

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В.Ф. УТКИНА**

**М.В. ДУБКОВ, Ю.В. ЧЕРКАСОВА, А.С. ИВАНИКОВ,
В.В. ИНЯКОВ, А.Б. МАНОШКИН, А.Е. МАЛЮТИН**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие

Рязань 2021

УДК 530.1

Электрический ток. Лабораторный практикум: учеб. пособие / М.В. Дубков, Ю.В. Черкасова, А.С. Иваников, В.В. Иняков, А.Б. Маношкин, А.Е. Малютин; Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2021. 48 с.

Рассмотрены основные теоретические положения и законы электричества, приведено описание методик экспериментов и порядок выполнения лабораторных работ.

Предназначено для самостоятельной работы студентов всех направлений подготовки бакалавров и специальностей, изучающих дисциплины «Физика» и «Научные основы инновационных технологий».

Табл. 4. Ил. 16. Библиогр.: 13 назв.

Электрический ток, сила тока, плотность тока, сопротивление, закон Ома

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра общей и экспериментальной физики РГРТУ (д-р техн. наук, профессор А.Н. Власов)

Дубков Михаил Викторович
Черкасова Юлия Вадимовна
Иваников Александр Сергеевич
Иняков Валерий Викторович
Маношкин Алексей Борисович
Малютин Александр Евгеньевич

Электрический ток. Лабораторный практикум

Редактор Р.К. Мангутова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать 28.07.21. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 3,0.
Тираж 200 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

© Рязанский государственный
радиотехнический университет, 2021

Введение

Не все явления в природе можно понять и объяснить на основе использования понятий и законов механики, молекулярно-кинетической теории строения вещества и термодинамики. Достаточно обратить внимание на тот факт, что ни механика, ни молекулярно-кинетическая теория, ни термодинамика ничего не говорят о природе сил, которые связывают отдельные атомы в молекулы, удерживают атомы и молекулы вещества в твердом состоянии на определенных расстояниях друг от друга. Законы взаимодействия атомов и молекул удастся понять и объяснить на основе представления о том, что в природе существуют *электрические заряды*.

Понятие «электрический заряд» является одним из важнейших в учении об электричестве наряду с понятием «электрическое поле». Качественные представления об этой величине сформировались еще с античных времен. «В янтаре, — писал Плутарх, — содержится огненная бестелесная сила, которая выходит из него скрытыми путями, если потереть поверхность янтара, и производит то же действие, что и магнитный камень». Современная же терминология была введена американцем Б. Франклином, который предложил заряд, скапливающийся на потертой кожей стеклянной палочке, считать «положительным», а заряд, скапливающийся на потертом мехом куске смолы, — «отрицательным».

Заряду присущи следующие основные свойства:

- 1) электрический заряд бывает двух видов: положительный и отрицательный;
- 2) в любой электрически изолированной системе выполняется закон сохранения заряда: алгебраическая сумма зарядов не изменяется;
- 3) электрический заряд является инвариантным: его величина не зависит от системы отсчета (движется заряд или покоится).

Отдельные заряды взаимодействуют друг с другом: одноименные заряды отталкиваются друг от друга, разноименные — притягиваются. Электрический заряд — это неотъемлемое свойство элементарных частиц. Заряд такой частицы называется *элементарным зарядом*. Положительный элементарный заряд обозначают e (или $+e$); им обладают частицы — протоны. Отрицательный заряд обозначается как $-e$, им обладают электроны. Нейтроны не имеют заряда.

В начале XX века американский физик *Р. Милликен* доказал дискретность электрического заряда. Это означает, что переданный или полученный телом электрический заряд $q = Ne$. Он также впервые экспериментально определил, что $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Если через некоторую воображаемую поверхность переносится суммарный заряд, отличный от нуля, то говорят, что через эту поверхность течет *электрический ток*. Он может течь в твердых телах (металлы, полупроводники), в жидкостях (электролиты) и газах (газовый разряд). Для протекания тока необходимо наличие в данном теле (или среде) заряженных частиц, которые могут перемещаться в пределах всего тела. Их называют *носителями тока*. Ими могут быть электроны, либо ионы, либо макроскопические частицы, несущие на себе избыточный заряд (заряженные пылинки и капельки).

Например, в результате первых опытов по изучению электропроводности металлов было выяснено, что перенос заряда осуществляется не атомами, а какими-то другими частицами, входящими в состав металла (опыт *Рикке* 1901 г.). Предполагалось, что эти частицы – электроны, открытые *Томсоном* в 1897 г. Опыты, подтверждающие электронную теорию проводимости, были поставлены в 1913 г. *Мандельштамом* и *Папалекси*. Они приводили проволочную катушку в быстрые крутильные колебания вокруг ее оси, в результате чего в телефоне, подключенном к ее выводам, был слышан звук, обусловленный импульсами тока. Это свидетельствовало о том, что в металле имеются частицы, свободно перемещающиеся внутри него. При торможении проводника они продолжают двигаться по инерции, создавая импульс тока. Таким образом, ученые доказали, что носителями электрического тока в проводниках являются электроны. Количественный результат был получен *Толменом* и *Стюартом* в 1916 г. Они вычислили заряд, протекающий в цепи при торможении катушки, который оказался пропорциональным величине e/m , очень близкой к значению удельного заряда электрона.

В этом учебном пособии рассмотрены основные теоретические положения и законы электричества, характеризующие понятие электрического тока. А также приведены описание методик экспериментов и порядок выполнения лабораторных работ по данному курсу физики.

1. Характеристики электрического тока

Классическая теория электропроводности была разработана *Друде* и усовершенствована *Лоренцем*. В классическом приближении электроны в металле движутся подобно молекулам идеального газа. Такой подход получил название «*модель электронного газа*». В отличие от молекул газа, электроны преимущественно сталкиваются не между собой, а с ионами кристаллической решетки. В результате чего устанавливается термодинамическое равновесие между кристаллической решеткой и электронным газом.

В отсутствие электрического поля носители заряда участвуют в тепловом хаотическом движении со скоростью \vec{u} . В этом случае через некоторую поверхность проходит в обе стороны примерно одинаковое количество носителей того и другого знака, так что суммарный ток равен нулю. При включении электрического поля на хаотическое движение носителей накладывается упорядоченное движение со скоростью \vec{v} . Таким образом, средняя скорость движения носителей тока будет равна $\langle \vec{u} + \vec{v} \rangle = \langle \vec{u} \rangle + \langle \vec{v} \rangle = \langle \vec{v} \rangle$, так как $\langle \vec{u} \rangle = 0$. Отсюда следует, что *электрический ток – это упорядоченное движение электрических зарядов*.

Количественной мерой электрического тока является *сила тока* I , т.е. заряд dq , переносимый через поперечное сечение проводника в единицу времени dt :

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (1.1)$$

Электрический ток может быть обусловлен движением как положительных, так и отрицательных зарядов. Перенос отрицательного заряда в одном направлении эквивалентен переносу такого же количества положительных зарядов в противоположном направлении. За направление тока принимают направление движения положительных зарядов.

Ток, не меняющийся со временем, называется *постоянным*. Для постоянного тока предыдущее выражение можно переписать как

$$I = \frac{q}{t}. \quad (1.2)$$

Электрический ток может быть распределен по поверхности неравномерно. Поэтому вводят понятие плотности тока \vec{j} . *Плотностью тока* называется количество электричества, пересекающее единицу

площади поперечного сечения проводника в единицу времени. Плотность тока \vec{j} – векторная величина, направленная вдоль вектора средней скорости упорядоченного движения зарядов:

$$\vec{j} = q_0 n \langle \vec{v} \rangle, \quad (1.3)$$

где q_0 – заряд носителей тока; n – их концентрация; $\langle \vec{v} \rangle$ – средняя скорость упорядоченного движения.

От плотности тока нетрудно перейти к силе тока. Если элемент поверхности dS рассматривать как вектор, направленный вдоль положительной нормали, то связь между силой тока и его плотностью имеет вид

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S} = \int_S j_n dS, \quad (1.4)$$

где j_n – проекция вектора \vec{j} на нормаль к площадке dS .

Сила тока – скалярная величина (это поток вектора плотности тока через некоторую поверхность).

2. Закон Ома

Основным способом возбуждения электрического тока является наличие электрического поля. Как показывает опыт, в ряде случаев (например, в металлах) плотность тока пропорциональна напряженности электрического поля:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.1)$$

(закон Ома в дифференциальной форме). Здесь $\sigma = 1/\rho$ – удельная проводимость, равная обратному значению удельного сопротивления материала.

