

характеристику лампочки в диапазоне напряжений от 10 В до 250 В.

Получить около 20 точек и записать их в виде:

Таблица 3.2: Переменный ток, диапазон 10-250 В.

Выходное напряжение, мВ	Сила тока, мА
U	I

Обработка результатов упражнения 3.

- Построить вольтамперную характеристику лампочки в логарифмическом масштабе, используя результаты измерений из таблиц 2, 3.1 и 3.2. Убедитесь, что все три кривые плавно переходят одна в другую. Нанесите на график также прямую, соответствующую закону Ома для сопротивления холодной лампочки.

- Дополнить таблицы 2, 3.1 и 3.2 столбцами с сопротивлением лампочки, рассчитанным приближенно как $R_B = U/I$, и мощностью $P = U \cdot I$, выделяемой лампочкой. Построить в логарифмическом масштабе зависимость $R(P)$.

- Предложите объяснение полученным графикам.

Результаты, полученные во всех упражнениях, должны быть дополнены анализом ошибок измерений.

Литература

1. *Соболев Д.А. Введение в технику физического эксперимента. Учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1993. — 175 с.*
2. *Измерение активных сопротивлений. Лабораторная работа №1. Введение в технику эксперимента. Кафедра общей физики Физического факультета МГУ. 16 с.*
3. *Измерение силы тока и напряжения в цепях постоянного тока. Лабораторная работа №2. Введение в технику эксперимента. Кафедра общей физики Физического факультета МГУ. 10 с.*
4. *Мирский Г.Я. Электронные измерения: 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1986. — 440 с,*



Филиал Московского
государственного
университета имени
М.В. Ломоносова
в г. Севастополе

Кафедра физики и геофизики

Лабораторный практикум по общей физике
Введение в технику эксперимента

Лабораторная работа

**МУЛЬТИМЕТРЫ, ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ ТОКА,
НАПРЯЖЕНИЯ И АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ**

СЕВАСТОПОЛЬ • 2009

Описание лабораторной работы подготовлено В.А. Дуловым на основе литературных источников, перечисленных в конце пособия.

Цель работы – ознакомить студентов с техникой измерений силы тока, напряжения и активного сопротивления в цепях постоянного и переменного тока с помощью широко распространенных в лабораторной практике комбинированных цифровых приборов - мультиметров. В пособии изложены вводные понятия об электроизмерениях и принципы работы цифрового вольтметра.

Пособие предназначено для студентов первого и второго курсов специальности Физика. Лабораторная работа может быть проведена как в разделе «Введение в технику физического эксперимента», так и в разделе «Электромагнетизм» общего физического практикума».

Построить на одном графике зависимости $I(U)$, следующие из таблиц 1.2 и 2, а также нанести на график теоретическую зависимость, следующую из закона Ома для сопротивления R_B . **Объяснить** полученный результат, пользуясь понятием шунта. **Оценить** сопротивления амперметра для обоих диапазонов, исходя из схемы на рис. 5. Сопротивление участка цепи «лампочка + амперметр» определите из полученных данных методом наименьших квадратов согласно закону Ома.

Упражнение 3. Работа с переменным током. Вольтамперная характеристика.

Если элемент электрической цепи подчиняется закону Ома $U=R*I$, то он называется линейным и характеризуется единственным параметром – сопротивлением R . В противоположном случае, когда элемент нелинейный, для описания его работы в электрических цепях нужно знать вольтамперную характеристику. Вольтамперной характеристикой элемента называется зависимость тока через него от приложенного напряжения $I(U)$.

3.1 Подключить коммутационную колодку к ЛАТРу через понижающий трансформатор. Подключение мультиметров к колодке то же, что и в упражнении 2. Диапазон измерений амперметра - 200 мА для переменного тока. Снять вольтамперную характеристику лампочки в диапазоне напряжений от 2-3 В до 16 В. Получить около 10 точек и записать их в виде:

Таблица 3.1: Переменный ток, диапазон 2-16 В.

