

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Экспериментальная и теоретическая физика»

# **АНАЛОГОВЫЕ И ЦИФРОВЫЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

Лабораторная работа № 1

Минск  
БНТУ  
2012

УДК 621.317.755(076.5)(075.8)

ББК 31.221.я7

А64

**С о с т а в и т е л и :**

*В. В. Чёрный, Э. Н. Александрова, Д. С. Доманевский,  
В. Э. Малаховская, Ю. В. Развин*

**Р е ц е н з е н т ы :**

*К. Л. Тявловский, И. К. Султанова*

**Аналоговые** и цифровые электроизмерительные приборы: лабораторная работа № 1 / сост. В. В. Чёрный [и др.] – Минск: БНТУ, 2012. – 28 с.

Издание содержит описание (теоретическую часть, схемы измерительных приборов и задание) лабораторной работы, посвященной изучению аналоговых и цифровых электроизмерительных приборов.

Предназначено для студентов инженерных специальностей, изучающих раздел курса общей физики «Электричество и магнетизм».

УДК 621.317.755(076.5)(075.8)

ББК 31.221.я7

© Белорусский национальный  
технический университет, 2012

### ***Цели:***

1. Изучить физические принципы действия, основные характеристики и схемы включения аналоговых электроизмерительных приборов.
2. Изучить физические принципы действия и основные характеристики цифровых электроизмерительных приборов.

### ***Задачи:***

1. Определить основные характеристики аналогового и цифрового электроизмерительных приборов.
2. На основе электромеханического аналогового прибора собрать и исследовать миллиамперметр постоянного тока и вольтметр постоянного напряжения и определить их классы точности.

## **Теоретические сведения**

Наиболее распространенными видами электрических измерений являются измерения силы электрического тока и напряжения. В зависимости от вида тока, его формы, частоты применяются различные методы и приборы для измерений. Наиболее часто используются *методы непосредственной оценки и сравнения*.

При непосредственной оценке применяются электроизмерительные приборы со стрелочным или цифровым способом отсчета. Метод сравнения реализуется в различных компенсационных устройствах. Принцип его состоит в том, что неизвестное напряжение уравнивается (компенсируется) известным. Данный метод обладает более высокой точностью.

*Измерительным прибором* называется средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного наблюдения.

*Приборы* делятся на *аналоговые (стрелочные)* и *цифровые*. В аналоговом измерительном приборе показания являются

непрерывной функцией изменений измеряемой величины. Различают электромеханические и электронные аналоговые приборы. Цифровой измерительный прибор автоматически вырабатывает дискретные сигналы измерительной информации в цифровой форме.

При изучении электрических и магнитных явлений наиболее часто приходится измерять значения таких физических величин, как сила тока и напряжение. Приборы, предназначенные для этих измерений, называются соответственно *амперметрами* и *вольтметрами*.

### **Основные характеристики электроизмерительных приборов**

Электроизмерительные приборы характеризуются целым рядом свойств и величин.

Назначение прибора позволяет определить, какие величины могут быть измерены с его помощью. Приборы, позволяющие выполнять измерения различных физических величин, называются *универсальными*.

Система прибора указывает, какие физические принципы положены в основу его работы.

*Предел измерений*  $x_{пр}$  – это значение измеряемой величины, при котором указатель отсчетного устройства перемещается до конца шкалы. Электроизмерительные приборы, как правило, имеют несколько пределов измерений, которые указываются на корпусе или на шкале прибора. В таком случае приборы называются *многопредельными*.

Важнейшей характеристикой аналогового электроизмерительного прибора является чувствительность  $S$  – отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора  $d\alpha$  к вызывающему его изменению измеряемой величины  $dx$ :

$$S = \frac{d\alpha}{dx}.$$

Величина, обратная чувствительности,  $c = 1/S$ , называется *ценой деления* и определяется как число единиц измеряемой величины, приходящихся на одно деление шкалы.

Иногда удобно характеризовать прибор *порогом чувствительности*, под которым понимают изменение измеряемой величины, вызывающее наименьшее изменение показания прибора, различимое без дополнительных устройств.

Одним из важнейших вопросов в данной области является оценка абсолютной погрешности измерений, выполненных с помощью электроизмерительных приборов. Характеристикой, позволяющей осуществить такую оценку, является обобщенная характеристика точности прибора – класс точности. *Классом точности*  $\gamma$  называется безразмерная величина, численно равная наибольшей допустимой приведенной (относительной) основной погрешности измерительного прибора, выраженной в процентах, т. е.

$$\gamma = \frac{\Delta \tilde{\delta}}{\tilde{\delta}_N} \cdot 100 \% ,$$

где  $\Delta x$  – максимальная абсолютная основная погрешность электроизмерительного прибора, допускаемая на используемом пределе измерений, при обеспечении требуемых условий измерения;

$x_N$  – нормирующее значение величины.

Символ % в классе точности не указывают.