Рассмотрим важный случай, когда электрический ток течет вдоль тонких проводов. Если S – площадь поперечного сечения проводника, то из (1.4) имеем

$$I = jS. \quad (2.2)$$

Для общности будем предполагать, что кроме сил электрического поля в проводнике действуют *сторонние силы* (т.е. силы неэлектрического происхождения). Если $\vec{E}_{стор}$ – напряженность поля сторонних сил, то закон Ома (2.1) примет вид

$$E + E_{\text{стор}} = j / \sigma = \frac{I}{S} \rho. \quad (2.3)$$

Умножим (2.3) на элемент длиной dl проводника и проинтегрируем полученное выражение по участку проводника от точки 1 до точки 2:

$$\int_1^2 E dl + \int_1^2 E_{\text{стор}} dl = I \int_1^2 \frac{dl}{S} \rho. \quad (2.4)$$

Первый интеграл в (2.4) представляет собой разность потенциалов $\varphi_2 - \varphi_1$ между точками 1 и 2, второй интеграл зависит от источника сторонних сил и называется *электродвижущей силой* ε . Интеграл в правой части (2.4) характеризует свойства проводника и называется сопротивлением R . Если S и ρ постоянны, то

$$R = \frac{l_{1,2}}{S} \rho. \quad (2.5)$$

Таким образом, (2.4) принимает вид

$$\varphi_2 - \varphi_1 + \varepsilon = IR \quad (2.6)$$

(закон Ома в интегральной форме для неоднородного участка проводника). В случае однородного участка проводника, т.е. при отсутствии на этом участке сторонних сил, из (2.6) имеем

$$U = \varphi_2 - \varphi_1 = IR \quad \text{или} \quad I = \frac{U}{R}. \quad (2.7)$$

3. Правила Кирхгофа

Определив связь параметров, характеризующих электрический ток на отдельных участках цепи (однородных и неоднородных), можно рассмотреть эту связь в любой сколь угодно сложной цепи. Один из способов расчета таких цепей предложил немецкий физик *Г. Кирхгоф* в 1845 году. В основе способа лежат два соотношения, названные *правилами Кирхгофа*, позволяющие определить токи во всех участках цепи, если известны все сопротивления и ЭДС.

Первое правило является следствием уравнения непрерывности и относится к узлам электрической цепи. *Узлом* называется точка, в которой сходится более двух проводников. При этом ток, текущий по про-

воднику к узлу, считается положительным, выходящий из узла – отрицательным.

Первое правило гласит: *алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю*:

$$\sum_{k=1}^N I_k = 0. \quad (3.1)$$

Второе правило является следствием закона Ома для неоднородного участка цепи и относится к любому выделенному в разветвленной цепи замкнутому контуру. Оно гласит: *в замкнутом контуре сумма падений напряжений вдоль всего контура равна сумме ЭДС, присутствующих в нем*:

$$\sum_{k=1}^N I_k R_k = \sum_{i=1}^M \varepsilon_i. \quad (3.2)$$

Последовательность применения на практике правил Кирхгофа такова. Сначала произвольно выбираются направления токов на любом из участков контура, затем для узлов цепи составляются уравнения по первому правилу Кирхгофа. Первое правило можно применить для любого из N узлов цепи, однако независимыми будут только $N-1$ уравнения.

На следующем этапе выбирается направление обхода каждого из рассматриваемых контуров (по или против часовой стрелки). Обходя каждый контур в выбранном направлении, составляют уравнения по второму правилу Кирхгофа. При этом если направление тока совпадает с направлением обхода, то ток считается положительным, если противоположно, то – отрицательным. Также, если по направлению обхода ЭДС способствует движению положительных зарядов, то есть мы движемся по направлению обхода от «+» к «–», то она считается положительной. Второе правило можно применить только для линейно независимых контуров, то есть отличающихся друг от друга хотя бы одним элементом цепи.

В результате общее число линейно независимых уравнений, полученных по первому и второму правилам Кирхгофа, равно числу неизвестных токов, текущих на отдельных участках разветвленной цепи.

4. Работа и мощность тока. Закон Джоуля – Ленца

Рассмотрим произвольный участок цепи постоянного тока, к концам которого приложено напряжение U . За время dt через любое сечение проводника проходит заряд $dq = Idt$. При этом и электростатические силы совершают работу:

$$dA = Udq = IUdt. \quad (4.1)$$

Это и есть работа электрического тока.

Если сопротивление проводника R , то, пользуясь законом Ома для однородного участка цепи, получаем

$$dA = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt. \quad (4.2)$$

Учитывая определение мощности, получаем для мощности тока

$$P = \frac{dA}{dt} = I^2 R = \frac{U^2}{R} = IU. \quad (4.3)$$

Если ток проходит по неподвижному проводнику и при прохождении тока структура проводника не изменяется, то по закону сохранения энергии получаем, что работа тока идет на изменение внутренней энергии проводника:

$$dQ = dA. \quad (4.4)$$

Таким образом,

$$dQ = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt = UI dt. \quad (4.5)$$

Это математическое выражение представляет собой закон Джоуля – Ленца, открытый экспериментально, в интегральной форме.

Для характеристики теплоты, выделяемой в различных местах проводника, используют закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме:

$$\varpi = \rho j^2, \quad (4.6)$$

где ϖ – удельная тепловая мощность.

Удельная тепловая мощность определяет количество теплоты, выделяющееся в единице объема проводника в единицу времени. Выражение (4.6) справедливо и для неоднородного участка цепи.

5. Классическая теория электропроводности металлов

Носителями тока в металлах являются свободные электроны, то есть электроны, слабо связанные с ионами кристаллической решётки металла. Это представление о природе носителей тока в металлах основывается на электронной теории проводимости металлов, созданной немецким физиком *П. Друде* и усовершенствованной впоследствии нидерландским физиком *Х. Лоренцем*, а также на ряде классических опытов, подтверждающих положения электронной теории.

Существование свободных электронов в металлах можно объяснить следующим образом: при образовании кристаллической решётки металла (в результате сближения изолированных атомов) валентные электроны, сравнительно слабо связанные с атомными ядрами, отрываются от атомов металла, становятся «свободными» и могут перемещаться по всему объёму кристалла. Электроны проводимости при своём движении сталкиваются с ионами решётки, в результате чего устанавливается термодинамическое равновесие между электронным газом и решёткой. По теории Друде – Лоренца электроны обладают энергией теплового движения, схожей с энергией молекул одноатомного газа. Поэтому, применяя выводы молекулярно-кинетической теории, можно найти среднюю скорость теплового движения электронов:

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad (5.1)$$

которая при $T = 300$ К равна $1,1 \cdot 10^5$ м/с. Тепловое движение электронов, являясь хаотическим, не может привести к возникновению тока.

При наложении внешнего электрического поля на металлический проводник кроме теплового движения электронов, возникает их упорядоченное движение, то есть возникает электрический ток. Среднюю скорость $\langle v \rangle$ упорядоченного движения электронов можно оценить согласно формуле для плотности тока

$$j = ne\langle v \rangle, \quad (5.2)$$

где n – концентрация свободных электронов в металле.

Выбрав допустимую плотность тока j , например для медных проводов 10^7 А/м², получим, что при $n = 8 \cdot 10^{28}$ м⁻³ средняя скорость $\langle v \rangle$ упорядоченного движения электронов равна $7,8 \cdot 10^{-4}$ м/с. Следовательно, $\langle v \rangle \ll \langle u \rangle$, то есть даже при очень больших плотностях тока средняя

скорость упорядоченного движения электронов, обуславливающего электрический ток, значительно меньше их скорости теплового движения.

Пусть в металлическом проводнике существует электрическое поле напряжённостью $E = \text{const}$. Со стороны поля заряд e испытывает действие силы $\vec{F} = e\vec{E}$ и приобретает ускорение $\vec{a} = \vec{F}/m = e\vec{E}/m$. Таким образом, во время свободного пробега электроны движутся равноускоренно, приобретая к концу свободного пробега максимальную скорость

$$v_{\text{max}} = \frac{eE}{m} \langle t \rangle, \quad (5.3)$$

где $\langle t \rangle$ – среднее время между двумя последовательными соударениями электрона с ионами решётки.

Классическая теория металлов не учитывает распределения электронов по скоростям, поэтому среднее время свободного пробега $\langle t \rangle$ определяется средней длиной свободного пробега $\langle l \rangle$ и средней скоростью движения электронов $\langle u \rangle$ относительно кристаллической решётки проводника:

$$\langle t \rangle = \frac{\langle l \rangle}{\langle u \rangle}. \quad (5.4)$$

Согласно теории Друде в конце свободного пробега электрон, сталкиваясь с ионами решётки, отдаёт им всю накопленную в поле энергию, поэтому скорость его упорядоченного движения становится равной нулю. Следовательно, средняя скорость направленного движения электрона равна

$$\langle v \rangle = \frac{v_{\text{max}}}{2}. \quad (5.5)$$

Объединив выражения (5.3), (5.4) и (5.5), получим

$$\langle v \rangle = \frac{eE \langle l \rangle}{2m \langle u \rangle}. \quad (5.6)$$

Возвращаясь к выражению (5.2), находим плотность тока в металлическом проводнике:

$$j = ne \langle v \rangle = \frac{ne^2 \langle l \rangle}{2m \langle u \rangle} E = \gamma E. \quad (5.7)$$

Таким образом, плотность тока пропорциональна напряжённости поля.

Это выражение определяет закон Ома в дифференциальной форме. Коэффициент пропорциональности γ между j и E называется *удельной электрической проводимостью* материала:

$$\gamma = \frac{ne^2 \langle l \rangle}{2m \langle u \rangle}. \quad (5.8)$$

Единица измерения удельной проводимости – *сименс на метр* (См/м). Проводимость материала тем больше, чем больше концентрация свободных электронов и средняя длина их свободного пробега.

