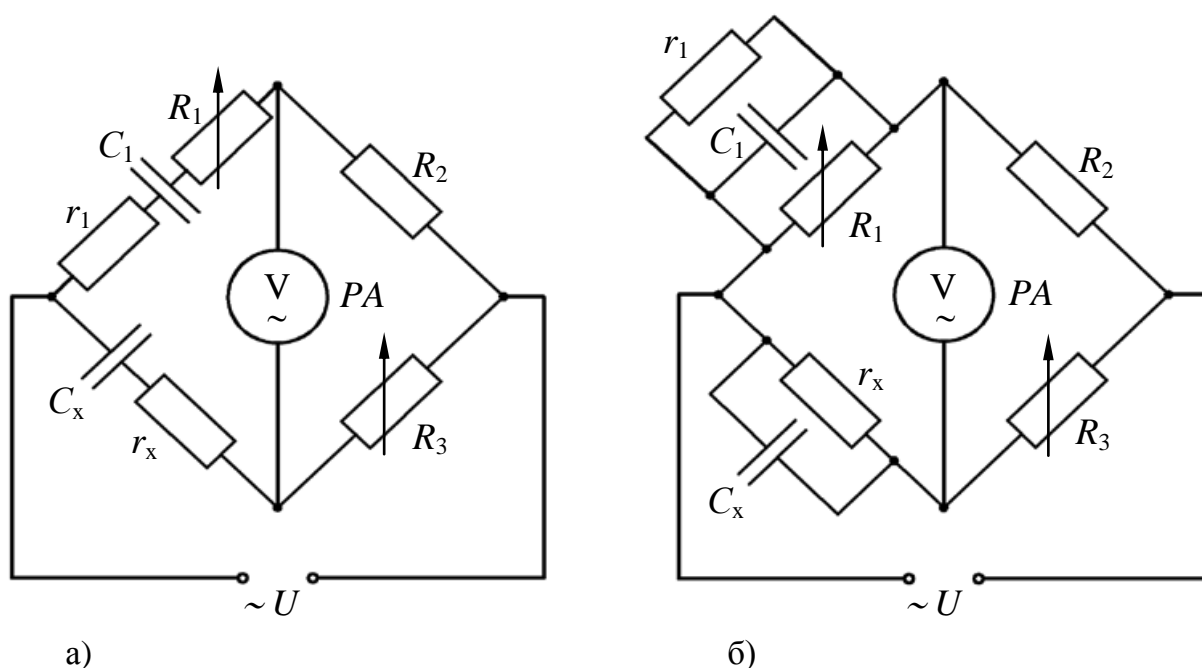


Рисунок 5.15 - Мосты для измерения емкости методом сравнения с мерой

При этом тангенс диэлектрических потерь находится из выражения

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega \cdot C_1 \cdot R_3.$$

Сопротивления R_1 и R_3 и 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 5.15, б. В этом случае

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{1}{\omega C_1 R_1}.$$

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

5.8 Измерение энергии однофазного переменного тока

Как известно, электрическая энергия определяется выражением:

$$W = \int_{t_2}^{t_1} P dt,$$

где P — мощность, потребляемая нагрузкой.

Энергия измеряется электрическими счетчиками. Для счетчиков переменного тока используются индукционные измерительные механизмы.

Основными элементами счетчика (рисунок 5.16) являются: электромагниты (1) и (4), называемые соответственно последовательным и параллельным электромагнитом, алюминиевый диск (2), укрепленный на оси, постоянный магнит (8) и другие элементы, назначение которых будет пояснено ниже. Схемы включения счетчика и ваттметра одинаковы. Обмотка электромагнита (1) выполняется из небольшого числа витков относительно толстого провода и включается в цепь последовательно с нагрузкой H . Обмотка электромагнита (4), имеющая большое число витков, выполняется из тонкого провода и включается параллельно нагрузке.

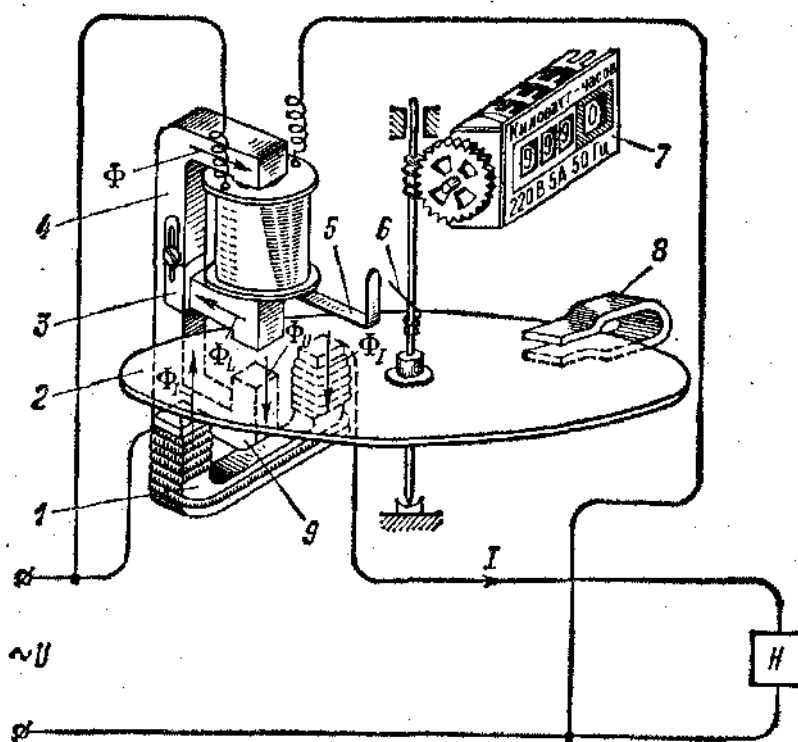


Рисунок 5.16 — Схематическое изображение устройства и включения в цепь однофазного индукционного счетчика

По конструктивным особенностям и расположению сердечника параллельного электромагнита счетчики делятся на радиальные и тангенциальные. В первых сердечник электромагнита (4) располагается по радиусу диска, а в конструкциях вторых — по хорде. Отечественной промышленностью выпускаются только тангенциальные счетчики (рисунок 5.17).

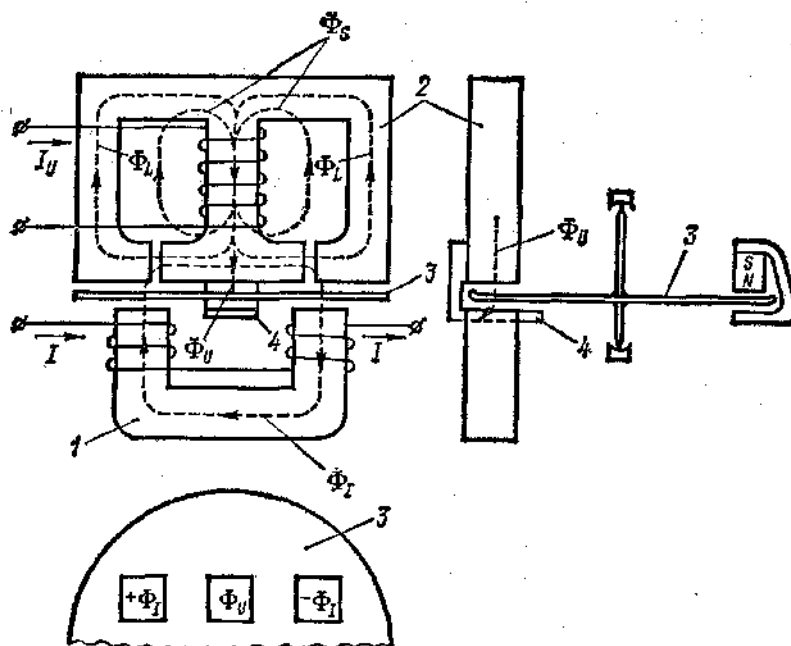


Рисунок 5.17 – Устройство тангенциального индукционного однофазного счетчика

Ток I в последовательной цепи счетчика (рисунок 5.17) создает магнитный поток Φ_I который проходит через сердечник электромагнита (1), через сердечник электромагнита (2) и дважды пересекает диск (3). Ток I_U в параллельной цепи счетчика создает потоки Φ_U и Φ_L . Первый, замыкаясь через противопололюс (4), пересекает диск в одном месте (в середине между полюсами электромагнита (1)). Поток Φ_L замыкается через боковые стержни электромагнита (2), не пересекает диска и непосредственного участия в создании вращающего момента не принимает. Называется он нерабочим магнитным потоком параллельной цепи в отличие от потока Φ_U , называемого рабочим.