Выходное напряжение, mV	Сила тока, mA
U	I

3.2 Подключить коммутационную колодку непосредственно к ЛАТРу, не изменяя подключения мультиметров. Диапазон измерений амперметра - 200 мА для переменного тока. Снять вольтамперную

потенциометра примерно на одно деление во всем допустимом диапазоне. Записать результаты в виде:

Таблица 1.1 Изучение потенциометра

Деления на шкале винта потенциометра	Выходное напряжение, mV
N	U

1.2 Выполнить те же измерения, подключив к источнику питания коммутационную колодку с подсоединенными согласно рис.5 измерительными приборами. Диапазон измерений тока - 200 мА. В окрестности резких изменений U винт нужно поворачивать на 0.3-0.5 деления. Записать результаты в виде:

Таблица 1.2: Потенциометр под нагрузкой (диапазон 200 мА)

Деления на шкале винта потенциометра	Выходное напряжение, mV	Сила тока, mA
N	U	I

Результаты представить в виде зависимостей $U(N)$, построенных на одном графике. **Объяснить** полученные кривые, полагая, что сопротивление холодной лампочки равно примерно 100 Ом. **Нанести** на тот же график теоретическую зависимость для потенциометра под нагрузкой.

Упражнение 2. Изучение шунта.

2.1 Отключив источник питания, измерить сопротивление холодной лампочки R_B и записать результат.

2.2 Повторить измерения пункта 1.2, выставив диапазон измерений тока 2 мА. Записать результаты в виде:

Таблица 2: Потенциометр под нагрузкой (диапазон 2 мА)

Выходное напряжение, mV	Сила тока, mA
U	I

Общие сведения

Измерение силы тока. Для измерения силы тока применяют приборы, называемые амперметрами. Амперметры включают последовательно в разрыв цепи в том ее участке, где необходимо определить силу тока (*рис.1*).

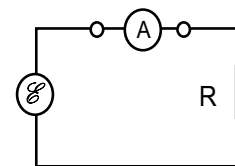


Рис. 1. Включение амперметра в исследуемую цепь: \mathcal{E} - ЭДС, действующая в цепи, R - сопротивление цепи

Очевидно, что чем меньше внутреннее сопротивление амперметра, тем меньше изменение величины силы тока в цепи вызовет его включение, а следовательно, тем точнее будет определено истинное значение. Поэтому подобные измерения имеют смысл лишь, когда выполняется условие

$$r_A \ll R$$

где r_A – внутреннее сопротивление прибора. Для расширения пределов измерений параллельно амперметру подключают резисторы, сопротивление которых меньше внутреннего сопротивления прибора. Их называют шунтами. Сопротивление шунта определяется из соотношения

$$r_{ш} = \frac{r_A}{n - 1}$$

где n - число, показывающее во сколько раз увеличен предел измерения, $r_{ш}$ - величина сопротивления шунта. Иными словами, чтобы измерить силу тока, которая на порядок превышает величину, допустимую для данного прибора, нужно «зашунтировать» его резистором с сопротивлением на порядок величины меньшим, чем сопротивление амперметра. Нередко в лабораторной практике применяет многопре-

дельные амперметры. Внутри корпуса таких приборов размещают несколько различных шунтов, которые подключаются параллельно входу с помощью переключателя пределов измерений. На лицевой панели многопредельных приборов указывают максимальные значения силы тока, которые могут быть измерены при том или ином положении переключателя пределов измерений.

Заметим, что из-за малой величины внутреннего сопротивления ам-

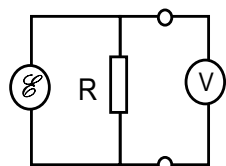


Рис. 2. Включение вольтметра в исследуемую цепь: \mathcal{E} - ЭДС, действующая в цепи, R - сопротивление, на котором измеряется напряжение

перметров измерения силы тока следует производить, по возможности, лишь после того, как известно приблизительно

(хотя бы по порядку величины) ожидаемое значение. Если оно не известно, то измерение следует начинать, используя максимальный предел, так как в этом случае вероятность превышения значения силы тока в цепи максимально допустимой для данного прибора (а следовательно, и выхода его из строя) будет наименьшей.