Величина

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{2m \langle u \rangle}{ne^2 \langle l \rangle} \quad (5.9)$$

называется *удельным электрическим сопротивлением*. Единица измерения удельного сопротивления – *ом-метр* (Ом·м).

Наименьшим удельным сопротивлением обладают серебро ($\rho = 1,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м) и медь ($\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м). На практике наряду с медными применяются алюминиевые проводники. По сравнению с медью алюминий обладает меньшей плотностью, но имеет большее удельное сопротивление ($\rho = 2,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м).

Сопротивление проводника зависит от его размеров и формы, а также от материала, из которого проводник изготовлен. Для однородного линейного проводника электрическое сопротивление R прямо пропорционально удельному электрическому сопротивлению ρ материала, из которого сделан проводник, а также его длине l и обратно пропорционально площади его поперечного сечения S :

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (5.10)$$

Таким образом, способность вещества проводить электрический ток характеризуется его удельным сопротивлением ρ либо удельной проводимостью γ . Их величины определяются в основном химической природой вещества и температурой. Для большинства металлов при температурах, близких к комнатной, справедливо соотношение

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t), \quad (5.11)$$

где ρ и ρ_0 – соответственно удельные сопротивления проводника при температуре t и 0°C ; α – температурный коэффициент сопротивления, для чистых металлов (при не очень низких температурах) близкий к

$1/273 \text{ K}^{-1}$.

Следовательно, температурная зависимость удельного сопротивления может быть представлена в виде

$$\rho = \alpha \rho_0 T, \quad (5.12)$$

где T – термодинамическая температура.

При очень низких температурах, близких к абсолютному нулю, линейная зависимость $\rho(T)$ может нарушаться (рис. 5.1, кривая 1). Из-за наличия примесей и дефектов кристаллической структуры удельное сопротивление при уменьшении температуры стремится к конечному значению $\rho_{\text{ост}}$.

Впоследствии было обнаружено, что сопротивление многих металлов (например, *Al*, *Pb*, *Zn* и др.) и их сплавов при очень низких температурах (0,1 – 20 К), называемых *критическими* T_k и характерных для каждого вещества, скачкообразно уменьшается до нуля, то есть металл становится абсолютным проводником

(см. рис. 5.1, кривая 2). Впервые это явление, названное *сверхпроводимостью*, было обнаружено в 1911 г. нидерландским физиком *Х. Камерлинг-Оннесом* для ртути.

Явление сверхпроводимости объясняется на основе квантовой теории. Практическое использование сверхпроводящих материалов (в обмотках сверхпроводящих магнитов, в системах памяти ЭВМ и др.) затруднено из-за их низких критических температур. В настоящее время обнаружены и активно исследуются керамические материалы, обладающие сверхпроводимостью при температурах выше 100 К.

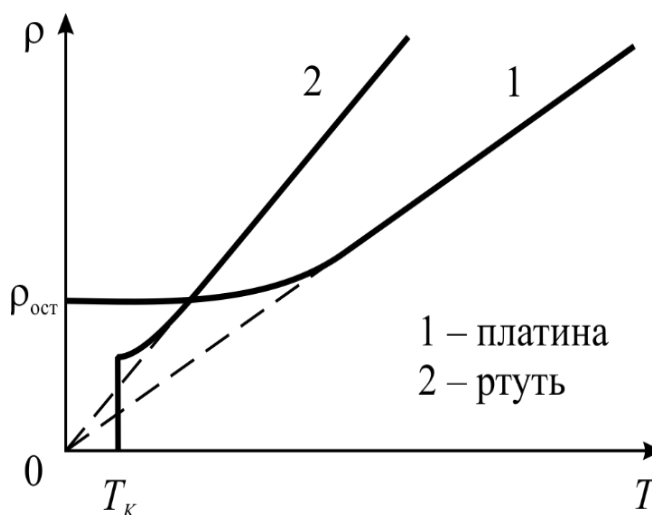


Рис. 5.1. Температурная зависимость удельного сопротивления

6. Электроизмерительные приборы

Термин «электроизмерительные приборы» представляет собой обобщённое название широкого класса устройств, предназначенных для измерения различных физических величин, преобразованных в электрический сигнал. Существуют три большие группы измерительных приборов: электромеханические, электронные аналоговые и цифровые.

6.1. Электромеханические измерительные приборы

Общим термином «электромеханические приборы» обозначают аналоговые средства измерения, содержащие измерительную схему (ИС), измерительный механизм (ИМ) и отсчётное устройство (ОУ) (рис. 6.1). Измерительная схема представляет собой совокупность сопротивлений, индуктивностей и ёмкостей.

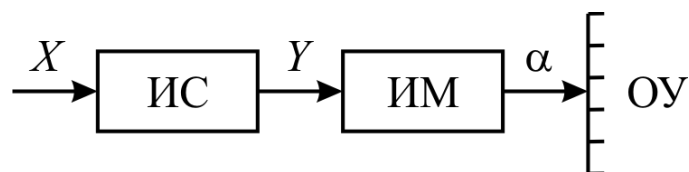


Рис. 6.1. Структурная схема электромеханического измерительного прибора

Она преобразует измеряемую физическую величину X в некоторую новую величину Y , под воздействием которой происходит перемещение α подвижной части измерительного механизма, отсчитываемое с помощью отсчётного устройства. Таким образом, если выполняется однозначная зависимость $\alpha = f(X)$, то шкала отсчётного устройства может быть проградуирована в единицах измеряемой величины. В большинстве приборов выходным перемещением является угловое перемещение стрелки или зеркала.

Электромеханические приборы отличаются простотой, дешевизной, высокой надёжностью, разнообразием применения и относительно высокой точностью. К этой группе принадлежат измерительные приборы магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, электростатической и индукционной систем.

Приборы магнитоэлектрической системы

Работа приборов магнитоэлектрической системы основана на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и подвижной катушки, по которой протекает измеряемый ток.

Устройство и принцип действия таких приборов поясняются на рис. 6.2. Как видно из рисунка, между полюсами постоянного магнита 1 установлен цилиндрический ферромагнитный сердечник 2.

В зазоре между полюсами магнита и цилиндрическим сердечником может свободно вращаться подвижная рамка 3 из тонкого медного провода, намотанного на легкий алюминиевый каркас. На оси вращения 6 подвижной рамки закреплена указательная стрелка 4, которая перемещается по шкале прибора. На оси также закреплены две спиральные пружины 5, создающие противодействующий вращающий момент и одновременно исполняющие роль токоподводящих проводников.

В состоянии покоя плоскость рамки расположена параллельно силовым линиям магнитного поля постоянного магнита. При протекании тока на рамку действует вращающий момент силы Ампера, стремящийся повернуть рамку перпендикулярно к силовым линиям постоянного магнита. При повороте рамки возникает противодействующий момент силы упругости спиральных пружин. В конечном итоге рамка повернется на некоторый угол α , величина которого возрастает с увеличением значения измеряемого тока I .

Вращающий момент $M_{вр}$ пропорционален силе протекающего по обмотке рамки тока:

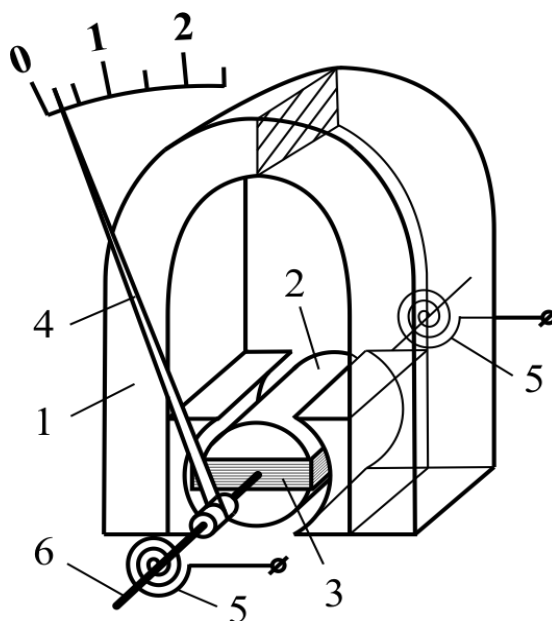


Рис. 6.2. Прибор магнитоэлектрической системы

$$M_{ep} = k_1 I, \quad (6.1)$$

где k_1 – коэффициент, зависящий от конструкции прибора, в том числе от числа витков в рамке. В то же время противодействующий момент M_n , создаваемый спиральными пружинами, пропорционален углу поворота рамки:

$$M_n = k_2 \alpha, \quad (6.2)$$

где k_2 – жёсткость спиральных пружин. Равновесие рамки определяется равенством этих противоположно направленных моментов, т.е. $M_{ep} = M_n$, откуда

$$\alpha = k I, \quad (6.3)$$

где $k = k_1/k_2$. Таким образом, угол отклонения рамки (и указателя) находится в линейной зависимости от величины измеряемого тока, что обеспечивает высокую равномерность шкалы прибора.