Из-за больших воздушных зазоров на пути потоков Φ_I и Φ_U можно с достаточным приближением считать зависимость между этими потоками и токами I и I_U линейной, т. е.

$$\Phi_I = K_I \cdot I, \quad \Phi_U = K_U \cdot I_U = \frac{K_U \cdot U}{Z_U},$$

где U - напряжение на параллельной обмотке; Z_U - полное сопротивление параллельной обмотки; K_I, K_U – коэффициенты преобразования тока и напряжения.

Ввиду малости активного сопротивления параллельной обмотки по сравнению с ее индуктивным сопротивлением X_U можно принять:

$$Z_U \approx X_U = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_U,$$

где L_U -индуктивность обмотки.

Контрольные вопросы

1. Какое преимущество переменного тока по сравнению с постоянным?
2. Какая система переменного тока наиболее широко используется в практике?
3. Почему необходимо классифицировать на виды сигналы в цепях ~ тока?
4. В чем различие схем включения измерителя ~ тока?
5. В чем отличие электродинамического измерения величины действующего напряжения от магнитоэлектрического?
6. По какому выражению определяется активная мощность в однофазной цепи:
 $P = U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$ или $P = U \cdot I_1 \cdot \sin \varphi$?
7. Какими методами измеряют частоту и период колебаний?
8. Какими методами измеряют разность фаз сигналов?
9. Почему удобно использовать мостовые схемы измерения комплексного сопротивления и емкости?
10. Принцип действия индукционного счетчика.

6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Измерение различных неэлектрических величин (перемещений, усилий, температур и т. п.) электрическими методами выполняют с помощью устройств и приборов, преобразующих неэлектрические величины в зависимые от них электрические, которые измеряют электроизмерительными приборами со шкалами, градуированными в единицах измеряемых неэлектрических величин.

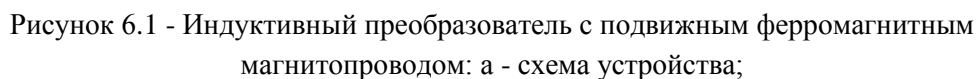
6.1 Виды преобразователей неэлектрических величин в электрические

Преобразователи неэлектрических величин в электрические, или датчики, разделяют на *параметрические*, основанные на изменении какого-либо электрического или магнитного параметра (сопротивления, индуктивности, емкости, магнитной проницаемости и т. п.) под действием измеряемой величины, и *генераторные*, в которых измеряемая неэлектрическая величина преобразуется в зависимую от нее э. д. с. (индукционные, термоэлектрические, фотоэлектрические, пьезоэлектрические и другие). Параметрическим преобразователям необходим посторонний источник электрической энергии, а генераторные сами являются источниками энергии.

Кроме преобразователей и электроизмерительных приборов, установки для измерения неэлектрических величин имеют промежуточные звенья - *стабилизаторы, выпрямители, усилители, измерительные мосты* и т. п.

Для измерения линейных перемещений применяют *индуктивные преобразователи* - электромагнитные устройства, у которых параметры электрических и магнитных цепей изменяются при перемещении ферромагнитного магнитопровода или якоря, соединенного с перемещающейся деталью.

Шкалу прибора градуируют в соответствующих единицах измерения, например в миллиметрах (*мм*).



74

Для преобразования малых перемещений в удобную для электрического измерения величину применяют преобразователи с изменяющимся воздушным зазором в виде подковы с обмоткой и якорем (рисунок 6.2, а), который жестко связан с перемещаемой деталью. Всякое перемещение якоря приводит к изменению тока I в обмотке (рисунок 6.2, б), что позволяет при неизменном переменном напряжении стабильной частоты градуировать шкалу электроизмерительного прибора в единицах измерения, например в микрометрах ($\mu\text{м}$).

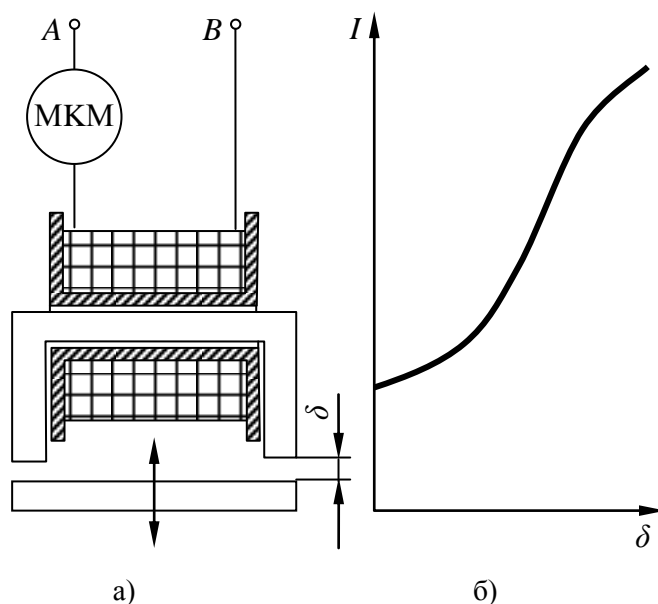


Рисунок 6.2 - Индуктивный преобразователь с изменяющимся воздушным зазором:

а - схема устройства;

б - график зависимости тока обмотки преобразователя от воздушного зазора в магнитной системе.

Наибольшей чувствительностью обладают дифференциальные индуктивные преобразователи с двумя одинаковыми магнитными системами и одним общим якорем, расположенным симметрично относительно обоих магнитопроводов с воздушным зазором одинаковой длины (рисунок 6.3), у которых линейное перемещение якоря из его среднего положения одинаково изменяет оба воздушных зазора, но с разными знаками, что нарушает равновесие предварительно уравновешенного моста переменного тока из четырех обмоток. Это дает возможность судить о перемещении якоря по току измерительной диагонали моста, если он получает питание при стабилизированном переменном напряжении неизменной частоты.

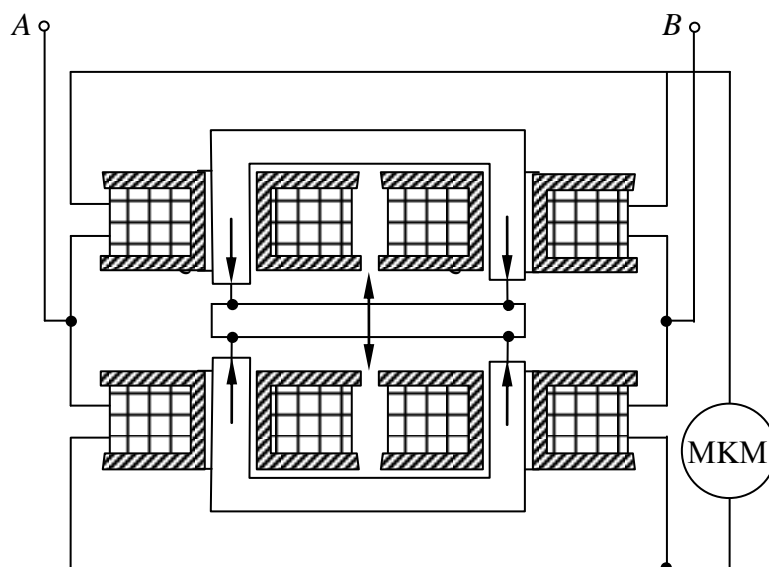


Рисунок 6.3 - Схема устройства дифференциального индуктивного преобразователя.