Для приборов с равномерной шкалой, у которых нулевая отметка находится на краю шкалы, нормирующее значение измеряемой величины принимается равным предельному, т.е.  $x_N = x_{пр}$ . В таком случае

$$\gamma = \frac{\Delta \tilde{\delta}}{\tilde{\delta}_1} \cdot 100 \% .$$

На электромеханические амперметры и вольтметры ГОСТ устанавливает следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4; 5. Класс точности обычно указывается на шкале прибора или в его паспорте. По известному классу можно определить максимальную абсолютную погрешность

$$\Delta \tilde{\sigma} = \frac{\gamma}{100} \tilde{\sigma}_i \tilde{\sigma}.$$

Для цифровых приборов класс точности определяется иначе (см. ниже).

Для характеристики приборов используется еще целый ряд величин – входное сопротивление, выходное сопротивление, потребляемая мощность, стабильность, надежность, быстродействие и т. д.

### **Аналоговые электромеханические электроизмерительные приборы**

В электромеханических измерительных приборах измеряемая электрическая величина  $x$  непосредственно преобразуется в показание отсчетного устройства. Прибор состоит из измерительного механизма и отсчетного устройства, предназначенного для наблюдения и отсчета значений измеряемой величины. Оно включает в себя шкалу и указатель (стрелку), расположенные на лицевой стороне прибора. Измерительный механизм является его основным элементом и служит для преобразования электрической энергии в механическую энергию перемещения подвижной части прибора. Чаще всего происходит поворот (вращение). Таким путем измеряемая электрическая величина преобразуется в силу, создающую вращающий момент  $M_{вр}$ . Чтобы каждому значению измеряемой величины соответствовал определенный угол поворота подвижной части измерительного механизма, необходимо вра-

щающий момент уравновесить противодействующим моментом  $M_{пр}$ , зависящим от угла поворота  $\alpha$ . В этом случае

$$M_{пр} = W\alpha,$$

где  $W$  – удельный противодействующий момент, зависящий только от упругих свойств используемых пружин или растяжек.

Зависимость  $\alpha = f(x)$  между углом поворота подвижной части измерительного механизма  $\alpha$  и измеряемой физической величиной  $x$  называется *основным уравнением электроизмерительного прибора* или *уравнением шкалы прибора*.

В зависимости от способа создания вращающего момента различают следующие системы аналоговых электромеханических приборов: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, электростатическую.

### ***Приборы магнитоэлектрической системы***

Принцип действия приборов с измерительным механизмом магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии магнитных полей постоянного магнита и подвижной катушки, по виткам которой проходит измеряемый электрический ток. Магнит имеет подковообразную форму и оканчивается полюсными наконечниками круглой формы (рис. 1).

Магнит и наконечники могут быть монолитными или составными. Между наконечниками помещается цилиндрический сердечник из магнитно-мягкого ферромагнетика. Он отделен от наконечников с двух сторон равномерными кольцевыми воздушными зазорами толщиной примерно 2 мм. Малая толщина зазоров позволяет получить в них достаточно сильное магнитное поле, индукция которого  $B = 0,2-0,4$  Тл при поле в магните порядка 1 Тл. Благодаря такому строению магнитной цепи модуль вектора индукции одинаков во всех точках внутри зазора, а сам вектор направлен по радиусу (постоянное по модулю радиальное магнитное поле, см. рис. 1).

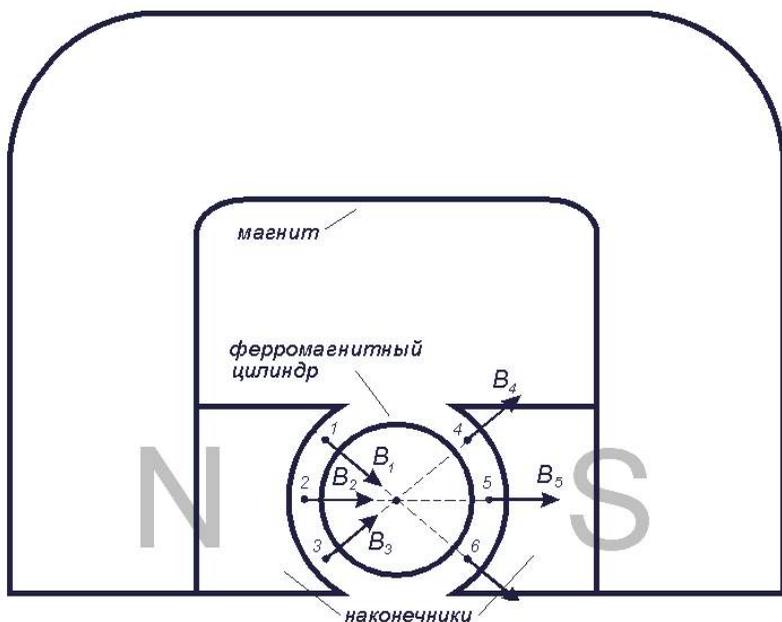


Рис. 1. Схема магнитной цепи

Катушка наматывается изолированной медной проволокой малого диаметра (0,03–0,2 мм) на алюминиевой рамке прямоугольной формы и помещается в кольцевой зазор между наконечниками и цилиндром 4 (рис. 2). К рамке с двух сторон приклеивают алюминиевые буксы, в которых закрепляются две полуоси 5. К одной из них крепится стрелочный указатель 6, перемещающийся над шкалой 7 при повороте рамки. Две спиральные пружины 8 создают противодействующий момент за счет деформации изгиба и одновременно используются для подвода измеряемого тока. Одна из них закреплена между полуосью и корпусом, вторая одним концом прикреплена к полуоси, а другим – к рычагу корректора, который позволяет регулировать положение нуля прибора. С другой стороны обе полуоси заканчиваются заостренным стальным стержнем (керном), который опирается на подпятник из твер-

дых материалов. Подпятник закреплен в металлической оправе, прикрепленной к корпусу. В высокоточных измерительных механизмах рамка крепится на растяжках (двух тонких нитях).