Измерение напряжения. Для измерения напряжения на участке цепи (разности потенциалов между точками, ограничивавшими исследуемый участок), применяют вольтметры, подключаемые параллельно исследуемому участку (рис.2). Фактически вольтметр (кроме приборов некоторых систем, например электростатической) представляет собой амперметр, шкала которого проградуирована в единицах напряжения - вольтах, милливольтках, микровольтах, киловольтах. Однако в отличие от амперметров, внутреннее сопротивление вольтметра r_v

Порядок работы с прибором:

- Отключить питание щитка на лабораторном столе.
- Полностью собрать измерительную установку, выставив заранее диапазоны измерений мультиметров, и подключить установку к ЛАТРу.
- Проверить, заземлена ли коммутационная колодка.
- Подключить ЛАТР к щитку.
- Включить питание на щитке.
- Выполнить измерения.
- Отключить питание щитка.
- Отключить ЛАТР и отсоединить его от измерительной установки.

Мультиметры. Для установки вида и диапазона измерений требуется:

- развернуть нужным образом указатель работ
- подключить прибор через соответствующие выбранному диапазону гнезда.

Необходимо помнить, что в диапазонах измерений токов 200 мА и ниже защита приборов по перегрузке осуществляется плавким предохранителем. Поэтому перед подключением прибора для такого вида работы, нужно быть уверенным, что сила тока в действительности не превысит максимального для выбранного диапазона значения. Иначе для продолжения работы потребуется замена предохранителя.

Во избежание быстрого разряда батарейки прибора нужно следить за тем, чтобы прибор был **выключен**, если он не задействован в проведении измерений.

Упражнение 1. Работа с постоянным током. Изучение потенциометра.

1.1 Выполнить измерения напряжения на выходе источника постоянного тока без нагрузки. Напряжение изменять путем поворота винта

Практическая часть

Приборы: источник питания постоянного тока, коммутационная колодка с электрической лампочкой, ЛАТР, понижающий трансформатор, мультиметры.

Источник питания постоянного тока. Схема источника питания (потенциометра) приведена на рис.7. ЭДС батарейки примерно равна 1.5 В. Сопротивление резистора R_p - 939 Ом. Выходное напряжение регулируется поворотом винта резистора так, что в отсутствие нагрузки оно примерно линейно зависит от показаний N на шкале винта.

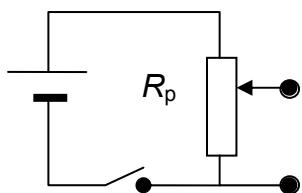


Рис. 7. Схема источника питания.

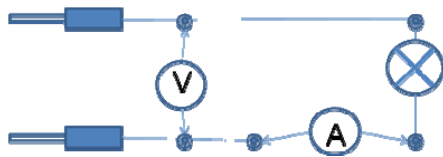


Рис.8. Схема коммутационной колодки с лампочкой

Во избежание быстрого разряда батарейки нужно следить за тем, чтобы источник был **выключен**, если он не задействован в проведении измерений.

Коммутационная колодка. Схема колодки приведена на рис. 8, где также показано, как подключать мультиметры.

ЛАТР – источник переменного тока с регулируемым напряжением, величина которого выводится на стрелочный вольтметр. Выходное напряжение может достигать 250 В, поэтому работа с прибором требует внимательности, осторожности и точного соблюдения порядка подключения.

должно быть как можно больше сопротивления того участка цепи R , на котором проводятся измерения. В противном случае параллельное подключение прибора приведет к существенному изменению величины силы тока в цепи и, следовательно, к заметному изменению разности потенциалов, подвергаемой измерению.

Для расширения пределов измерений последовательно с вольтметром включают добавочные сопротивления r_0 , величина которых может быть определена из соотношения

$$r_0 = (n-1)r_v$$

где n - число, определяющее во сколько раз требуется увеличить предел измерений. Размещение нескольких добавочных сопротивлений и переключателя, позволяющего их подключать к индикатору, внутри корпуса прибора, дает возможность конструировать многопределные

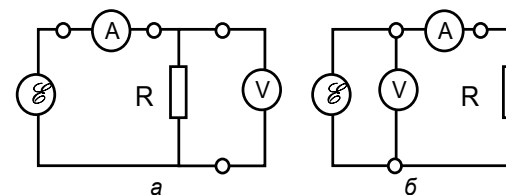


Рис. 3. Два варианта схем включения приборов при одновременном измерении силы тока и напряжения

вольтметры. На их лицевых панелях рядом с переключателем пределов измерений указывают максимальные значения разности потенциалов,

которые могут быть измерены при том или ином положении переключателя.