6.3 Измерение механических усилий, напряжений и упругих деформаций

Для измерения механических усилий, напряжений и упругих деформаций, возникающих в деталях и узлах различных конструкций, применяют *проволочные преобразователи - тензорезисторы*, которые деформируясь, вместе с исследуемыми деталями, изменяют свое электрическое сопротивление.

Тензорезисторы изготовляют в виде зигзагообразно расположенной проволоки большого удельного сопротивления (константан, нихром, манганин) диаметром 0,02 - 0,04 мм либо из медной специально обработанной фольги толщиной 0,1 - 0,15 мм, которые заклеивают бакелитовым лаком между двумя слоями тонкой бумаги и подвергают термической обработке (рисунок 6.4, а).

Изготовленный тензорезистор приклеивают к тщательно очищенной деформируемой детали очень тонким слоем изоляционного клея так, чтобы направление ожидаемой деформации детали совпало с направлением длинных сторон петель проволоки. При деформации тела приклеенный тензорезистор воспринимает эту же деформацию, что изменяет его электрическое сопротивление вследствие изменения размеров проволоки датчика, а также структуры ее материала, которая сказывается на удельном сопротивлении проволоки.

Обычно сопротивление тензорезистора составляет несколько сотен Ом, а относительное изменение его сопротивления - десятые доли процента и зависит от деформации, которая в пределах упругости прямо пропорциональна приложенным усилиям и возникающим механическим напряжениям.

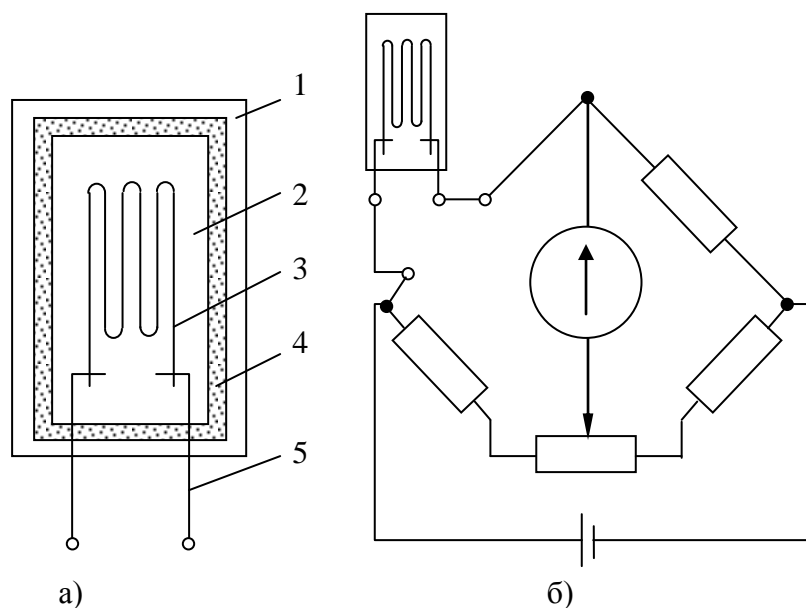


Рисунок 6.4 - Тензорезистор: а - схема устройства: 1 - деформируемая деталь, 2 - тонкая бумага, 3 - проволока, 4 - клей, 5 – выводы;
б - схема включения в плечо неуравновешенного моста резисторов.

Поскольку относительное изменение сопротивления тензорезистора прямо пропорционально линейной деформации исследуемого тела, а следовательно, и механическим напряжениям внутренних сил упругости, то, пользуясь показаниями гальванометра измерительной диагонали предварительно уравновешенного моста резисторов, одним из плеч которого является тензорезистор, можно судить о значениях измеряемых механических величин (рисунок 6.4, б).

Применение неуравновешенного моста резисторов требует стабилизации напряжения источника питания или применения в качестве электроизмерительного прибора магнитоэлектрического логометра, на показания которого изменение напряжения в пределах $\pm 20\%$ номинального, указанного на шкале прибора, существенного влияния не оказывает.

6.4 Измерение температуры различных сред

Для измерения температуры различных сред применяют *термочувствительные и термоэлектрические преобразователи*. К термочувствительным преобразователям относятся металлические и полупроводниковые терморезисторы, сопротивление которых в значительной степени зависит от температуры (рисунок 6.5, а).

Наибольшее распространение получили платиновые терморезисторы для измерения температуры в диапазоне от -260 до $+1100$ °С и медные терморезисторы - для интервала температур от -200 до $+200$ °С, а также полупроводниковые терморезисторы с отрицательным коэффициентом электрического сопротивления - термисторы,

отличающиеся высокой чувствительностью и малыми размерами по сравнению с металлическими терморезисторами, для измерения температур от -60 до $+120$ °С.

Для защиты термочувствительных преобразователей от повреждений их помещают в тонкостенную стальную трубу с запаянным дном и устройством для присоединения выводов к проводам неуравновешенного моста резисторов (рисунок 6.5, б), что позволяет по току измерительной диагонали судить об измеряемой температуре.

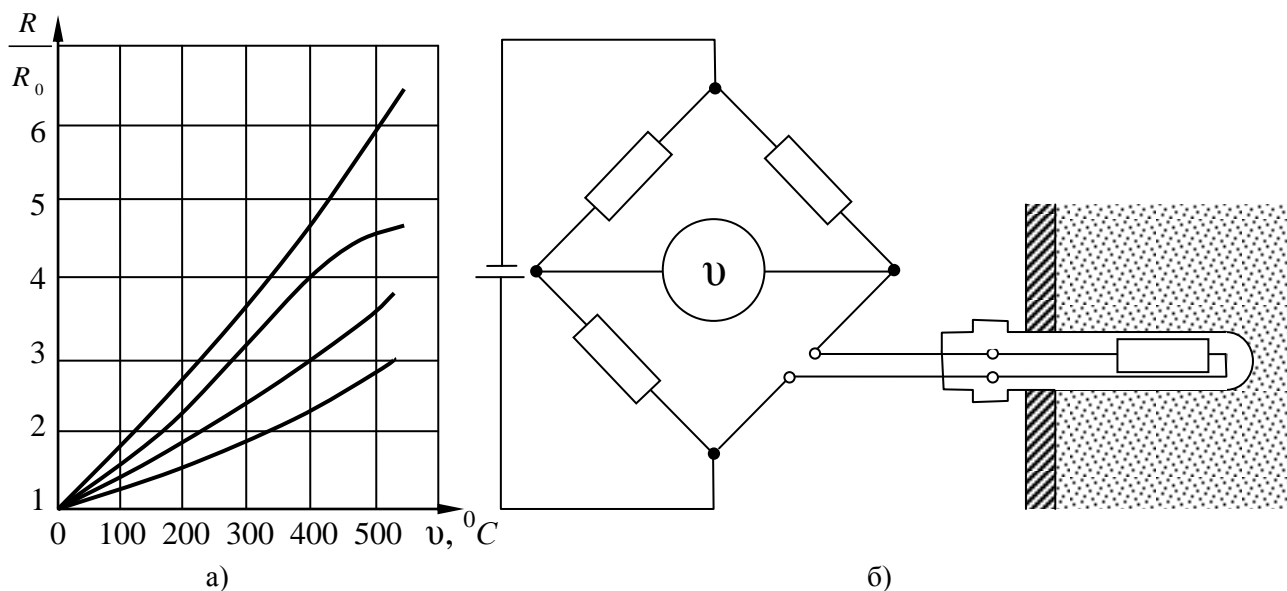


Рисунок 6.5 - Терморезисторы:

- а - графики зависимости изменения относительного сопротивления металлов от температуры;
- б - схема включения терморезисторов в плечо неуравновешенного моста резисторов.