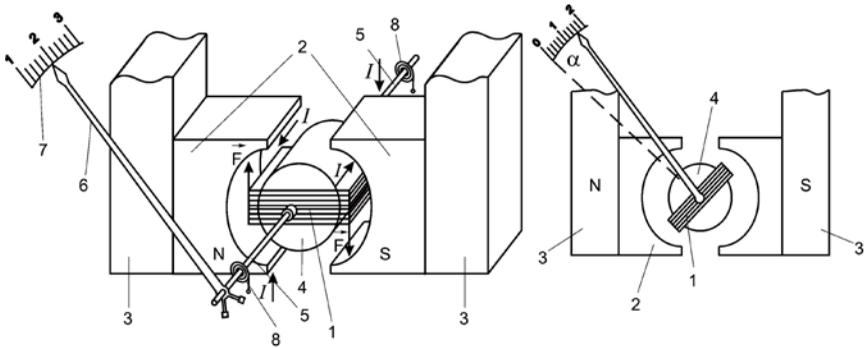


Рис. 2. Прибор магнитоэлектрической системы

При прохождении тока на два участка витка, параллельные оси цилиндра, действуют силы Ампера, направленные противоположно друг другу и перпендикулярно плоскости рамки. Они образуют пару сил.

Величина силы Ампера, действующей на один такой участок витка:

$$F = BIl \sin\beta,$$

где  $B$  – модуль вектора индукции магнитного поля в зазоре;

$I$  – сила тока, протекающего по рамке;

$l$  – длина участка катушки, параллельного оси, т. е. длина рамки;

$\beta$  – угол между данным участком рамки и вектором индукции магнитного поля в зазоре.

Величина силы Ампера не зависит от угла поворота по двум причинам. Во-первых, вектор индукции магнитного поля в зазоре направлен по радиусу и перпендикулярен направлению токов ( $\beta = \text{const} = 90^\circ$ ) на указанных участках катушки при любых углах поворота рамки  $\alpha$  относительно ее оси. Во-

вторых, как уже отмечалось, модуль вектора индукции в зазоре остается постоянным.

Момент данной пары сил от всех витков равен

$$M_{\text{вр}} = NFb,$$

где  $N$  – число витков катушки;

$b$  – ширина рамки.

Эту формулу можно переписать следующим образом:

$$M_{\text{вр}} = BISN, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь рамки ( $S = bl$ ).

Противодействующий момент упругих сил, создаваемых спиральными пружинами:

$$M_{\text{пр}} = W\alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол поворота подвижной катушки;

$W$  – удельный противодействующий момент пружин.

Под действием момента сил, определяемого (1), рамка будет поворачиваться относительно оси. Она остановится, когда модули двух указанных моментов будут равны. Приравняв выражения (1) и (2), получим выражение для угла отклонения рамки (стрелки):

$$\alpha = \frac{BSN}{W} I = S_I I, \quad (3)$$

где  $S_I = \frac{BSN}{W}$  – чувствительность прибора по току.

Из (3) следует, что угол отклонения указателя прямо пропорционален измеряемому току, т. е. шкала прибора линейна (равномерна). При включении следует соблюдать полярность,

так как при изменении направления тока в катушке направление вращения подвижной части изменяется на противоположное. Полярность указывается на выводах рамки.

Приборы магнитоэлектрической системы применяются в цепях постоянного тока. При включении в цепь переменного тока при частоте ниже 10 Гц указатель будет совершать колебательные движения относительно нулевой отметки, а при более высоких частотах вследствие инерционности подвижной части указатель вообще будет оставаться на нулевой отметке. Для измерений в цепях переменного тока к магнитоэлектрическим приборам присоединяют выпрямители.

Если в (3) силу тока выразить через напряжение, используя закон Ома, то получим

$$\alpha = \frac{BSN}{W} \frac{U}{r} = S_U U,$$

где  $r$  – сопротивление катушки;

$U$  – напряжение на катушке;

$S_U = \frac{BSN}{Wr}$  – чувствительность по напряжению.

Таким образом, приборы магнитоэлектрической системы могут применяться в качестве измерителей как тока (амперметры (А) и гальванометры (G)), так и напряжения (вольтметры (V)). *Гальванометр* – высокочувствительный прибор, предназначенный для измерения малых токов и напряжений, а также количества электричества. Гальванометры часто используются в качестве нулевых индикаторов, показывающих отсутствие тока в цепи.

Достоинства магнитоэлектрических приборов: высокая чувствительность (до  $3 \cdot 10^{-11}$  А), высокая точность (до класса 0,2), малая потребляемая мощность от измеряемой цепи ( $\approx 10^{-9}$  Вт).