В качестве других достоинств приборов магнитоэлектрической системы следует отметить малое энергопотребление, слабую восприимчивость к внешним магнитным полям, высокую чувствительность и точность показаний.

Благодаря тому, что каркас рамки выполнен из алюминия, подвижная система прибора характеризуется высокой апериодичностью. Индукционные токи, возникающие в каркасе при его движении в магнитном поле, создают сильный тормозящий момент, приводящий к быстрому успокоению. Стрелка устанавливается на соответствующем делении практически без колебаний. С другой стороны, это приводит к тому, что такие приборы реагируют лишь на постоянную составляющую тока и непригодны для измерения переменных тока и напряжения.

Так как рамка прибора намотана тонким проводом, это не позволяет пропускать через нее токи, превышающие десятки миллиампер. Перегрузка прибора может привести к повреждению провода рамки или спиральной пружинки.

Приборы электромагнитной системы

Работа приборов электромагнитной системы основана на взаимодействии магнитного поля неподвижной катушки, по которой протекает

измеряемый ток, и ферромагнитного сердечника, являющегося подвижной частью прибора.

Устройство и принцип действия приборов электромагнитной системы поясняются на рис. 6.3.

Как видно из рисунка, ферромагнитный сердечник 1 имеет особую форму и установлен эксцентрично на оси вращения 2 так, что может свободно входить в плоскую щель неподвижной катушки 3. На оси также закреплены стрелка указателя 4, шток воздушного успокоителя колебаний стрелки (демпфер) 5 и спиральная пружина 6, обеспечивающая противодействующий вращающий момент.

В состоянии покоя сердечник выведен из щели катушки, а указатель располагается на нулевой отметке шкалы. При протекании тока в катушке возникает магнитное поле, которое намагничивает подвижный ферромагнитный сердечник. На намагниченный сердечник в неоднородном магнитном поле действует сила, направленная в область более сильного поля. В результате сердечник стремится втянуться в щель катушки, поворачиваясь при этом вокруг своей оси. Вращение продолжается до тех пор, пока вращающий момент не уравнивается противодействующим моментом, создаваемым спиральной пружиной. В конечном итоге сердечник повернется на некоторый угол α , значение которого определяется величиной измеряемого тока I .

Магнитное поле неподвижной катушки пропорционально величине измеряемого тока, протекающего по ее виткам. С увеличением этого тока увеличивается и намагниченность ферромагнитного сердечника. Поэтому вращающий момент $M_{вр}$ пропорционален квадрату тока:

$$M_{вр} = k_1 I^2, \quad (6.4)$$

где k_1 — коэффициент, зависящий от числа витков в катушке и конструкции прибора. Противодействующий момент, как и в приборах магнито-

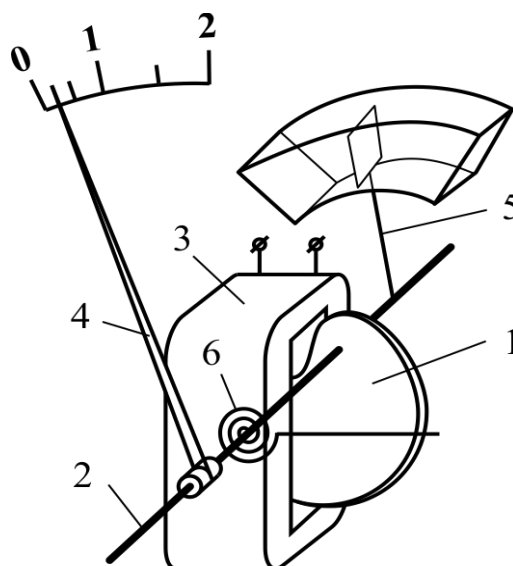


Рис. 6.3. Прибор электромагнитной системы

электрической системы, остается пропорциональным углу поворота сердечника:

$$M_n = k_2 \alpha, \quad (6.5)$$

где k_2 – жесткость спиральной пружины. Равновесие системы достигается при равенстве этих моментов, т.е. $M_{ep} = M_n$, откуда следует, что

$$\alpha = k I^2, \quad (6.6)$$

где $k = k_1 / k_2$.

Если по катушке протекает переменный ток, то необходимо провести усреднение по времени:

$$\alpha = k \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt = k I_0^2,$$

где I_0 – действующее значение переменного тока.

Как следует из соотношения (6.6), приборы электромагнитной системы имеют квадратичную шкалу с сильно сжатым начальным участком. Однако на практике ее можно приблизить к линейной подбором формы сердечника.

К достоинствам приборов электромагнитной системы следует отнести их высокую надежность и устойчивость к перегрузкам. Приборы этой системы обеспечивают возможность проведения измерений в цепях как постоянного, так и переменного токов. Этим объясняется их непригодность для измерений малых токов и напряжений. По точности измерений они уступают приборам магнитоэлектрической системы, кроме того, они более чувствительны к внешним магнитным полям.

6.2. Электронные аналоговые измерительные приборы

Электронные аналоговые приборы представляют собой сочетание электронной части, предназначенной для преобразования электрической величины (выпрямления, усиления и др.), и измерительного прибора магнитоэлектрической системы или электронно-лучевой трубки. Электронные приборы по сравнению с электромеханическими обладают значительным быстродействием, большим диапазоном измеряемых величин. Они применяются в качестве вольтметров, частотомеров, осциллографов, измерителей сопротивления, емкости и индуктивности.

Электронный вольтметр

Структурная схема универсального электронного вольтметра, предназначенного для измерения напряжения в цепях постоянного и переменного тока, приведена на рис. 6.4. Она включает в себя следующие основные элементы: амплитудный детектор, входной высокоомный делитель, усилитель постоянного тока УПТ, добавочные резисторы, измерительный прибор (микроамперметр магнитоэлектрической системы) и блок питания.

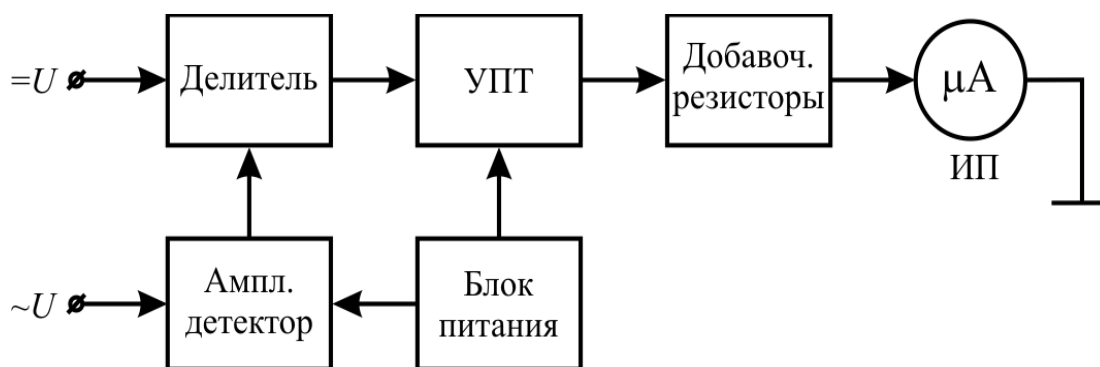


Рис. 6.4. Структурная схема электронного вольтметра

Измеряемый сигнал переменного тока подается на амплитудный детектор, после чего выпрямленное напряжение поступает на входной высокоомный делитель и далее – на вход УПТ. Измеряемый сигнал постоянного тока подается непосредственно на входной высокоомный делитель, минуя детектор.

Нагрузкой УПТ является измерительный прибор ИП, оснащенный дополнительными резисторами, подключаемыми в соответствии с установленным диапазоном измерений.

Блок питания прибора состоит из трансформатора, выпрямителей и стабилизатора напряжения. Он служит для питания УПТ и детектора.

Электронный омметр

Упрощенная схема электронного омметра приведена на рис. 6.5.

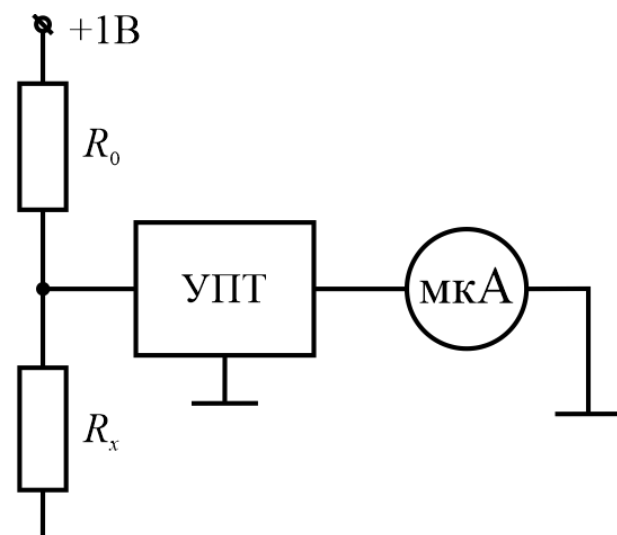


Рис. 6.5. Схема омметра

Принцип работы омметра заключается в следующем. Измеряемое сопротивление R_x подключается непосредственно к входу усилителя постоянного тока УПТ и совместно с эталонным резистором R_0 образует делитель, на который подается постоянное напряжение +1 В, вырабатываемое источником питания. При таком подключении напряжение на измеряемом сопротивлении, отсчитываемое

по шкале измерительного прибора (микроамперметра магнитоэлектрической системы), является однозначной функцией величины R_x :

$$U_x(R_x) = \frac{U_0 R_x}{R_0 + R_x}. \quad (6.7)$$

Вследствие этого шкала измерительного прибора может быть проградуирована в единицах сопротивления. Шкала такого прибора получается резко неравномерной. Начало шкалы соответствует сопротивлению $R_x = 0$, а на конце шкалы $R_x \rightarrow \infty$. Однако измерения наиболее точны для $R_x \approx R_0$. Поэтому для расширения диапазона измеряемых сопротивлений величина эталонного резистора R_0 изменяется в зависимости от установленного диапазона измерений.