Шкалу магнитоэлектрического логометра, используемого в качестве измерителя, градуируют в градусах Цельсия ($^\circ\text{C}$).

Термоэлектрические преобразователи температуры - термопары, генерирующие небольшую ЭДС под влиянием нагрева места соединения двух разнородных металлов, помещают в защитную пластмассовую, металлическую или фарфоровую оболочку в зоне измеряемых температур (рисунок 6.6, а, б).

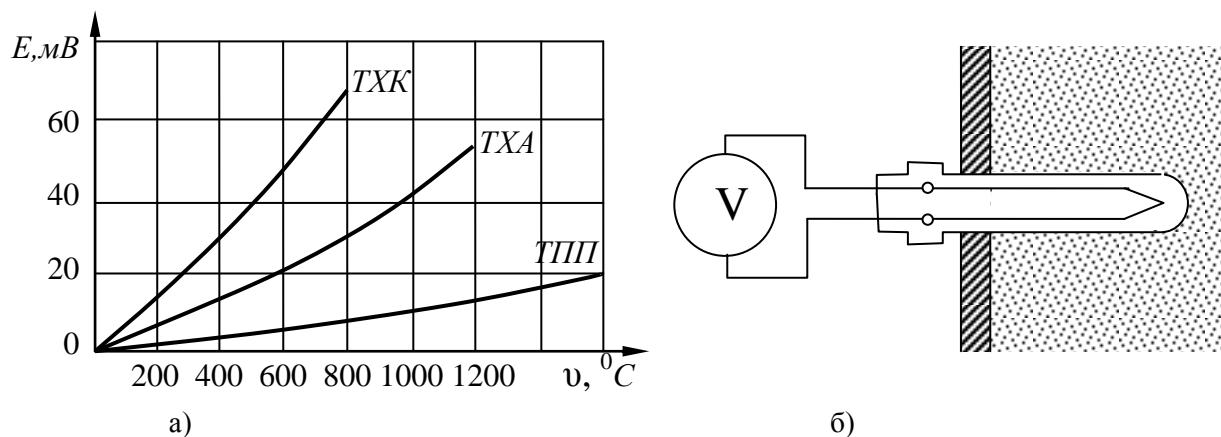


Рисунок 6. 6 - Термопары: а - графики зависимости ЭДС от температуры термопар:

- ТПП - платинородий-платиновой, TXA - хромель-алюмелевой, TXK-хромель-копелевой;
- б - схема установки для измерения температуры с помощью термопары.

Свободные концы термопары соединяют однородными проводниками с магнитоэлектрическим милливольтметром, шкала которого проградуирована в градусах Цельсия. Наибольшее распространение получили следующие термопары: платиновой - платиновая для измерения температур до $+1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и кратковременно до $+1600\text{ }^{\circ}\text{C}$, хромель-алюмелевая для температур соответственно указанным режимам - $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и хромель-копелевая, предназначенная для длительного измерения температур до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ и кратковременного - до $+800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Электрические методы измерения различных неэлектрических величин широко применяют в практике, поскольку они обеспечивают высокую точность измерений, отличаются широким диапазоном измеряемых величин, позволяют выполнять измерения и регистрацию их на значительном расстоянии от места расположения контролируемого объекта, а также дают возможность проводить измерения в труднодоступных местах.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют виды преобразования неэлектрических величин в электрические?
2. Какие преобразователи неэлектрических величин используют для больших перемещений?
3. Какие преобразователи неэлектрических величин используют для малых перемещений?
4. Какой индукционный преобразователь наиболее чувствителен?
5. Для измерения каких неэлектрических величин используют тензорезистор?
6. Зачем предварительно уравнивают мост резисторов при измерении механических величин?
7. К какому виду преобразователей относятся металлические и полупроводниковые терморезисторы?
8. Для измерения каких температур используют термопары и почему?
9. В какие оболочки можно помещать термопары в зоне измеряемых температур?
10. Почему используют электрические методы для измерения неэлектрических величин?

7 КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОГРЕШНОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЙ

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

Погрешность абсолютная (ΔX) выражается разностью между измеренным значением величины X и ее истинным значением X_H : $\Delta X = X - X_H$. 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 X .

Погрешность относительная (γ) – отношение абсолютной погрешности к истинному значению:

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_H} \cdot 100 \% .$$

Поскольку истинное значение при проведении измерений остается неизвестным, при расчетах вместо X_H используют измеренное значение X и считают, что

$$\gamma \approx \frac{\Delta X}{X} \cdot 100 \% .$$

В большинстве случаев относительную погрешность выражают *в процентах*.

Приведенная погрешность (γ_{np}) служит для оценки точности электроизмерительных приборов и определяется следующим выражением

$$\gamma_{np} = \frac{\Delta X}{X_{пред}} \cdot 100 \% ,$$

где $X_{пред}$ – номинальное значение шкалы прибора, т.е. максимальное значение шкалы на выбранном пределе измерения прибора. Приведенная погрешность определяет класс точности прибора.

Числа, указывающие класс точности прибора γ_0 , обозначают наибольшую допустимую приведенную погрешность в процентах

$$\gamma_0 \geq \gamma_{np \cdot \max} .$$

Т.е. при нормальной эксплуатации *максимальное значение приведенной погрешности не должно превышать класс точности*.

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, обеспечивающий 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 (табл. 7.1) должен соответствовать требованиям решаемой задачи.

Таблица 7.1

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; 4

Пример: Амперметр имеет предел измерения $I_{пред.} = 5$ А. Если максимальная абсолютная погрешность прибора $\Delta I = \pm 0,05$ А, то приведенная погрешность

$$\gamma_{пр. max} = \Delta I / I_{пред.} = 0,05/5,$$

а класс точности прибора (или наибольшая допускаемая приведенная погрешность) равен

$$\gamma_0 = \frac{\Delta I}{I_{пред.}} \cdot 100 \% = \frac{0,05}{5} \cdot 100 \% = 1 \% .$$

На приборе данный класс точности обозначен цифрой 1. Эта погрешность характеризует *только точность самого прибора*, но не точность измерения.

7.1. 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 рисунке 7.1 представлены две схемы включения амперметра и вольтметра в цепь постоянного тока.

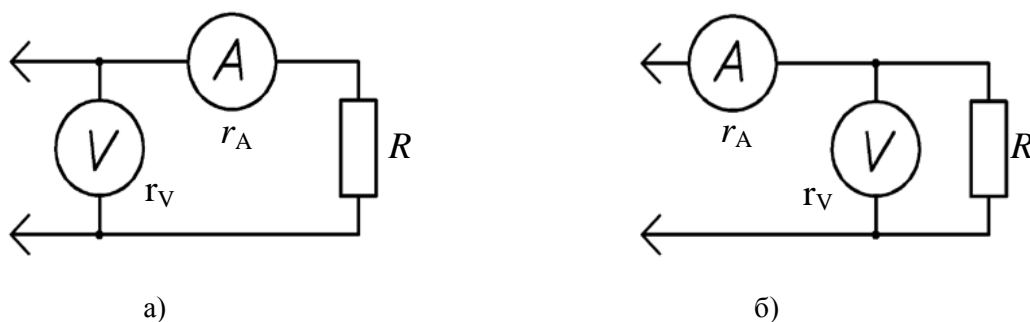


Рисунок 7.1 - Схемы включения амперметра и вольтметра

Включение приборов по схеме рисунка 7.1, а обеспечивает наиболее точное измерение величины тока I_R , протекающего через резистор R , а включение по схеме рисунка 7.1, б – наиболее точное измерение падения напряжения U_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 будут различны R и будут отличаться от его истинного значения:

$$R_H \Big|_{a)} = \frac{U_V}{I_A} = \frac{(U_R + U_A)}{I_A} = R + r_A,$$

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

Найдем относительные методические погрешности измерений γ сопротивления R

$$\gamma R \Big|_{a)} = \frac{\Delta R \Big|_{a)}}{R} \cdot 100 \% = \frac{r_A}{R} \cdot 100 \% ,$$

$$\gamma R|_{\delta)} = \frac{\Delta R|_{\delta)} }{R} \cdot 100 \% = \frac{R}{R + r_v} \cdot 100 \% .$$

Поскольку $r_v \gg r_A$, схема, приведенная на рисунке 7.1, а, обеспечит меньшие погрешности при измерении больших сопротивлений R , а схема, приведенная на рисунке 7.1, 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). Инструментальная погрешность имеет место быть из-за неточности в изготовлении деталей приборов, неточности градуировки шкалы, старения и износа деталей приборов.