Недостатки: чувствительность к перегрузкам, сложность изготовления и ремонта, относительно высокая стоимость.

## Приборы электромагнитной системы

Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля неподвижной катушки, по которой протекает измеряемый ток, и подвижного сердечника из магнито-мягкого ферромагнитного материала, эксцентрично расположенного на оси и соединенного с указательной стрелкой. Намагничиваясь под действием магнитного поля катушки, стержень втягивается в нее и поворачивает стрелку (рис. 3), подобно тому, как притягивается к магниту первоначально ненамагниченный железный предмет.

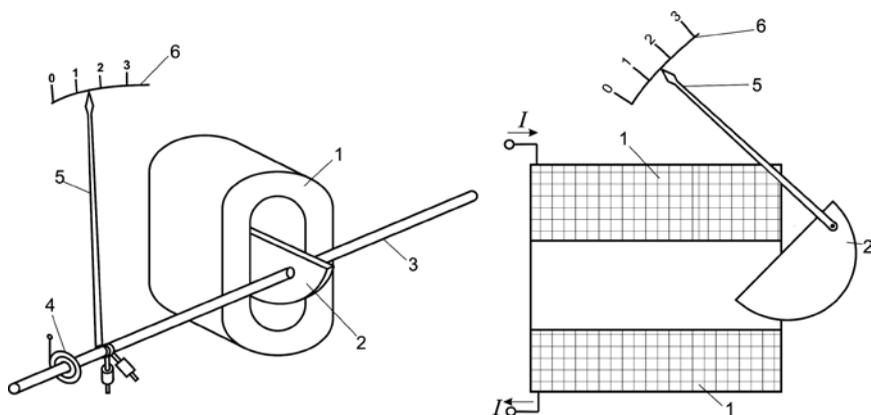


Рис. 3. Устройство приборов электромагнитной системы:  
1 – катушка; 2 – сердечник; 3 – ось; 4 – спиральная пружина;  
5 – стрелка; 6 – шкала

В приборах такого типа  $\alpha = kI^2$ , т. е. шкала прибора нелинейна, зато прибор может использоваться для измерения как постоянного, так и переменного тока. При изменении направления тока изменяется на противоположное и направление магнитного поля в сердечнике, и он снова втягивается в катушку. Кроме того, приборам характерна простота конструкции, низкая стоимость, высокая надежность.

К электромеханическим измерительным приборам относятся также электростатические и термоэлектрические приборы. Первые из них предназначены для измерений напряжения до 1 МВ в цепях постоянного тока и переменного тока частотой до 30 МГц, вторые – только в цепях переменного тока.

### ***Выпрямительные приборы***

Как отмечалось выше, магнитоэлектрические приборы пригодны только для измерений в цепях постоянного тока. Возможность измерений в цепях переменного тока такими приборами достигается путем преобразования переменного тока в пульсирующий (направление тока постоянно, а величина изменяется). Это достигается с помощью выпрямителей на основе полупроводниковых диодов. В схеме однополупериодного выпрямителя (рис. 4, а–в) через измерительный механизм проходит только положительная полуволна, что определяется включением полупроводникового диода в соответствующей полярности. В двухполупериодной схеме выпрямителя (рис. 4, г–е) ток проходит через измерительный механизм в обе половины периода.

Выпрямительные приборы измеряют некоторое усредненное значение силы тока или напряжения. При использовании выпрямителей величина измеренной постоянной силы тока (или напряжения), называемой *средневыпрямленной*, определяется формулой

$$I_c = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt.$$

Для синусоидального тока

$$I_c = 0,637I_m,$$

где  $I_m$  – амплитудное значение тока.

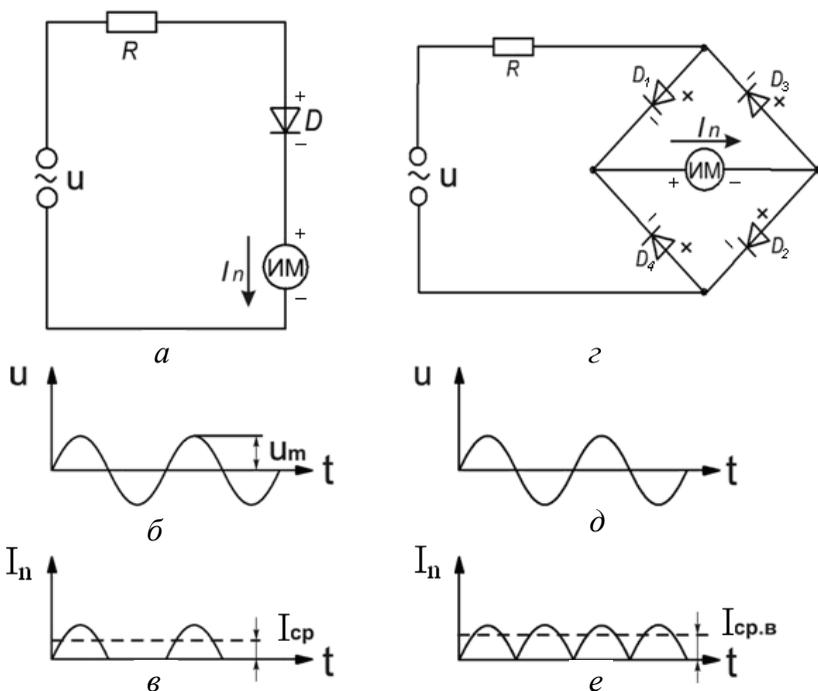


Рис. 4. Выпрямитель переменного тока:  
*a, б, в* – однополупериодная схема; *z, д, е* – двухполупериодная схема