Электронный осциллограф

Осциллограф предназначен для визуального исследования быстропротекающих электрических процессов, а также для измерения их временных и амплитудных параметров.

Структурная схема осциллографа представлена на рис. 6.6. Она включает в себя следующие основные элементы: электронно-лучевую трубку ЭЛТ, генератор горизонтальной развертки, блок синхронизации, усилитель вертикального отклонения луча, усилитель горизонтального отклонения луча, калибратор, блок питания.

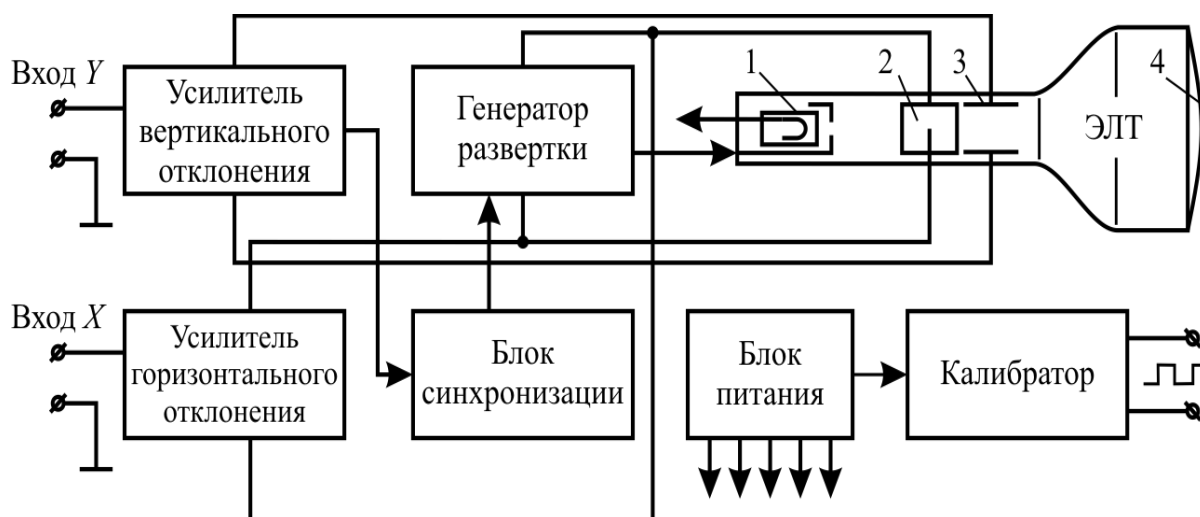


Рис. 6.6. Структурная схема осциллографа

Электронно-лучевая трубка представляет собой откачанную до высокого вакуума стеклянную колбу, внутри которой расположены электронная пушка 1, пластины горизонтального 2 и вертикального 3 отклонения электронного луча и флуоресцирующий экран 4.

Электронная пушка предназначена для создания тонкого электронного пучка, с помощью которого на экране строится видимое изображение исследуемого сигнала.

Источником электронов в электронной пушке служит катод, выполненный в виде никелевого цилиндра, на торцевую поверхность которого нанесен оксидный слой. Электроны, эмитированные катодом, ускоряются полем первого анода, имеющего большой положительный потенциал. Между первым анодом и катодом помещен модулятор. Меняя отрицательное напряжение на модуляторе, можно изменять число электронов в пучке и соответственно яркость светящегося пятна на экране.

Катод, модулятор и первый анод составляют электронную линзу, конфигурация электростатического поля в которой обеспечивает предварительную фокусировку электронного потока. Окончательная фокусировка пучка осуществляется электронной линзой, образованной первым и вторым анодами.

На пути от электронной пушки к экрану сфокусированный электронный пучок проходит между двумя парами отклоняющих пластин 2 и 3. Напряжения, приложенные к пластинам, создают между ними электрические поля, которые отклоняют электронный луч, что приводит к

смещению светящегося пятна на экране. Горизонтально расположенные пластины отклоняют луч по вертикали (вдоль оси Y), а вертикально расположенные – по горизонтали (вдоль оси X).

Для того чтобы на экране осциллографа можно было увидеть, как в некотором физическом процессе величина y меняется в зависимости от изменения другой физической величины x , т.е. $y = f(x)$, необходимо одновременно подать на горизонтально отклоняющие пластины напряжение U_x , пропорциональное x , а на вертикально отклоняющие – напряжение U_y , пропорциональное y . Тогда электронный луч начертит на экране линию исследуемой зависимости. Если при этом заставить луч неоднократно повторять один и тот же путь по экрану, то вследствие инерционности глаза наблюдатель увидит неподвижный график функции $y = f(x)$.

На практике часто приходится наблюдать изменение различных физических величин от времени, т.е. $y = f(t)$. Для этого на пластины горизонтального отклонения луча подается напряжение, изменяющееся прямо пропорционально времени. Такое напряжение вырабатывается генератором развертки и называется пилообразным. Под действием этого напряжения луч равномерно перемещается по экрану слева направо и, дойдя до крайнего правого положения, мгновенно возвращается в исходное состояние, после чего процесс движения луча повторяется. Обратный ход луча на экране не виден, поскольку электронная пушка на это время «запирается» подачей отрицательного импульса на модулятор.

6.3. Цифровые измерительные приборы

В цифровых измерительных приборах (ЦИП) осуществляется преобразование входной непрерывной измеряемой величины в код, т.е. дискретную величину с представлением результата в виде числа. Для образования кода любая непрерывная величина, ограниченная некоторыми предельными значениями, квантуется по времени и по уровню. При квантовании теряется часть информации, но полученное значение величины известно с точностью, определяемой шагом квантования.

Достоинствами ЦИП являются высокая точность, удобство и объективность отсчета измеряемой величины, высокая помехоустойчивость

и возможность сочетания с вычислительной техникой. Недостатками ЦИП являются их сложность и высокая стоимость.

Цифровой вольтметр

Структурная схема цифрового вольтметра показана на рис. 6.7. В ее состав входят: делитель входного напряжения, усилитель постоянного тока УПТ, аналого-цифровой преобразователь АЦП, дешифратор кодов, цифровой индикатор.

При измерении переменного напряжения и тока входная часть схемы дополняется детектором, осуществляющим выпрямление сигнала, а также измерительным источником опорного напряжения в случае измерения сопротивления постоянному току.

Работу цифрового вольтметра рассмотрим на примере измерения напряжения постоянного тока. Входное напряжение в зависимости от его величины либо ослабляется входным делителем, либо, если его величина мала, усиливается усилителем постоянного тока. С выхода усилителя постоянного тока сигнал поступает на АЦП, в котором осуществляется преобразование аналоговой величины в двоичный параллельный код. Далее двоичный параллельный код поступает на дешифратор, где происходит его преобразование в коды, необходимые для управления цифровым индикатором. Цифровой индикатор предназначен для отображения информации и входной величины в удобной для зрительного восприятия форме.

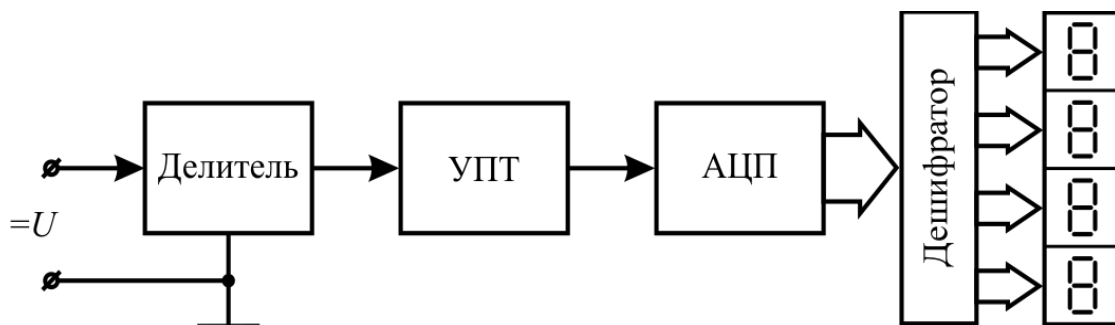


Рис. 6.7. Структурная схема цифрового вольтметра

Цифровой осциллограф

По своему принципу действия цифровой осциллограф ничем не отличается от аналогового электронного осциллографа, однако имеет существенные отличия в устройстве. Структурная схема цифрового осциллографа показана на рис. 6.8.