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.

7.2 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 источник таких погрешностей – ошибки оператора или дефекты измерительного прибора. Наличие этих погрешностей выявляется при обработке результатов измерений (рисунок 7.2, а), после чего эти результаты исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Погрешность систематическая – обусловлена несовершенством средства измерений и метода измерений (рисунок 7.2, б).

Она имеет повторяющийся характер при определении одной и той же величины. Примером *постоянной систематической погрешности* может служить погрешность результата измерений тока в цепи, если образцовый потенциометр имеет свою

постоянную погрешность измерения. Погрешность потенциометра во времени не изменяется, но при каждом измерении вносит свою погрешность измерения в результат. Примером *переменной систематической погрешности* может служить погрешность, получаемая в результате снижения напряжения на источнике дополнительного питания, в случае если результат зависит от этого напряжения. Разряд АБ происходит постоянно и в нелинейной форме, а также вносит изменяющуюся во времени погрешность измерения в результат.

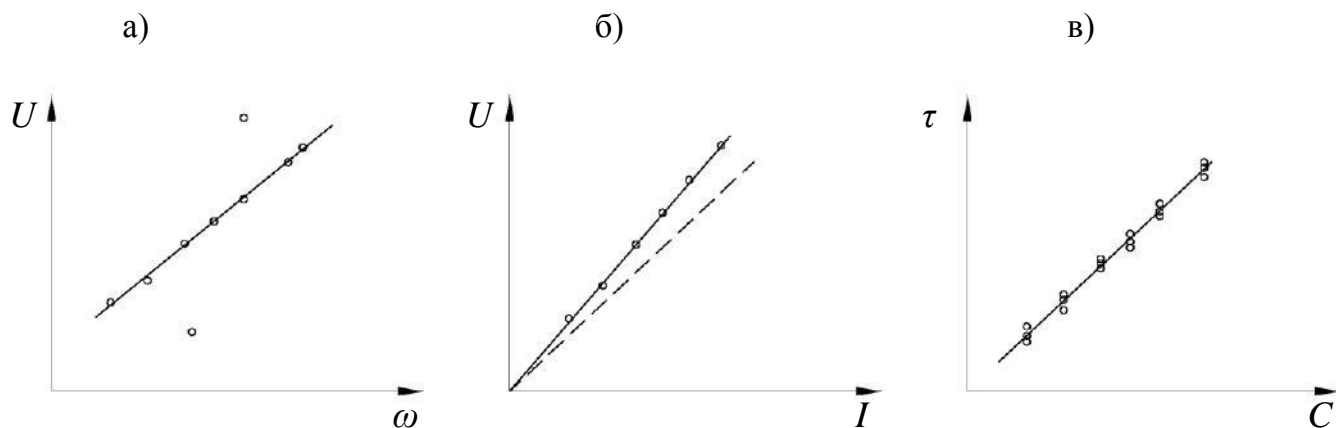


Рисунок 7.2 - Различные погрешности результатов измерений:

а) грубая (промах); б) систематическая; в) случайная

Погрешность случайная – причиной возникновения этой погрешности являются непредвиденные изменения параметров исследуемой цепи, средства измерений, окружающей среды (рис. 7.2, в).

Контрольные вопросы

1. Что такое погрешность измерений?
2. Что характеризует класс точности и почему?
3. Чем обусловлена методическая погрешность?
4. В каких приборах может быть погрешность квантования?
5. Чем обусловлена инструментальная погрешность?
6. Почему возникает погрешность наблюдения?
7. Какой основной источник возникновения грубой погрешности?
8. Какой характер имеет постоянная систематическая погрешность?
9. В результате чего получается переменная систематическая погрешность?
10. Назовите причину возникновения случайной погрешности?

8 ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ЕМКОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

8.1 Контроль сопротивления изоляции

Основное требование к изоляции сводится к отсутствию ее нагрева при рабочем напряжении и вместе с тем от изоляции требуется не проводить тока при постоянном напряжении. Измерение сопротивления изоляции является одним из простейших, но весьма эффективных методов контроля состояния изоляции, позволяющих фиксировать один из самых распространенных дефектов изоляции - ее увлажнение, приводящее к существенному нагреву при переменном напряжении из-за увеличения сквозной электропроводности диэлектрика и увеличения поляризационных потерь. Измерение сопротивления изоляции позволяет контролировать как *сплошное увлажнение изоляции*, так и *увлажнение только одного из слоев* в слоистой изоляции.

В сетях переменного тока выше 1 кВ с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью, в сетях переменного тока до 1 кВ с изолированной нейтралью и в сетях постоянного тока с изолированными полюсами или с изолированной средней точкой, как правило, должен выполняться автоматический контроль изоляции, действующий на сигнал при снижении сопротивления изоляции одной из фаз (или полюса) ниже заданного значения, с последующим контролем асимметрии напряжения при помощи показывающего прибора (с переключением). Допускается осуществлять контроль изоляции путем периодических измерений напряжений с целью визуального контроля асимметрии напряжения.

Сопротивлением изоляции называют отношение напряжения, приложенного к изоляции, к току через сечение изоляции, при приложении постоянного напряжения и через 1 мин. после подачи напряжения, то есть это - сопротивление при постоянном напряжении через 1 мин. после его подачи. *Сплошное увлажнение изоляции* приводит к снижению ее сопротивления ввиду высокой проводимости влаги, что позволяет по величине сопротивления сразу судить о возможном ее увлажнении. Из-за наличия абсорбционных явлений ток через изоляцию при приложении постоянного напряжения меняется по величине в течение некоторого времени порядка десятков секунд, поэтому сопротивлением изоляции и считают ее сопротивление через 60 с после приложения напряжения. Суть абсорбционных явлений - и одновременно возможность контроля слоистого увлажнения изоляции - поясняет рисунок 8.1, на котором изображена двухслойная изоляция (рис. 8.1, а) и две равноправные эквивалентные схемы замещения двухслойной изоляции.

Схема рисунка 8.1, б является естественной схемой замещения двухслойной изоляции, учитывающей сквозные токи через слои изоляции и емкости слоев.