Измерение активных сопротивлений. При выполнении одновременных измерений силы тока и напряжения в цепи возможны два варианта подключения приборов, представленные на рис.3. Очевидно, что вариантом (а) можно пользоваться, когда внутреннее сопротивление вольтметра r_v значительно превышает сопротивление участка цепи R ,

а вторым (б) – когда внутреннее сопротивление амперметра r_A значительно меньше величин R .

В проводнике обычно сила тока I пропорциональна напряжению U , приложенному к нему. Коэффициент пропорциональности между ними R называется электрическим сопротивлением $R=U/I$ (закон Ома). Таким образом, экспериментально можно найти сопротивление участка цепи, подключив эту цепь к источнику ЭДС и измерив амперметром протекающий через данный элемент ток I , а вольтметром – напряжение на нем U . Относительная погрешность измерения при этом будет складываться из относительных погрешностей измерения тока и напряжения $\delta_R = \sqrt{\delta_A^2 + \delta_V^2}$. Этот метод универсален, но требует двух одновременных измерений разными приборами и математической операции деления. О его применении в практике можно отметить следующее:

1. Он является единственно возможным для измерения сопротивления элементов непосредственно в работающих электрических цепях с протекающими в них токами.
2. Этот метод является основным в лабораторных физических экспериментах, требующих измерения сопротивления, поскольку позволяет установить при измерении любую величину напряжения или тока, которые потребуются по условиям эксперимента и не повредят измеряемый элемент.
3. Данный метод позволяет измерить сопротивления нелинейных элементов, у которых величина сопротивления зависит от поданного напряжения или тока (например, зависимость сопротивления полупроводникового р/п перехода от приложенного напряжения).

Цифровые приборы имеют большие преимущества перед аналоговыми, благодаря которым они во многих научных и технических измерениях вытеснили последние. Это:

- 1) Высокая точность измерений. Типичные значения погрешности составляют 0.001–0.5% от предела измерений.
- 2) Широкий диапазон измеряемых величин, достигающий нескольких порядков.
- 3) Высокая скорость измерения.
- 4) Отсутствие характерных для стрелочных приборов субъективных зрительных ошибок считывания со шкал.
- 5) Сила тока через измеряемый элемент не зависит от его сопротивления и обычно очень мала, что исключает его перегрев или повреждение.
- 6) Возможность вывода результатов в цифровой виде на компьютер через шину интерфейса.

В то же время, цифровая индикация результатов субъективно менее наглядна, чем у стрелочных приборов. Особенно это проявляется, если измеряемая величина меняется во времени, т.к. это сопровождается непрерывным мельканием цифр. Поэтому в некоторых случаях и высокоточные цифровые приборы содержат, наряду с цифровым, и стрелочный индикатор для наглядного визуального представления результата.

Как и любые приборы, имеющие аналоговые электронные схемы, цифровые мультиметры не обладают полной стабильностью параметров и для поддержания точности измерений должны периодически проходить калибровку (поверку).