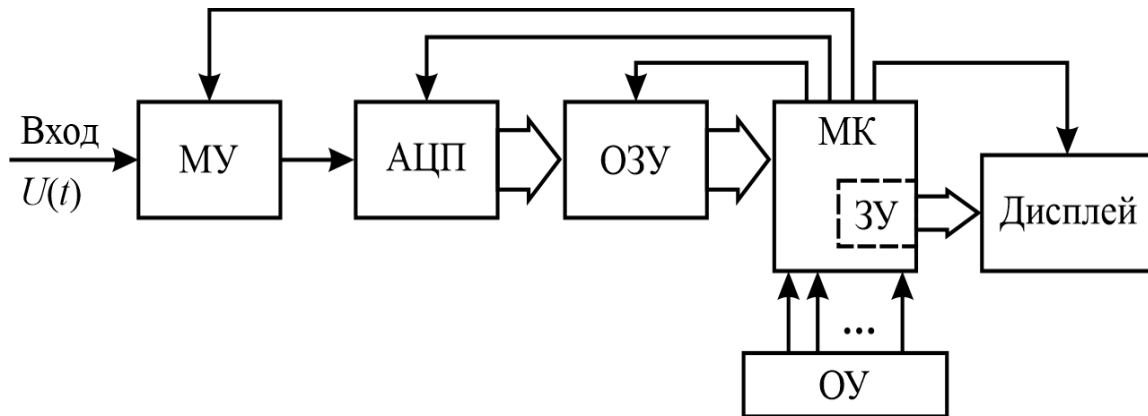


Рис. 6.8. Структурная схема цифрового осциллографа

Входное напряжение поступает на масштабирующее устройство МУ, которое изменяет его амплитуду в соответствии с динамическим диапазоном АЦП. Затем так же, как и в цифровом вольтметре, измеряемая аналоговая величина преобразуется в цифровой код с помощью АЦП. Скорость преобразования АЦП может значительно превышать скорость работы микроконтроллера МК, поэтому для временного хранения цифрового кода используется оперативное запоминающее устройство ОЗУ. При поступлении сигнала запуска из соответствующего устройства микроконтроллер переписывает данные из ОЗУ во внутреннее запоминающее устройство ЗУ, входящее в систему отображения, где и формируется массив осциллограммы. По команде МК массив осциллограммы с ЗУ поступает в систему управления дисплеем (обычно ЖК дисплей) и далее выводится на экран. Микроконтроллер выводит на экран и всю сопровождающую информацию, а также обрабатывает команды органов управления ОУ осциллографом.

6.4. Основные характеристики электроизмерительных приборов

Чувствительность и цена деления

Чувствительностью S прибора называется отношение линейного или углового перемещения указателя (стрелки) $d\alpha$ к изменению измеряемой величины dx , вызвавшему это перемещение:

$$S = \frac{d\alpha}{dx}. \quad (6.8)$$

Размерность чувствительности определяется характером определяемой величины x (например, чувствительность прибора к току, напряжению и т.д.).

Величина, обратная чувствительности,

$$C = \frac{1}{S} \quad (6.9)$$

называется *ценой деления* прибора. Она равна значению измеряемой величины, вызывающей отклонение указателя на одно деление шкалы прибора.

В общем случае цена деления представляет собой разность значений измеряемой величины для двух соседних меток шкалы. Цена деления зависит от верхнего x_{\max} и нижнего x_{\min} пределов измерений прибора и числа делений N , заключенных между этими пределами:

$$C = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{N}. \quad (6.10)$$

Пример. На рис. 6.9 приведена шкала прибора, предназначенного для измерения постоянного тока в пределах от 0 до 300 мА. Требуется определить цену деления и чувствительность прибора. Как видно из рисунка, между пределами 0 и 300 мА заключено 60 малых делений. Тогда цена деления такого прибора:

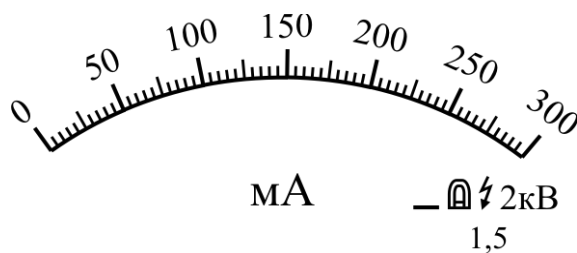


Рис. 6.9. Шкала миллиамперметра

$$C = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{60} = \frac{300 - 0}{60} = 5 \text{ мА/дел},$$

а его чувствительность $S = 1/C = 1/5 = 0,2$ дел/мА.

Пределы измерений

Значение измеряемой величины x_{\max} , при котором указатель прибора отклоняется до конца шкалы, называется пределом измерения данного прибора. Например, для миллиамперметра, шкала которого приведена на рис. 6.9, пределом измерения является ток величиной 300 мА.

Электроизмерительные приборы могут иметь несколько пределов измерений. В отличие от однопредельных приборов они имеют несколько входных клемм или оснащены соответствующими переключателями пределов. Такие приборы называются многопредельными, поскольку их электрическая схема предусматривает изменение интервалов измеряемой величины. Достоинство многопредельных приборов состоит в том, что они заменяют несколько однотипных приборов с различными пределами измерений.

Большинство многопредельных приборов имеют одну шкалу. В таких случаях нахождение измеряемой величины связано с пересчетом. Пересчет заключается в умножении отсчета по прибору, снятого в относительных единицах шкалы, на переводной коэффициент:

$$m = \frac{x_{\max}}{N},$$

где x_{\max} – максимальное значение величины, которое можно измерить на данном пределе (предел измерения); N – безразмерное число, стоящее против последнего деления прибора.

Пример. Амперметр имеет два предела измерения: 15 и 30 А. При этом его шкала отградуирована так, что против последнего деления стоит безразмерное число $N = 150$. Чему равно значение измеряемого тока, если на пределе 30 А указатель прибора отсчитывает 95 относительных единиц шкалы?

Переводной коэффициент:

$$m = \frac{x_{\max}}{N} = \frac{30}{150} = 0,2 \text{ А/отн.ед.}$$

Величина измеряемого тока

$$I = 95 \cdot 0,2 = 19 \text{ А.}$$

Иногда многопредельные приборы оснащаются несколькими шкалами, тогда отсчет измерения должен производиться по шкале, соответствующей выбранному пределу измерения.

Шунты и дополнительные сопротивления

Как уже отмечалось, электроизмерительные приборы могут иметь несколько пределов измерений. Это достигается использованием шунтов и дополнительных сопротивлений.

Шунтом называется сопротивление, подключаемое к амперметру параллельно (рис. 6.10).

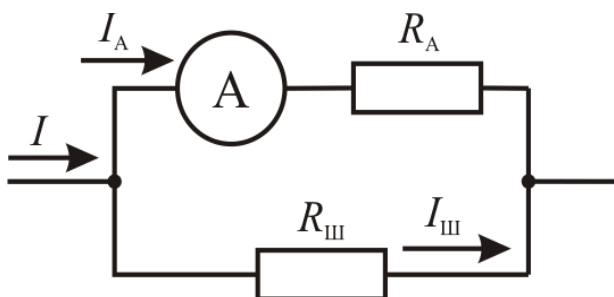


Рис. 6.10. Схема шунтирования амперметра

При шунтировании только часть тока I_A от измеряемого тока I ответвляется в прибор и непосредственно измеряется. Остальной ток $I_{ш}$ идет через шунт.

Пример. Имеется амперметр с внутренним сопротивлением R_A и пределом измерения тока I_A . Определить сопротивление шунта, обеспечивающего увеличение предела измерения тока в n раз.

Падения напряжения на амперметре и шунте одинаковы, так как они соединены параллельно. С учетом закона Ома

$$I_{ш}R_{ш} = I_A R_A .$$

Кроме того,

$$I = I_A + I_{ш}; \quad I = nI_A .$$

Решая систему уравнений, получаем

$$R_{ш} = \frac{R_A}{n-1} .$$

Следовательно, для расширения пределов измерения в n раз необходимо, чтобы сопротивление шунта было в $n-1$ раз меньше сопротивления прибора.

Дополнительным сопротивлением называется сопротивление, подключаемое к вольтметру последовательно (рис. 6.11).

При подключении дополнительного сопротивления только часть U_V измеряемого напряжения U приходится на вольтметр, поскольку остальная его часть $U_{ДС}$ падает на дополнительном сопротивлении $R_{ДС}$.

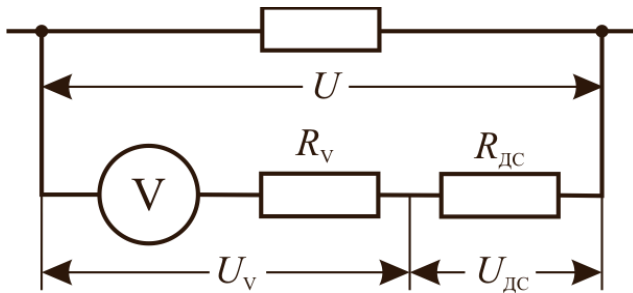


Рис. 6.11. Схема подключения дополнительного сопротивления к вольтметру

Пример. Имеется вольтметр с внутренним сопротивлением R_V и пределом измерения напряжения U_V . Определить значение дополнительного сопротивления, обеспечивающего увеличение предела измерения напряжения в n раз.