Схема рисунка 8.1, в совершенно аналогична схеме рисунка 8.1, б, если выполняются соотношения следующего типа:

$$R = R_1 + R_2,$$

$$C_r = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2},$$

$$r = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) (C_1 + C_2)^2}{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2},$$

$$\Delta C = \frac{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2}{(R_1 + R_2)^2 (C_1 + C_2)}.$$

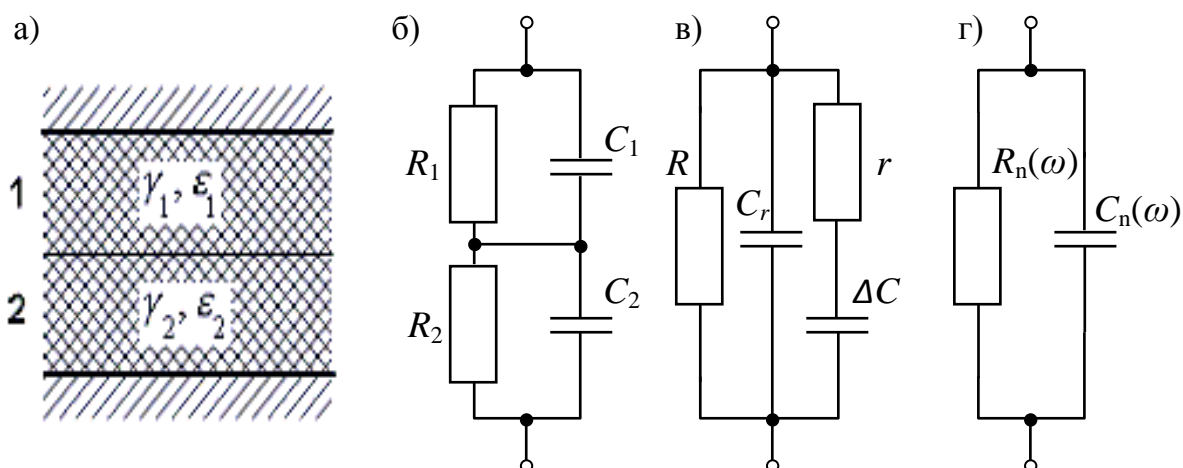


Рисунок 8.1 - Двухслойная изоляция и эквивалентные электрические схемы ее замещения

При подаче постоянного напряжения сначала происходит резкий скачок напряжения от нуля до установившегося значения, при котором ток протекает только по емкостным элементам (рисунок 8.1, б). Распределение напряжения определяется емкостями этих элементов. По прошествии некоторого времени емкостные элементы перестают играть какую-либо роль и распределение напряжения по слоям определяется их омическими сопротивлениями. Если величины сопротивлений велики, то перезарядка емкостных элементов длится достаточно долго, показания мегаомметра в течение некоторого времени (десятки секунд) будут изменяться; хорошая изоляция без увлажнения означает достаточно длительный процесс перехода в установившийся режим. При увлажнении одного из слоев перезарядка через один из низкоомных эле-

ментов R_1 или R_2 пройдет достаточно быстро, за время менее 15 с. Если даже второй слой большое сопротивление (а при переменном напряжении низкоомный слой будет нагреваться емкостными токами высокоомного слоя), то по соотношению сопротивлений, измеренных в разные моменты времени (конкретно - через 60 с, R_{60} , и через 15 с, R_{15}), можно судить об увлажнении одного из слоев.

Если пренебречь начальным скачком тока, заряжающего геометрическую емкость C_T , то после приложения постоянного напряжения ток через изоляцию определяется суммой сквозного тока через элемент R (рисунок 8.1, в) и тока заряда элемента ΔC :

$$i = \frac{U}{R} + \frac{U}{r} \cdot e^{-t/T},$$

откуда $R(t) = \frac{U}{i} = \frac{R}{1 + \frac{R}{r} \cdot e^{-t/T}}$ - сопротивление двухслойной изоляции меняется во

времени, и скорость изменения выше, если хотя бы один из слоев имеет невысокое сопротивление (рисунок 8.2), а $T = r \cdot \Delta C$.

Таким образом, **контролируя величину $> R_{60}$, можно судить о наличии сплошного увлажнения изоляции, а по отношению $K_{abc} = R_{60} / R_{15}$, называемому коэффициентом абсорбции, можно судить о наличии увлажнения одного из слоев изоляции.** Более конкретно, если $K_{abc} < 1.3$, то, как это следует из опытных данных, изоляция недопустимо увлажнена.

Коэффициент абсорбции является показателем увлажнения изоляции при температурах ниже +35...+40°C. При более высокой температуре возрастает ток сквозной проводимости и коэффициент абсорбции и для сухой, и для влажной изоляции приближаются к единице.

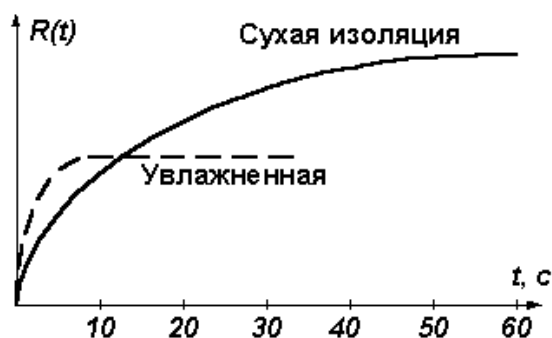


Рисунок 8.2 - Зависимость сопротивления от времени при сухой и увлажненной изоляции

При измерении сопротивления изоляции принимают во внимание, прежде всего, абсолютную величину сопротивления R_{60} , которая должна быть не меньше

нормированного значения, а затем и коэффициент абсорбции. Если обе величины не выходят за пределы нормы, то говорят о том, что увлажнения изоляции не обнаружено; если хотя бы одна из величин неудовлетворительна, то делают вывод о недопустимом увлажнении изоляции.

Требуемые значения сопротивления изоляции для различных установок представлены в правилах эксплуатации электроустановок. Для силовых трансформаторов значения сопротивления изоляции, устанавливаемые нормами, зависят от температуры обмоток; так, у трансформаторов с номинальным напряжением обмотки высшего напряжения 35 кВ при 20°C сопротивление главной изоляции должно быть не менее 300 МОм , у трансформаторов 110 кВ - не менее 600 МОм . Поскольку изоляция трансформаторов включает в свой состав ряд изоляционных промежутков, для контроля характеристик изоляции, включая и измерения сопротивления, используют нормативные схемы измерения. Перечень схем для двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов приведен в таблице 8.1.



Рисунок 8.3 – Мегаомметр М1102

Измерения сопротивления изоляции в эксплуатации производят мегаомметрами на напряжение $0,5\text{ кВ}$, 1 кВ или $2,5\text{ кВ}$. Наиболее распространенными являются *мегаомметры со встроенными генераторами*, обеспечивающими автономную работу; к такому типу относится мегаомметр М1102 (рисунок 8.3). Мегаомметры типа Ф4101, позволяющие измерять сопротивления до 50000 МОм , имеют комбинированное питание (от сети и от сухих элементов) и построены по последовательной схеме, в которой источник напряжения, измерительный элемент и испытуемая изоляция включаются последовательно.

Таблица 8.1

Схемы измерения характеристик изоляции трансформаторов

Последовательность измерений	Двухобмоточные измеряемые заземляемые обмотки части	Трехобмоточные измеряемые заземляемые обмотки части
1	НН Бак, ВН	НН Бак, СН, ВН
2	ВН Бак, НН	СН Бак, НН, ВН
3	(ВН+НН)* Бак	ВН Бак, НН, СН
4	-	(ВН+СН)* Бак, НН
5	-	(ВН+СН+НН)* Бак

*Измерения обязательны только для трансформаторов мощностью 16000 кВА и более.

8.2 Контроль емкости изоляции

Контроль величины емкости изоляции позволяет выявлять слоистое увлажнение изоляции.

Можно попытаться использовать простую параллельную схему замещения двухслойной изоляции по рисунку 8.1, а с параллельно соединенными резистивным элементом R_n и емкостным элементом C_n (рисунок 8.1, з). При этом, однако, значения параметров схемы замещения оказываются частотно-зависимыми, в частности

$$C_n = C_r + \frac{\Delta C}{1 + \omega^2 T^2},$$

$$T = r \cdot \Delta C.$$

В зависимости $C_n(\omega)$ показан на рисунке 8.3. С ростом степени увлажнения возрастает размах изменения емкости $C_n(\omega)$ с изменением частоты. Использование этой зависимости может служить для обнаружения слоистого увлажнения изоляции.