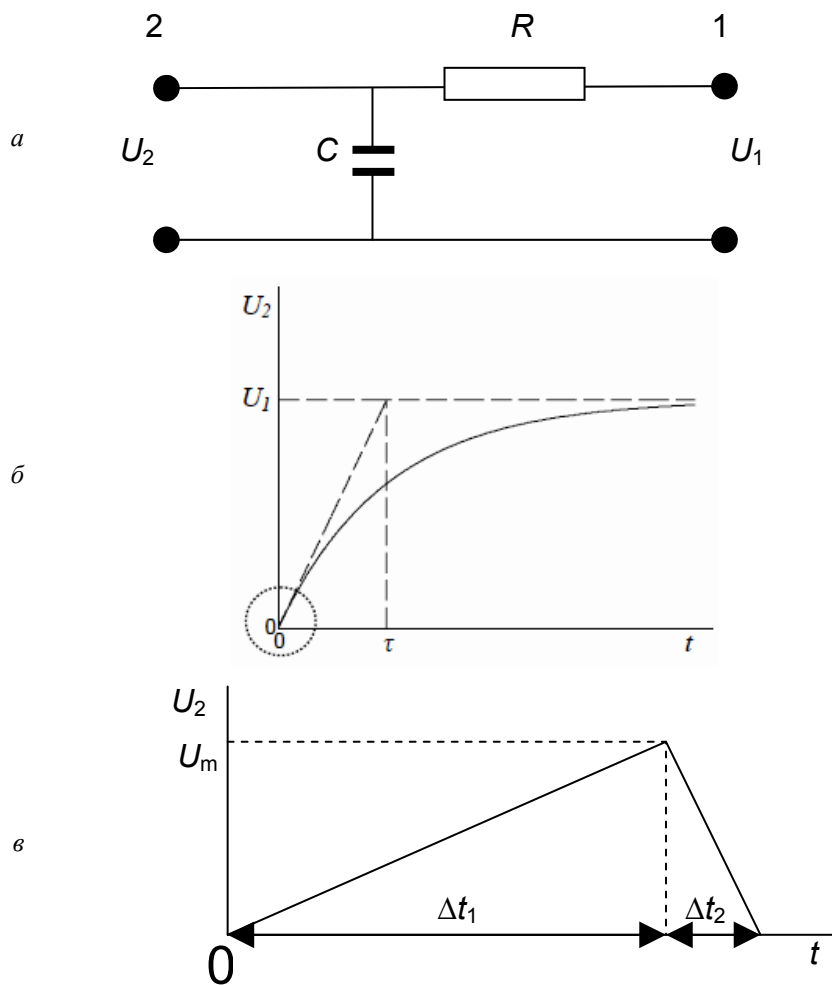


Рис. 6. К объяснению метода «двойного интегрирования»: *a* – RC-цепочка; *б* – зависимость напряжения U_2 от времени и ее линейный участок (выделен окружностью); *в* – напряжение U_2 при двойном интегрировании.

Тем не менее, часто приходится сталкиваться с более простой ситуацией, когда нужно измерить сопротивление отдельных, никуда не подключенных линейных элементов цепи, сопротивления которых постоянно. Для таких случаев применяются омметры, индикаторы которых позволяют сразу прочесть сопротивление измеряемого элемента при его подключении к прибору без каких-либо дополнительных расчетов. Данные приборы содержат внутреннюю электрическую цепь с источником ЭДС и измеритель с индикатором.

Переменный ток. Для оценки параметров переменного тока используют следующие величины: амплитудное значение силы тока I_0 , среднее значение I_{cp} и эффективное (действующее) значение силы тока $I_{эф}$. Часто выполняют измерения в таких цепях, в которых сила тока изменяется во времени по гармоническому закону:

$$I(t) = I_0 \sin \omega t, \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$

ν – частота переменного тока, T – его период. Максимальное значение, которого достигает сила тока в течение одного периода, называют амплитудным значением. Его можно измерить только специальными приборами или осциллографами. Среднее значение силы тока в случае его изменения по гармоническому закону равно нулю, и измерения этой величины лишены смысла. Чаще всего при измерении силы переменного тока имеют в виду его эффективное значение

$$I_{эф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt}$$

Если ток меняется по гармоническому закону, то эта величина связана простым соотношением с амплитудным значением I_0 . Действительно, в

течение бесконечно малого промежутка времени dt можно считать силу тока постоянной. Тогда количество энергии dA , рассеиваемой в цепи, за время dt составляет $dA = I^2 R dt$ где R - сопротивление цепи. Энергия, затраченная за один период, равна

$$A = \int_0^T I^2 R dt = \frac{I_0^2}{2} RT$$

Следовательно, средняя мощность переменного тока составит

$$P = \frac{A}{T} = \frac{I_0^2}{2} R$$

Если положить $I_{\text{эф}} = I_0 / \sqrt{2}$, то предыдущее выражение полностью совпадает с известным соотношением для мощности постоянного тока:

$$P = I^2 R, \quad P = I_{\text{эф}}^2 R,$$

т.е. эффективное и амплитудное значения силы тока связаны соотношением

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}.$$

Аналогично для цепей с гармонично изменяющимся током вводится эффективное напряжение

$$U_{\text{эф}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}},$$

где U_0 - амплитуда напряжения. При этом выражение для мощности совпадает с соответствующим выражением для постоянного тока:

$$P = IU, \quad P = I_{\text{эф}} U_{\text{эф}}.$$

интегралу $\int_0^t U_1 dt$ от входного сигнала, поэтому такое преобразование в электронике называют интегрированием. Измерение напряжения путем «двойного интегрирования» происходит в 2 этапа – «интегрирование вверх» и «интегрирование вниз». На первом этапе в течение заданного интервала времени Δt_1 на вход подается измеряемое напряжение $U_1 = U_{\text{изм}}$. В результате напряжение на выходе достигает величины

$$U_2 = U_m = U_{\text{изм}} \Delta t_1 / \tau \quad (2)$$

(см. рис. 6б). На втором этапе на вход подается заданное постоянное напряжение противоположной полярности $U_1 = -U_0$ и происходит разрядка конденсатора. Измеряется интервал времени Δt_2 между началом разрядки и моментом времени, когда величина U_2 достигнет нуля. Его величина определяется из уравнения

$$U_m = U_0 \Delta t_2 / \tau, \quad (3)$$

которое следует из решения (1) при начальном условии $Q|_{t=0} = CU_m$ в приближении $\Delta t_2 \ll \tau$. Тогда из формул (2,3) получаем

$$U_{\text{изм}} = U_0 \Delta t_2 / \Delta t_1 \quad (4)$$

- конечный результат измерения напряжения методом «двойного интегрирования». Результат уже не зависит от параметров измерительной RC-цепочки. Более того, поскольку интервалы времени Δt_1 и Δt_2 измеряются путем счета импульсов, следующих с одинаковой частотой F , результат измерения напряжений не зависит и от F .

Вольтметры с двойным интегрированием. На практике трудно обеспечить высокую степень линейности нарастающего напряжения, которое подается в компаратор, а также трудно добиться временной стабильности параметров прибора α и F . Поэтому широкое распространение получили устройства, работающие по принципу «двойного интегрирования». В реальных мультиметрах двойное интегрирование реализуется в схемах с использованием операционных усилителей. В данном учебном пособии для выяснения принципа двойного интегрирования, а также смысла, вкладываемого в термин «интегрирование» в электротехнической литературе, рассмотрим простейшую схему – RC-цепочку (см. рис. 6а).

Пусть на вход 1 RC-цепочки подается постоянное напряжение U_1 , а с выхода 2 снимается напряжение U_2 . Тогда $U_2 + RI = U_1$, где I – ток, протекающий через резистор R . Если Q – заряд на конденсаторе, то $U_2 = Q/C$ и $I = dQ/dt$. Отсюда получаем уравнение для Q и его общее решение:

$$R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = U_1 \quad Q = C(U_1 + Ae^{-t/\tau}) \quad (1)$$

где $\tau = RC$, A – постоянная, зависящая от начальных условий. Правильность решения легко проверить подстановкой в уравнение.

Если $Q = 0$ при $t = 0$, то $A = -U_1$. При этом зависимость U_2 от времени имеет вид $U_2 = U_1(1 - e^{-t/\tau})$, см. рис. 6б. Для моментов времени

$t \ll \tau$ ($e^{-t/\tau} \approx 1 - t/\tau$) эта зависимость близка к линейной $U_2 \approx U_1 t / \tau$. На рисунке соответствующий участок процесса выделен окружностью. На этом участке выходной сигнал U_2 пропорционален

Цифровые мультиметры

В цифровых приборах результат измерений представляется на цифровом индикаторе. Обычно цифровые приборы являются многофункциональными мультиметрами, которые могут измерять напряжение, силу тока и сопротивление. Основу таких приборов составляет вольтметр на базе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) – устройстве, преобразующем аналоговую величину – напряжение – в цифровой код.