На практике используют среднеквадратичное значение тока или напряжения, называемое *действующим* или *эффективным*:

$$I_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt}.$$

*Действующим* называют такой постоянный ток (напряжение), который выделяет такую же тепловую мощность на активном сопротивлении, что и переменный. Величины  $I_{\text{д}}$  и  $I_{\text{с}}$  связаны соотношением:

$$I_{\text{д}} \cong 1,11 \cdot I_{\text{с}}.$$

Шкала выпрямительных приборов нелинейна.

## Аналоговые электронные электроизмерительные приборы

Магнитоэлектрические приборы являются наиболее чувствительными среди электромеханических. Однако при измерении очень слабых токов или напряжений их чувствительность уже недостаточна.

Более высокая чувствительность достигается в аналоговых электронных электроизмерительных приборах. В них измеряемый сигнал вначале усиливается, а затем подается на магнитоэлектрический прибор. Применение электронных устройств позволяет создать аналоговые электронные приборы с высокой чувствительностью, пригодные для измерений как в высокоомных, так и в низкоомных цепях и цепях постоянного и переменного тока.

Аналоговые электронные вольтметры делятся на вольтметры постоянного и переменного напряжения и универсальные. Существуют также импульсные и селективные вольтметры. На рис. 5 приведены упрощенные структурные схемы электронных вольтметров постоянного и переменного напряжений.

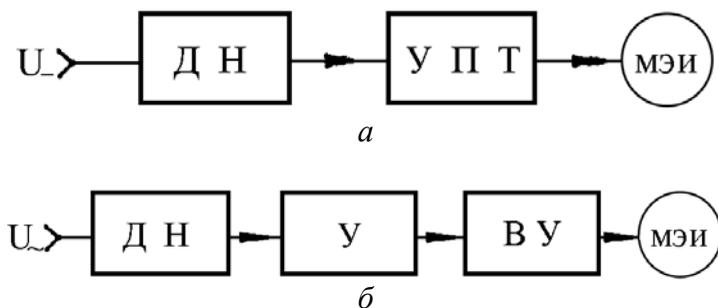


Рис. 5. Структурная схема аналоговых электронных измерительных приборов:  
*a* – постоянного тока; *б* – переменного тока

В электронном вольтметре постоянного напряжения (рис. 5, *a*) измеряемое напряжение подается на делитель напряжения (ДН),

позволяющий установить требуемый предел измерений, а затем усиливается электронным усилителем постоянного тока (УПТ) до величины, достаточной для работы измерительного механизма магнитоэлектрического индикатора (МЭИ).

В случае вольтметра переменного напряжения (рис. 5, б) измеряемое переменное напряжение после ДН усиливается электронным усилителем (У) и затем с помощью выпрямительного устройства (ВУ) преобразуется в постоянное, которое и поступает на МЭИ.

### **Цифровые электронные электроизмерительные приборы**

*Цифровыми* называются измерительные приборы, автоматически вырабатывающие дискретные сигналы измерительной информации и представляющие показания в цифровой форме.

Такие приборы имеют ряд преимуществ перед аналоговыми: удобство отсчитывания значений измеряемой величины, исключение субъективных погрешностей, вносимых при отсчете, возможность полной автоматизации процесса измерений, регистрация результатов с помощью цифропечатающих устройств, возможность вводить измерительную информацию в компьютер.

Существует несколько методов построения цифровых приборов. Остановимся на одном из них – временимпульсном, основанном на преобразовании измеряемой величины во временной интервал. Структурная схема приведена на рис. 6.

С помощью специальных устройств в приборах такого типа формируется промежуток времени, длительность которого  $\Delta t$  с высокой степенью точности прямо пропорционален измеряемому напряжению  $U_x$ . Для получения численного значения измеряемого напряжения подсчитывается число  $N$  коротких импульсов, поступивших на ЭС за время  $\Delta t$ . Импульсы вырабатываются специальным ГСЧИ. Период следования счетных

импульсов стабилизирован с высокой степенью точности. Формирование интервала  $\Delta t$  осуществляется с помощью вспомогательного линейно изменяющегося во времени напряжения  $U_{\text{Л}}$ , формируемого ГЛН.