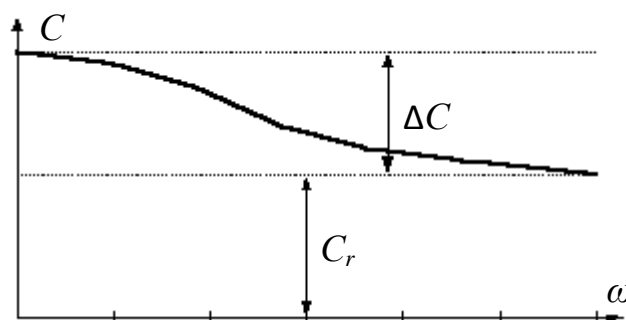


Рисунок 8.3 - Зависимость емкости от частоты для двухслойной изоляции

Для оценки состояния изоляции измерения производят на частотах 2 Гц и 50 Гц при неизменной температуре изоляции и затем определяют отношение C_2/C_{50} , которое и служит показателем качества изоляции. На основании опыта установлено, что изоляция имеет недопустимое увлажнение, если $C_2/C_{50} > 1,3 C_2/C_{50}$

Для измерения емкостей используются два основных принципа, проиллюстрированные на рисунке 8.4.

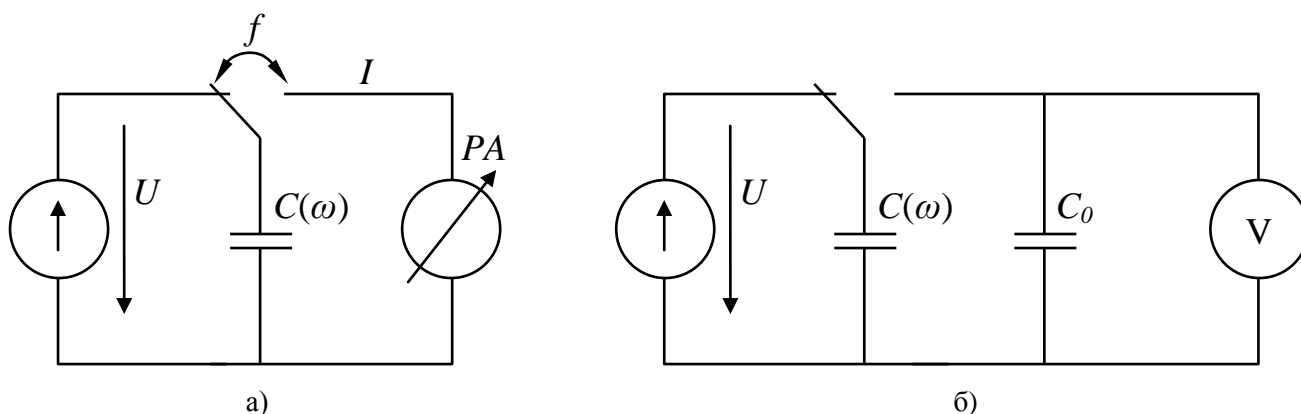


Рисунок 8.4 - Принципиальное устройство приборов емкостного контроля увлажнения

Переключатель с схеме рисунка 8.4, а периодически подключает испытуемую изоляцию к источнику постоянного напряжения, заряжая емкость изоляции, а затем - к цепи с гальванометром PA , через который емкость изоляции разряжается. Средний ток через гальванометр определяется частотой переключения, $I = U \cdot C(\omega) \cdot f$, так что при измерении на частотах 2 Гц и 50 Гц отношение емкостей определяется отношением токов: $\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{50 I_2}{2 I_{50}}$. По такому принципу работают приборы контроля влажности серии ПКВ.

По схеме рисунка 8.4, б) заряжается от источника постоянного напряжения, а затем на короткое время, примерно на четверть периода частоты 50 Гц , то есть на 5 мс , подключается к образцовому конденсатору C_0 . На образцовый конденсатор переносится заряд, пропорциональный емкости C_{50} (примерно соответствующей геометрической емкости C_r рисунка 8.1, в). Затем изоляция снова заряжается, кратковременно замыкается для разряда геометрической емкости и на время около четверти периода частоты 2 Гц (примерно 130 мс) подключается к образцовому конденсатору для снятия части заряда с абсорбционной емкости ΔC , что позволяет определить разность $C_2 - C_{50}$. По этой разнице и по значению C_{50} определяется отношение емкостей:

$$\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{C_2 - C_{50}}{C_{50}} + 1.$$

Напряжение на эталонном конденсаторе измеряется с помощью электронного вольтметра, имеющего большое входное сопротивление. По этому принципу работают приборы серии ПЕК и У-268.

Контрольные вопросы

1. Почему необходимо проводить сопротивление изоляции?
2. В сетях какого тока выполняется автоматический контроль изоляции?
3. Что такое сопротивление изоляции?
4. К чему приводит сплошное увлажнение изоляции?
5. Что принимают во внимание при измерении сопротивления изоляции?
6. Как узнать требуемые значения сопротивления изоляции для различных установок?
7. Каким прибором измеряют сопротивления изоляции трансформаторов во время эксплуатации?
8. Почему важен контроль емкости изоляции?
9. Как заряжается емкость изоляции и через какой прибор разряжается?
10. Каким прибором измеряют напряжение на эталонном конденсаторе?

9 ОБЩИЕ ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Нередко выполняя многие производственные работы, определённо нужно будет измерять различные электрические величины. В каждом таком конкретном случае необходимо выбирать требующийся прибор в зависимости от соответствующих действий по измерению. Тем не менее, имеется ряд правил, которые необходимо хорошо осмыслить, запомнить и использовать в выполнении любых работ, связанных с измерением электрических величин.

Проанализируем эти правила. В первую очередь при измерении электрических величин крайне важно строго соблюдать правила техники безопасности.

Выполнять измерения и подготавливать приборы нужно в следующем порядке:

- 1) Выбрать прибор с учетом необходимых условий измерений, а также степени точности.
- 2) Установить переключатель на конкретно нужный предел измерения (если он имеется).
- 3) Определить цену деления шкалы.
- 4) Расположить прибор в надлежащее положение.
- 5) С помощью корректора установить стрелку на нулевую отметку шкалы;
- 6) Включить прибор в цепь согласно схеме.
- 7) Посчитать число делений, на которые отклонилась указательная стрелка, таким образом, чтобы линия, соединяющая глаз и конец стрелки, была перпендикулярна к шкале.

- 8) Получить результат замера, перемножив число делений и цену деления прибора, на которые отклонилась указательная стрелка.
- 9) По окончании работы отключить цепь и, при необходимости, отсоединить прибор от других элементов цепи.

9.1 Подключение измерительных 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.

9.2 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 или копьевидной 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.

9.3 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 соответствующего 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 «AC» – 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.

9.4 Практические советы по применению измерительных приборов

1. **НИКОГДА** амперметр не должен подключаться параллельно какому-либо элементу цепи. Если его подсоединить параллельно, то перемычка в приборе расплавится и серьезно повредит прибор или цепь.

Если вольтметр включить в цепь последовательно, через него может пойти большой ток и повредить его.

2. **НИКОГДА** не пытайтесь измерить сопротивление участка цепи, подключенной к источнику напряжения или генератору сигналов – в лучшем случае цепь и измерительный прибор останутся целы.

3. **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 – внутреннее сопротивление батарейки велико, ее следует заменить.

4. **НИКОГДА** не включайте приборы, предназначенные для работы в цепях постоянного тока, в цепи переменного тока. В лучшем случае вообще ничего не удастся измерить.