Принцип работы амперметра обычно основан на измерении данным цифровым вольтметром падения напряжения при протекании измеряемого тока через резистор с известным сопротивлением. Поскольку величина этого напряжения прямо пропорциональна силе тока, показания цифрового индикатора вольтметра можно легко перевести в единицы силы тока.

Принцип работы омметра обычно основан на измерении данным цифровым вольтметром падения напряжения на измеряемом резисторе при протекании через него заранее известного фиксированного тока, создаваемого специальной схемой – стабилизатором тока. Поскольку величина этого напряжения прямо пропорциональна сопротивлению, показания цифрового индикатора вольтметра можно легко перевести в единицы сопротивления.

Времяимпульсный вольтметр. В основе работы времяимпульсного вольтметра лежит преобразование измеряемого напряжения в интервал времени, значение которого измеряется цифровым измерителем (заполнение счетными импульсами). Преобразование осуществляется путем сравнения измеряемого напряжения с линейно-изменяющимся напряжением (однократное интегрирование). Структурная схема при-

бора приведена на рис. 4. Ее работу поясняют графики, изображенные на рис. 5.

Напряжение измеряется циклами, задаваемыми блоком управления. В начале цикла (момент t_1 , рис. 5.а) тактовый импульс, посылаемый из блока управления, сбрасывает в нуль показание счетчика, оставшееся от предыдущего цикла, запускает компаратор и генератор линейно-изменяющегося напряжения. Измеряемое напряжение $U_{изм}$, подводимое к входу 1 компаратора, сопоставляется в нем с линейно-изменяющимся напряжением $U=a(t-t_1)$, подаваемым на вход 2 компаратора от генератора. В момент t_2 фиксируется равенство значений напряжений. На выходе компаратора формируется прямоугольный импульс длительностью $\Delta t = t_2 - t_1$ (рис. 5.б), поступающий на вход 1 временного селектора. Он заполняется счетными импульсами (рис. 5.з), подводимыми на вход 2 селектора с известной частотой F . Счетчик подсчитывает число m импульсов, поступающих на его вход за интервал времени Δt (рис. 5.д), которое и отображается цифровым дисплеем. Очевидно $U_{изм} = am/F$.



Рис.4. Структурная схема устройства для преобразования напряжения в интервал времени.

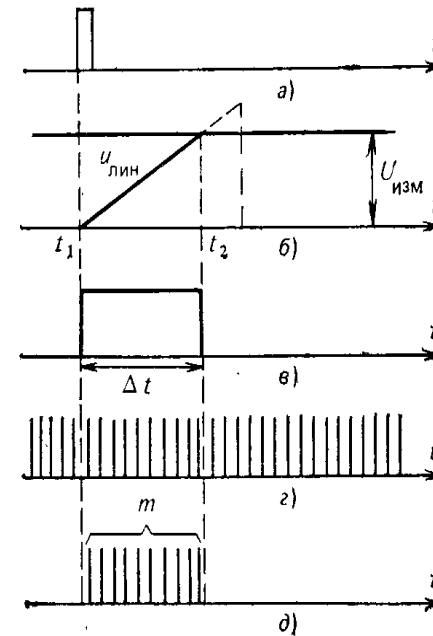


Рис. 5. К объяснению работы электронно-цифрового вольтметра: а - командный импульс; б - сигналы, поступающие на вход блока сравнения, т.е. напряжение на выходе генератора линейно-изменяющегося напряжения и измеряемое напряжение на входе прибора; в - импульс, вырабатываемый блоком сравнения и управляющий работой электронного ключа; г - импульсы, поступающие в электронный ключ с выхода генератора импульсов; д - импульсы, поступающие в блок счета.

Принцип измерения можно схематично представить так: $U \xrightarrow{\alpha} \Delta t \xrightarrow{F} m$. Напряжение преобразуется в интервал времени, который измеряется с помощью «эталона длительности» $1/F$. Очевидно, что относительная ошибка при измерении интервала времени составляет $1/(F\Delta t)$ и может быть уменьшена за счет увеличения частоты F счетных импульсов. Без принципиальных технических затруднений ошибка может быть доведена до уровня 10^{-6} или ниже, что и обуславливает высокую точность измерений цифровым вольтметром.