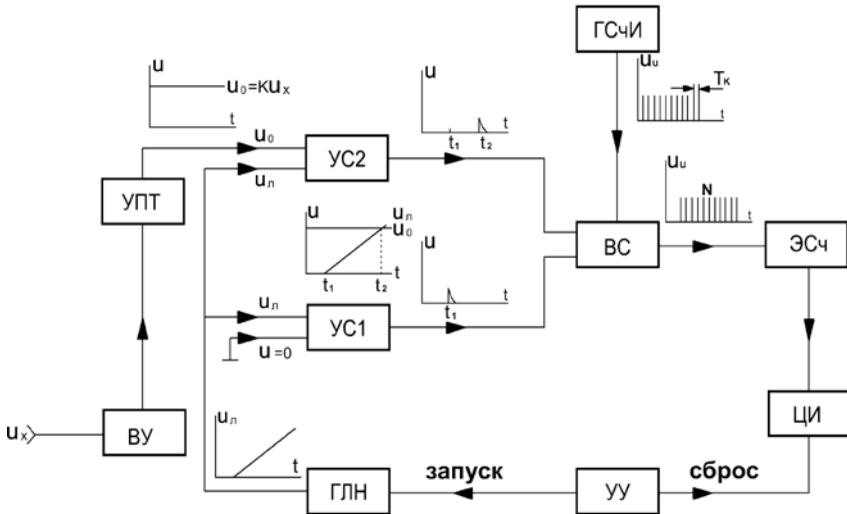


Рис. 6. Функциональная схема цифрового вольтметра:

ВУ – входное устройство; УПТ – усилитель постоянного тока; ГЛН – генератор линейно нарастающего напряжения; УС1, УС2 – устройства сравнения; ВС – временной селектор; ГСЧИ – генератор счетных импульсов; ЭС – электронный счетчик; ЦИ – цифровой индикатор; УУ – устройство управления

Измеряемое напряжение поступает вначале на ВУ, затем на УПТ и далее на УС2. Входное устройство обеспечивает высокое входное сопротивление. С его помощью также производится деление измеряемого напряжения до необходимого уровня, а при измерении переменного напряжения преобразование его в постоянное.

Измерение осуществляется циклами, длительность которых устанавливается УУ. В начале каждого цикла (в момент  $t_1$ ) с помощью управляющего устройства происходит сброс на нуль показания ЭС.

Одновременно со сбросом запускается ГЛН – генератор, формирующий линейно изменяющееся во времени напряжение  $U_{\text{л}}$ . Оно поступает на входы УС1 и УС2. Устройство сравнения представляет собой электронный блок с двумя входами и одним выходом. Он формирует на своем выходе импульс, если напряжения на обоих его входах равны. Один из входов УС1 соединен с нулевым проводом. Поэтому УС1 выдает импульс в момент  $t_1$ , когда  $U_{\text{л}} = 0$ . Этот импульс открывает ВС, который начинает пропускать на вход ЭС короткие счетные импульсы с периодом  $T_k$ . Данные импульсы поступают от ГСЧИ и имеют, как отмечалось, высокую точность периода следования. Напряжение ГЛН изменяется со временем по закону:

$$U_{\text{л}} = c (t - t_1),$$

где  $c$  – постоянный коэффициент, имеющий размерность напряжение / время.

В момент  $t_2$  напряжение  $U_{\text{л}}$  становится равным преобразованному измеряемому напряжению, т. е.

$$kU_x = c (t_2 - t_1), \quad (4)$$

где  $k$  – безразмерный коэффициент, соответствующий данному пределу измерения .

При этом УС2 вырабатывает импульс, закрывающий ВС, и счетные импульсы перестают поступать на вход ЭС. За время  $\Delta t = t_2 - t_1$  на вход счетчика проходит число импульсов

$$N = \frac{t_2 - t_1}{T_k}.$$

Величины  $U_x$  и  $N$  связаны следующим соотношением:

$$U_x = \frac{U_{\text{э2}}}{k} = \frac{\tilde{n}\Delta t}{k} = \frac{cT_k N}{k} = k_1 N. \quad (5)$$

Параметры  $c$ ,  $k$  и  $T_k$  подбираются такими, чтобы коэффициент  $k_1$  имел вид

$$k_1 = 10^n,$$

где  $n = 0, \pm 1, \pm 2$  и т. д.

В этом случае выполняется равенство:

$$U_x = 10^n \cdot N.$$

Таким образом, число импульсов  $N$ , прошедших на вход счетчика и зафиксированных ЦИ, оказывается равным численному значению измеряемого напряжения в соответствующих единицах измерения. Показания индикатора сохраняются до момента окончания следующего цикла, когда они заменяются числом импульсов, прошедших на счетчик в этом цикле.

Цифровые вольтметры позволяют измерять также постоянные токи и сопротивления, так как эти величины могут быть легко преобразованы в соответствующее измеряемой величине напряжение. Также цифровые вольтметры называются уни-версальными.

Точность цифрового вольтметра определяется пределом допускаемой основной относительной погрешности  $\varepsilon$ , выраженной *в процентах от показания прибора*. Данная погрешность определяется двучленной формулой

$$\varepsilon = \pm [c + d(|U_k/U| - 1)], \quad (6)$$

где  $c$  и  $d$  – постоянные числа, характеризующие класс точности конкретного цифрового вольтметра;

$U$  – показание прибора;

$U_k$  – конечное значение диапазона измерений (предел измерений).

Аналогичная формула справедлива и при измерении токов и сопротивлений. Таким образом, относительная погрешность

(а соответственно, и абсолютная погрешность) цифровых приборов не остается постоянной для данного предела измерений, а монотонно уменьшается по мере роста измеряемой величины.