Через вольтметр и дополнительное сопротивление протекает один и тот же максимально допустимый ток I_{\max} . Тогда для участка цепи (рис. 6.11) справедливо равенство

$$U_V + U_{\text{дс}} = U,$$

где $U = nU_V$.

С учетом закона Ома

$$R_V I_{\max} + R_{\text{дс}} I_{\max} = nR_V I_{\max},$$

откуда

$$R_{\text{дс}} = (n - 1)R_V.$$

Следовательно, для расширения предела измерения вольтметра в n раз необходимо подключить к нему последовательно дополнительное сопротивление, в $n-1$ раз большее внутреннего сопротивления вольтметра.

Погрешность измерительных приборов

Качество средств и результатов измерения принято характеризовать указанием их погрешностей. Но так как характер проявления и причины появления погрешностей весьма разнообразны, то на практике установилось деление погрешностей на ряд разновидностей. Прежде всего, необходимо различать погрешности измерительных приборов и погрешность результата измерения.

Абсолютной погрешностью измерительного прибора (ИП) называется разность между действительным (точным) значением измеряемой величины x_0 и показанием прибора:

$$\Delta x = x - x_0. \quad (6.11)$$

Абсолютная погрешность ИП не может сама по себе служить показателем точности. Поэтому для характеристики точности вводится понятие *относительной погрешности* ИП, представляющей собой отношение абсолютной погрешности ИП к действительному значению измеряемой величины:

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0}. \quad (6.12)$$

Относительная погрешность ИП выражается в относительных единицах или процентах.

Эта очень наглядная характеристика точности не всегда годится для нормирования погрешности ИП, так как для многих приборов может изменяться от нуля до бесконечности. Поэтому используется ещё одна разновидность погрешности – *приведённая погрешность* ИП. Она определяется как отношение абсолютной погрешности к протяжённости диапазона измеряемой величины:

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{\Delta x}{x_{\text{к}} - x_{\text{н}}}, \quad (6.13)$$

где $x_{\text{к}}$ и $x_{\text{н}}$ – значения измеряемой величины в конце и начале шкалы соответственно. Если нулевая отметка находится вне шкалы, то $x_{\text{н}}$ принимается равным нулю. Приведённая погрешность удобна тем, что для многопредельных ИП она одинакова во всех диапазонах измерения.

У различных измерительных приборов характер проявления погрешности может быть различен. При этом погрешности отдельных экземпляров ИП могут отличаться друг от друга. Поэтому, чтобы оценить погрешность, вносимую прибором в результат измерения, пользуются *нормированными погрешностями* ИП. Под нормированными понимаются погрешности, являющиеся предельными для данного типа ИП. Характеристика, определяющая гарантированные границы значений погрешности ИП, называется «*класс точности измерительного прибора*».

Для указания классов точности не могут использоваться произвольные числа. Выраженные в процентах, они могут иметь значения: 6 – 4 – 2,5 – 1,5 – 1,0 – 0,5 – 0,2 – 0,1 – 0,05 и т.д. Приборы классов точности менее 0,5 % называются прецизионными и применяются в основном для точных лабораторных измерений. К техническим относятся приборы, значения классов точности которых лежат в пределах от 0,5 до 6 %. Приборы с погрешностью более 6 % считаются внеклассовыми.

Для определения класса точности погрешности ИП нормируются четырьмя различными способами.

а) ИП с погрешностью чувствительности

Если для измерительного прибора абсолютная погрешность Δx возрастает прямо пропорционально измеряемой величине, то такая погрешность называется погрешностью чувствительности (мультипликативной погрешностью), а класс точности определяется по нормированной относительной погрешности ИП:

$$\gamma_s = \frac{|\Delta_{\text{норм}} x|}{x_0}. \quad (6.14)$$

Однако данная зависимость не всегда справедлива, иначе такие приборы были бы наиболее совершенными. Поэтому на ИП с погрешностью чувствительности указываются границы диапазона, в пределах которого такая оценка остается справедливой.

Класс точности γ_s в этом случае указывается на шкале прибора в виде числа, заключенного в кружок и выраженного в процентах (например, $\textcircled{2,5}$).

б) ИП с погрешностью нуля

Если для измерительного прибора абсолютная погрешность Δx остается постоянной для любых значений измеряемой величины, то такая погрешность называется погрешностью нуля (аддитивной погрешностью), а класс точности определяется по нормированной приведённой погрешности ИП:

$$\gamma_0 = \frac{|\Delta_{\text{норм}} x|}{x_k - x_n}. \quad (6.15)$$

Для приборов этого типа относительная погрешность возрастает с уменьшением измеряемой величины, поэтому рабочий диапазон ограничен значением величины, при котором нормированная относительная погрешность ИП достигает некоторой предельной величины (например, 10 %). Измерения в начальной части шкалы таких приборов недопустимы.

Класс точности γ_0 в этом случае указывается на шкале прибора в виде числа, выраженного в процентах, без дополнительных обозначений (например, 2,5).

в) ИП со смешанной погрешностью

Если измерительный прибор имеет одновременно и погрешность усиления, и погрешность нуля, то связь между абсолютной погрешностью и измеряемой величиной становится более сложной. В этом случае класс точности задаётся не одним числом, а двумя: γ_n — нормированная

приведённая погрешность в нуле и γ_k – нормированная приведённая погрешность в конце диапазона.

Как и для ИП с погрешностью нуля, относительная погрешность возрастает с уменьшением измеряемой величины и рабочий диапазон ограничен. Однако рабочий диапазон ИП со смешанной погрешностью шире.

Класс точности в этом случае указывается на шкале прибора в виде дроби γ_n/γ_k , числа которой выражены в процентах (например, 1,5/2,5). Как правило, такой тип погрешности имеют цифровые вольтметры и другие высокоточные приборы.

г) ИП с резко неравномерной шкалой

Для ряда измерительных приборов погрешность не может быть нормирована рассмотренными способами, так как связь между погрешностью и измеряемой величиной является сложной. К приборам такого типа относятся, например, цифровые частотомеры и электронные омметры. Для этих приборов характерно наличие не только нижнего порога чувствительности, т.е. такой малой измеряемой величины, при которой относительная погрешность равна 100 %, но и верхнего порога чувствительности, когда при возрастании измеряемой величины относительная погрешность снова становится равной 100 %. Измерения на таких приборах проводятся только в средней части диапазона.

Для цифровых приборов класс точности задаётся тремя числами: Δ_0 – нижний порог, Δ_∞ – верхний порог и γ_s – погрешность чувствительности.

Для приборов, имеющих стрелочный указатель, класс точности прибора указывается как нормированная погрешность нуля по положению стрелки, т.е. в долях длины шкалы. При обозначении на шкале класс точности приводится в процентах и обозначается числом с галочкой (например, 2,5).

Погрешность результата измерения

Результат измерения имеет ценность только тогда, когда можно оценить его интервал неопределённости. Характеристикой интервала неопределённости является погрешность результата измерения. Любой результат измерений должен сопровождаться указанием его погрешности.

Погрешность результата прямого измерения зависит от многих факторов, но в первую очередь определяется погрешностью используемого измерительного прибора. Поэтому в первом приближении погрешность результата измерений можно принять равной нормированной погрешно-

сти, которой в данной точке диапазона измерений характеризуется измерительный прибор.

Вычисляться должна как абсолютная погрешность результата измерения $\Delta(x)$, так и относительная погрешность:

$$\varepsilon(x) = \frac{\Delta(x)}{x}, \quad (6.16)$$

где x – результат измерения.

При записи результата измерения абсолютная и относительная погрешности округляются. Допустимы два способа округления погрешности:

- 1) упрощённый – если первая значащая цифра погрешности 1, 2 или 3, то в записи погрешности оставляются две значащие цифры, а если первая значащая цифра погрешности 4 или более – то остается одна значащая цифра;
- 2) усложнённый – оставляемые значащие цифры погрешности должны принадлежать ряду 5 – 6 – 7 – 8 – 9 – 10 – 12 – 14 – 16 – 18 – 20 – 25 – 30 – 35 – 40 – 45. При этом погрешность округления погрешности более равномерна во всём диапазоне и не превышает 10 %.

Измеренное значение величины округляется до того же разряда, до которого округлена погрешность.

Правила вычисления абсолютной и относительной погрешностей зависят от вида класса точности измерительного прибора.