5. **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 –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, то возникнет короткое замыкание.

6. **ВСЕГДА** проверяйте полярность приборов, подключаемых в цепь постоянного тока.

7. **ВСЕГДА** перед подключением прибора в цепь устанавливайте самый грубый предел измерений для предотвращения выхода прибора из строя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонов А.И. Информационно-измерительная техника и электроника: Учебное пособие по курсу лекций – Омск: изд-во ОмГТУ, 2008 – 182 с.

2. Бурый Е.В., Енин В.Н. Методы и средства измерения электрических величин в электротехнике: Текстовое (символьное) электронное издание - М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011- 37 с.

3. Электрические измерения: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.Н. Малиновского. – М.: Энергоатомиздат, 1985 – 416 с.

4. Байда Л.И., Добротворский Н.С., Душин Е.М. и др. Электрические измерения: Учебник для вузов /– Л.: Энергия, 1980. – 392 с.

5. Электрические измерения неэлектрических величин. Сайт: Школа для электрика «Электротехника и электроника». Статьи, советы, полезная информация.



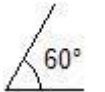





ПРИЛОЖЕНИЕ В

Единицы измерения электрических величин


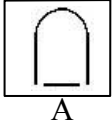

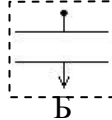
Величина		Единицы измерения			
Название	Обозначение	Наименование	Обозначение		Определение
			русское	международное	
Сила эл. тока	I	Ампер	А	А	Единица измерения эл. тока $i = dq/dt$ - упорядоченное движение эл. зарядов в проводящей среде.
Электрический заряд	q	Кулон	Кл	С	Количество электричества, проходящее через поперечное сечение проводника в течение 1 с при токе силой 1 А.
Электрическое напряжение	U	Вольт	В	V	Разность потенциалов между двумя точками эл. цепи. Общепринятая шкала напряжений: 127, 220, 380, 500, 660 В и т.д.
Электрическое сопротивление	R	Ом	Ом	Ω	Сопротивление проводника, между концами которого при силе тока 1 А возникает напряжение 1 В. ($U = I \cdot R$)
Активная мощность эл. цепи	P (N)	Ватт	Вт	W	Мощность эл. цепи с переменным током при $\cos \varphi = 1$ и действующих значениях напряжения 1 В и силы тока 1 А. ($P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$)
Реактивная мощность эл. цепи	Q	Вар	Вар	var	Мощность эл. цепи с переменным током при $\sin \varphi = 1$ и действующих значениях напряжения 1 В и силы тока 1 А. ($Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$)
Полная мощность эл. цепи	S	Вольт-Ампер	В*А	V*А	Мощность эл. цепи с действующими значениями напряжения 1 В и силы тока 1 А. ($S = U \cdot I$)
Электрическая емкость	C	Фарада	Ф	F	Емкость конденсатора, между обкладками которого при заряде 1 Кл возникает напряжение 1В.
Магнитный поток	Φ	Вебер	Вб	Wb	Магнитный поток, при убывании которого до 0 в контуре, сцепленном с этим потоком, сопротивлением 1 Ом проходит количество электричества 1 Кл ($\Phi = B \cdot S$).
Индуктивность	L	Генри	Гн	H	Индуктивность контура, с которым при силе постоянного тока в нем 1 А сцепляется магнитный поток 1 Вб.
Магнитная индукция	B	Тесла	Тл	T	Магнитная индукция, при которой магнитный поток сквозь поперечное сечение 1 м ² равен 1 Вб.
Напряженность электрического поля	E	Вольт на метр	В/м	V/m	Напряженность однородного эл. поля, при которой между точками, находящимися на расстоянии 1 м вдоль линии напряженности поля, создается разность потенциалов 1 В.
Частота переменного тока	f	Герц	Гц	Hz	Частота переменного тока промышленная – 50 Гц.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Обозначения положения прибора, класса точности, прочности изоляции

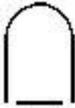

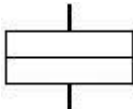
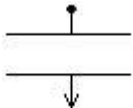
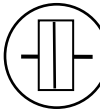
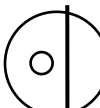




1. Горизонтальное положение шкалы	
2. Вертикальное положение шкалы	
3. Наклонное положение шкалы под углом к горизонту	
4. Класс точности при нормировании погрешности в % от длины шкалы; например 1,5	
5. Класс точности при нормировании погрешности в % от диапазона измерений; например 1,5	1,5
6. Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением; например 2 кВ	
7. Прибор испытанию прочности изоляции не подлежит	
8. Осторожно! Прочность изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу не соответствует нормам (знак выполняется красным цветом)	
9. Внимание! Смотри дополнительные указания в паспорте и инструкции по эксплуатации	

Дополнительные обозначения по защите от магнитных и электрических полей

1. Защита от внешних магнитных полей (I категории защищенности) А) Магнитоэлектрический прибор		
2. Защита от внешних электрических полей (I категории защищенности) Б) Электростатический прибор		

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Обозначения принципа действия прибора

1. Магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
2. Электромагнитный	
3. Электродинамический	
4. Электростатический	
5. Ферродинамический	
6. Индукционный	
7. Приборы термоэлектрической системы	
а) Термопреобразователь изолированный; б) Термопреобразователь неизолированный;	 
8. Приборы выпрямительной системы	
а) Выпрямитель полупроводниковый; б) Выпрямитель электромеханический	 

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 ИЗМЕРЯЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ.....	4
1.1 Системы единиц физических величин.....	8
2 СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ.....	10
2.1 Меры.....	11
2.2 Измерительные приборы.....	12
2.2.1 Структура измерительного прибора.....	16
2.3 Измерительные преобразователи.....	19
2.3.1 Простейшие измерительные преобразователи.....	23
2.3.2 Измерительные трансформаторы тока и напряжения.....	26
2.4 Электроизмерительные установки.....	30
2.5 Измерительные системы.....	31
3 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ.....	34
3.1 Метод непосредственной оценки.....	34
3.2 Методы сравнения с мерой.....	35
4 ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	43
4.1 Измерение тока.....	43
4.2 Измерение постоянного напряжения.....	48
4.3 Измерение мощности в цепях постоянного тока.....	51
4.4 Измерение активного сопротивления.....	53
5 ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО И ИМПУЛЬСНОГО ТОКА.....	56
5.1 Типы сигналов и их параметры.....	57
5.2 Измерение действующего значения переменного тока.....	60
5.3 Измерение действующего значения напряжения.....	62
5.4 Измерение активной мощности в однофазной цепи.....	63
5.5 Измерение частоты колебаний и периода следования импульсов.....	64
5.6 Измерение разности фаз сигналов.....	67
5.7 Измерение комплексного сопротивления участка цепи.....	68
5.8 Измерение энергии однофазного переменного тока.....	70
6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.....	73
6.1 Виды преобразователей неэлектрических величин в электрически.....	73
6.2 Измерение линейных перемещений.....	74
6.3 Измерение механических усилий, напряжений и упругих деформаций...	76
6.4 Измерение температуры различных сред.....	77

7 КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОГРЕШНОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	80
7.1. Основные источники погрешностей.....	82
7.2 Оценка конечных результатов измерений.....	83
8 ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ЕМКОСТИ ИЗОЛЯЦИИ.....	85
8.1 Контроль сопротивления изоляции.....	85
8.2 Контроль емкости изоляции.....	89
9 ОБЩИЕ ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ.....	91
9.1 Подключение измерительных приборов.....	92
9.2 Снятие показаний с приборов стрелочного типа.....	92
9.3 Особенности проведения осциллографических измерений.....	92
9.4 Практические советы по применению измерительных приборов	93
ЛИТЕРАТУРА.....	94
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	95
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	96
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	97
СОДЕРЖАНИЕ.....	98

Для заметок