Чтобы получить значение относительной погрешности, необходимо величину, определенную по формуле (6), разделить на 100.

Класс точности приборов, для которых пределы допускаемой основной относительной погрешности определяются двучленной формулой, обозначают в виде отношения  $c/d$ , где числа  $c$  и  $d$  берутся в процентах. Таким образом, для прибора, у которого

$$\varepsilon = [0,02 + 0,01(|U_k/U| - 1)], \%$$

или

$$\varepsilon = [0,0002 + 0,0001(|U_k/U| - 1)],$$

класс точности будет 0,02/0,01.

Точность цифровых приборов определяется разностью левой и правой частей равенств (4, 5), выраженной в процентах. Данные величины по определенным причинам несколько отличаются одна от другой. Однако даже для самых простых цифровых приборов данная разность оказывается ниже, чем класс точности аналоговых. Цифровые приборы являются более точными, что обеспечивается прежде всего высокой стабильностью генератора счетных импульсов, высокой точностью линейно изменяющегося напряжения и высоким быстродействием схем сравнения.

## **Измерение силы тока и напряжения**

Наиболее распространенными видами электрических измерений являются измерения силы тока и напряжения.

В зависимости от вида тока (напряжения), его величины, частоты, формы, требуемой точности измерения, сопротивле-

ния цепи, в которой производится измерение, используются различные типы приборов.

При измерении силы тока на участке цепи сопротивлением  $R$  последовательно с  $R$  в разрыв цепи включается *амперметр* (рис. 7, *а*). Тогда сила тока, текущего через измерительный прибор и участок с сопротивлением  $R$ , будет одинаковой.

*Вольтметр* подсоединяется параллельно участку цепи с сопротивлением  $R$ , напряжение на котором измеряется (рис. 7, *б*). При параллельном подключении напряжение на измерительном приборе и участке цепи  $R$  одинаково. Подключение в электрическую цепь измерительного прибора оказывает влияние на режим работы этой цепи, что приводит к ошибкам в измерениях.

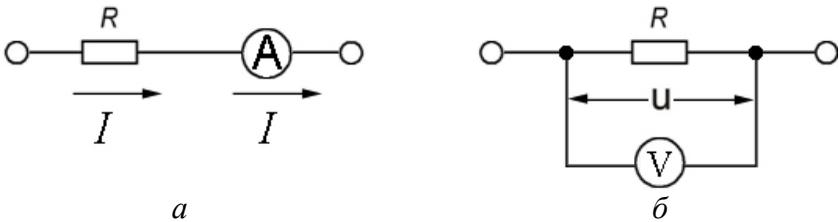


Рис. 7. Подключение амперметра (*а*) и вольтметра (*б*)

Последовательное подключение амперметра с сопротивлением  $r_a$  увеличивает общее сопротивление участка цепи до значения  $R + r_a$ , что больше  $R$ . В результате ток уменьшится. Чтобы изменение тока было незначительным, необходимо выполнение условия:

$$r_a \ll R.$$

При параллельном подключении вольтметра с сопротивлением  $r_v$  общее сопротивление

$$R_0 = \frac{Rr_v}{R + r_v},$$

что меньше  $R$ .

Измеренное напряжение будет заниженным. Чтобы вольтметр не вносил больших искажений в режим работы цепи, должно выполняться условие:

$$r_v \gg R.$$

### Шунты к амперметру

Ток, вызывающий отклонение подвижной части прибора на всю шкалу, называется *током полного отклонения*  $I_0$ . Если с помощью амперметра необходимо измерить силу тока  $I$  больше, чем  $I_0$ , к нему параллельно подключается дополнительное сопротивление  $R_{ш}$ , называемое шунтом (рис. 8).

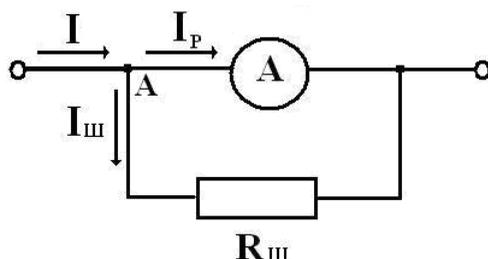


Рис. 8. Подключение шунта к амперметру

Измеряемый ток разветвляется и только часть его проходит через измерительный прибор. Так достигается расширение предела измерений амперметра. По первому правилу Кирхгофа величины токов связаны соотношением:

$$I = I_p + I_{\phi} , \quad (7)$$

где  $I$  – сила измеряемого тока;

$I_p$  – сила тока, текущего через измерительный механизм (рамку) прибора;

$I_{ш}$  – сила тока, текущего через шунт.

По второму правилу Кирхгофа имеем

$$I_{\phi} R_{\phi} = I_{\delta} r, \quad (8)$$

где  $r$  – сопротивление рамки амперметра;

$R_{\text{ш}}$  – сопротивление шунта.

Из (8) и (7) следует, что

$$R_{\phi} = \frac{I_{\delta} r}{I_{\phi}} = \frac{I_{\delta} r}{I - I_{\delta}}. \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет определить  $R_{\text{ш}}$ , при котором отклонение стрелки измерительного прибора на всю шкалу будет соответствовать требуемому пределу измерения силы тока  $I_{\text{пр}}$ . Иначе говоря, при  $I = I_{\text{пр}}$  ток через амперметр  $I_{\text{р}}$  будет равен току полного отклонения:  $I_{\text{р}} = I_0$ . В таком случае выражение (9) принимает вид

$$R_{\phi} = \frac{I_0 r}{I_{\phi}} = \frac{I_0 r}{I_{\text{и}\delta} - I_0} = \frac{r}{\frac{I_{\text{и}\delta}}{I_0} - 1}. \quad (10)$$

На практике используют коэффициент шунтирования (или коэффициент растяжения предела измерений)  $n$  для данного значения  $I_{\text{пр}}$ , который равен

$$n = \frac{I_{\text{и}\delta}}{I_0}. \quad (11)$$

Тогда выражение (10) принимает вид

$$R_{\phi} = \frac{r}{n - 1}. \quad (12)$$

С данным шунтом цена деления амперметра также возрастет в  $n$  раз.

## Добавочные сопротивления к вольтметру

Предел измерения вольтметра зависит от силы тока полного отклонения подвижной части прибора  $I_0$  и его внутреннего сопротивления  $r$ . Для расширения пределов измерения вольтметра последовательно с измерительным механизмом прибора подключают добавочное сопротивление  $R_{\text{д}}$  (рис. 9).

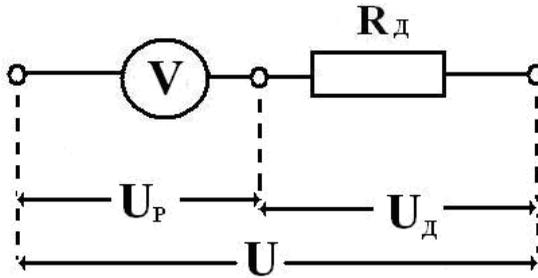


Рис. 9. Подключение добавочного сопротивления к вольтметру.

Напряжение на измерительном механизме  $U_{\text{п}}$  меньше измеряемого напряжения  $U$  и связано с ним соотношением:

$$U = U_{\text{п}} + U_{\text{д}},$$

где  $U_{\text{д}}$  – напряжение на добавочном сопротивлении  $R_{\text{д}}$ .

По такой цепи течет ток

$$I = \frac{U}{r + R_{\text{д}}}.$$

Из последней формулы следует, что

$$R_{\text{д}} = \frac{U}{I} - r. \quad (13)$$

Из (13) можно определить величину  $R_{\dot{a}}$ , при котором отклонение стрелки на всю шкалу ( $I = I_0$ ) будет соответствовать требуемому пределу измерения напряжения  $U = U_{\text{пр}}$ :

$$R_{\dot{a}} = \frac{U_{\dot{a}} \delta}{I_0} - r. \quad (14)$$

Набор добавочных сопротивлений позволяет создать многопредельный вольтметр. Применяются также и наружные по отношению к прибору добавочные сопротивления.

### Задание

1. Определить основные характеристики аналогового прибора.
2. Определить характеристики цифрового вольтметра.
3. По формулам (11) и (12) определить коэффициент шунтирования  $n$  и сопротивление шунта  $R_{\text{ш}}$  для создания на основе стрелочного прибора амперметра с пределом измерения  $I_{\text{пр}} = 1,5$  мА. Исследовать данный амперметр.
4. По формуле (14) определить величину добавочного сопротивления  $R_{\dot{a}}$  для создания вольтметра постоянного тока с пределом измерения  $U_{\text{пр}} = 5$  В. Исследовать данный вольтметр.

### Контрольные вопросы

1. Что такое аналоговые и цифровые приборы?
2. Приведите основные характеристики электроизмерительных приборов.
3. Принцип действия и устройство электромеханических измерительных приборов.
4. Структурные схемы аналоговых электронных вольтметров постоянного и переменного тока.

5. Каков принцип действия и устройство цифрового вольтметра с времяимпульсным преобразованием?

6. Как расширить пределы измерения амперметра и вольтметра? Получите формулы для сопротивления шунта и добавочного сопротивления.

7. Как расширить предел измерения вольтметра? Получите формулу для добавочного сопротивления.

## Литература

1. Хромой, Б. П. Электрорадиоизмерения / Б. П. Хромой, Ю. П. Моисеев. – М. : Радио и связь, 1985. – С. 30–70.
2. Детлаф, А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Высшая школа, 2001. – С. 293–296.
3. Мирский, Г. Я. Электронные измерения / Г. Я. Мирский. – М. : Радио и связь, 1986. – С. 152–207.
4. Мейзда, Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений / Ф. Мейзда. – М. : Мир, 1990. – С. 112–146.

Учебное издание

**АНАЛОГОВЫЕ И ЦИФРОВЫЕ  
ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

Лабораторная работа № 1

Составители:

**ЧЁРНЫЙ** Владимир Владимирович  
**АЛЕКСАНДРОВА** Эмилия Николаевна  
**ДОМАНЕВСКИЙ** Дмитрий Сергеевич и др.

Редактор *Т. В. Купель*

Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 16.04.2012. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,27. Тираж 100. Заказ 397.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.