а) ИП с погрешностью чувствительности

Если класс точности γ_s указан в виде числа в кружке, то относительная погрешность результата измерения, выраженная в процентах, принимается равной классу точности ИП, а абсолютная находится из формулы (6.16):

$$\begin{aligned} \varepsilon(x) &= \gamma_s, \\ \Delta(x) &= \frac{\gamma_s x}{100 \%}. \end{aligned} \quad (6.17)$$

Пример. Вольтметром с классом точности $\textcircled{2,5}$ измерено напряжение $U = 220$ В. Привести результат измерения.

$$\begin{aligned} \varepsilon(U) &= \gamma_s = 2,5 \%, \\ \Delta(U) &= \frac{\gamma_s U}{100 \%} = \frac{2,5 \% \cdot 220 \text{ В}}{100 \%} = 5,5 \text{ В}. \end{aligned}$$

Результат измерения записывается в виде:

$$U = (220 \pm 6) \text{ В}, \quad \varepsilon = 2,5 \, \%.$$

б) ИП с погрешностью нуля

Если класс точности γ_0 указан в виде числа без дополнительных обозначений, то абсолютная погрешность результата измерения принимается равной приведённой погрешности ИП, а относительная находится из формулы (6.16):

$$\begin{aligned} \Delta(x) &= \frac{\gamma_0 (x_k - x_n)}{100 \, \%}, \\ \varepsilon(x) &= \frac{\Delta(x)}{x} 100 \, \% = \gamma_0 \frac{x_k - x_n}{x}. \end{aligned} \quad (6.18)$$

Пример. Милливольтметр со шкалой $0 \div 50$ мВ имеет класс точности 0,5. С помощью этого прибора измерено напряжение 23,5 мВ. Привести результат измерения.

$$\begin{aligned} \Delta(U) &= \frac{\gamma_0 (U_k - U_n)}{100 \, \%} = \frac{0,5 \, \% (50 - 0) \text{ мВ}}{100 \, \%} = 0,25 \text{ мВ}, \\ \varepsilon(U) &= \frac{\Delta(U)}{U} 100 \, \% = \frac{0,25 \text{ мВ}}{23,5 \text{ мВ}} 100 \, \% = 1,06 \, \%. \end{aligned}$$

Результат измерения записывается в виде:

$$U = (23,50 \pm 0,25) \text{ мВ}, \quad \varepsilon = 1,1 \, \%.$$

в) ИП со смешанной погрешностью

Если класс точности указан в виде двух чисел через дробь γ_n/γ_k , то сначала вычисляется относительная погрешность результата измерения, а абсолютная находится из формулы (6.16):

$$\begin{aligned} \varepsilon(x) &= \gamma_k + \gamma_n \left(\frac{x_k - x_n}{x} - 1 \right), \\ \Delta(x) &= \frac{\varepsilon(x)}{100 \, \%} x. \end{aligned} \quad (6.19)$$

Пример. Цифровой вольтметр с установленным пределом измерений 100 мВ имеет класс точности 1,5/2,5. С помощью этого прибора измерено напряжение 62,3 мВ. Привести результат измерения.

$$\varepsilon(U) = \gamma_k + \gamma_n \left(\frac{U_k - U_n}{U} - 1 \right) = 2,5 + 1,5 \left(\frac{100 - 0}{62,3} - 1 \right) = 3,4 \%,$$

$$\Delta(U) = \frac{\varepsilon(x)}{100 \% } U = \frac{3,4 \% }{100 \% } 62,3 \text{ мВ} = 2,1 \text{ мВ}.$$

Результат измерения записывается в виде:

$$U = (62,3 \pm 2,1) \text{ мВ}, \quad \varepsilon = 3,4 \%.$$

г) ИП с резко неравномерной шкалой

Если класс точности ИП указан в виде γ , то для определения погрешности результата измерения требуется знать формулу шкалы $l = f(x)$, т.е. зависимость положения стрелки от значения измеряемой величины. Тогда относительную погрешность результата измерения можно определить по формуле

$$\varepsilon(x) = \gamma \frac{L}{xf'(x)}, \quad (6.20)$$

где L – длина шкалы. Например, для электронного омметра положение стрелки прямо пропорционально напряжению U_x , поэтому формула шкалы соответствует выражению (6.7). Тогда погрешности могут быть найдены по формулам:

$$\begin{aligned} \varepsilon(R) &= \gamma \frac{(R_0 + R)^2}{R_0 R} = \gamma \frac{(1 + x)^2}{x}, \\ \Delta(R) &= \frac{\varepsilon(R)}{100 \% } R, \end{aligned} \quad (6.21)$$

где R_0 – множитель, указанный на переключателе диапазонов; $x = R/R_0$ – безразмерное число, отложенное на шкале прибора.

Пример. Электронный омметр с установленным множителем 10^4 Ом имеет класс точности $\underline{2,5}$. С помощью этого прибора измерено сопротивление $1,25 \cdot 10^4$ Ом. Привести результат измерения.

$$\begin{aligned} \varepsilon(R) &= \gamma \frac{(1 + x)^2}{x} = 2,5 \% \frac{(1 + 1,25)^2}{1,25} = 10,1 \%, \\ \Delta(R) &= \frac{\varepsilon(R)}{100 \% } R = \frac{10 \% }{100 \% } 1,25 \cdot 10^4 \text{ Ом} = 0,125 \cdot 10^4 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Результат измерения записывается в виде:

$$R = (12,5 \pm 1,3) \text{ кОм}, \quad \varepsilon = 10 \%.$$

7. Лабораторная работа «Изучение электроизмерительных приборов»

Цель работы: изучение устройства, принципа действия и характеристик основных электроизмерительных приборов, используемых в лабораторном практикуме; освоение методов проведения простейших измерений.

Приборы и принадлежности: вольтметр универсальный В7-26; блок резисторов; набор соединительных проводов.

Вольтметр универсальный В7-26

Вольтметр универсальный В7-26 предназначен для проведения измерений постоянного, переменного синусоидального напряжений и сопротивления.

Технические характеристики прибора

Вольтметр В7-26 обеспечивает:

- измерение постоянного напряжения в диапазоне от 30 мВ до 300 В с пределами измерений 0,3; 1; 3; 10; 30; 100 и 300 В;
- измерение синусоидальных напряжений в диапазоне от 200 мВ до 300 В с пределами измерений 1, 3, 10, 30, 100 и 300 В;
- измерение омического сопротивления в диапазоне от 10 Ом до 1000 МОм, который разбит на семь поддиапазонов со средней отметкой 100 Ом, 1, 10, 100 кОм, 1, 10, 100 МОм.

Погрешности измерений

При измерении напряжений приведенная погрешность прибора, выраженная в процентах от конечного значения установленного поддиапазона, не превышает 2,5 % для постоянного и 4,0 % для переменного токов.

При измерении омического сопротивления проводников тока приведенная погрешность, выраженная в процентах от длины рабочей части шкалы прибора, не превышает 2,5 %.

Подготовка прибора к работе

Перед включением прибора в сеть необходимо проверить механический нуль показывающего микроамперметра и при необходимости установить его корректором, расположенным на передней панели. После этого подключить вилку шнура питания в розетку сети и тумблером «СЕТЬ» включить прибор. О включении свидетельствует свечение индикаторной лампы.

Продолжительность времени установления рабочего режима (время «прогрева» прибора) составляет около 15 минут. По истечении этого времени поставить переключатель поддиапазонов в положение $0,3\bar{U}$, а переключатель рода работ – в положение $-U$ или $+U$, после чего установить указатель (стрелку) прибора на нулевую отметку шкалы $=V$ ручкой установки нуля $\bar{U}\bar{\Omega}$. Перед установкой нуля клеммы U и $*$ замкнуть накоротко.

После этого перевести переключатель рода работ в положение r_x и проверить нулевое положение указателя прибора при замкнутых накоротко клеммах r_x и $*$. Затем разомкнуть клеммы и установить указатель в положение ∞ на шкале Ω ручкой « ∞ » Ω . Затем перевести переключатель поддиапазонов в положение 1, переключатель рода работ – в положение U_{\sim} и установить указатель на нулевую отметку шкалы $\sim 1\text{ V}$ соответствующей ручкой установки нуля «0» $1\text{ V } U_{\sim}$. Перед установкой нуля клеммы U и $*$ должны быть замкнуты накоротко.

После проведения вышеуказанных операций прибор готов к работе.

Проведение измерений

При измерении постоянных напряжений проверить установку нуля прибора на поддиапазоне $0,3\text{ В}$ и затем, выбрав нужный поддиапазон измерения, подать измеряемое напряжение на клеммы U и $*$. Входные клеммы прибора изолированы от корпуса. Это позволяет производить измерения постоянного напряжения в цепях, где точки подключения прибора имеют потенциал относительно «земли».

При измерении переменных синусоидальных напряжений поставить переключатель рода работ в положение U_{\sim} , проверить установку нуля прибора на поддиапазоне 1 В . После этого выбрать нужный поддиапазон измерения и подать измеряемое напряжение на клеммы U и $*$.

При измерении сопротивлений проверить установку 0 и ∞ омметра на выбранном предварительно поддиапазоне измерения. Затем, подключив неизвестное сопротивление к клеммам r_x и $*$, произвести измерение его величины.

Блок резисторов

Блок резисторов выполнен в виде самостоятельного макета, состоящего из шести сопротивлений, соединенных по унифицированной схеме, представленной на рис. 7.1. Характерные точки схемы оснащены входными гнездами, что расширяет число возможных вариантов подключения макета к источнику питания, а также облегчает процесс измерения сопротивлений токов и напряжений на различных участках цепи.

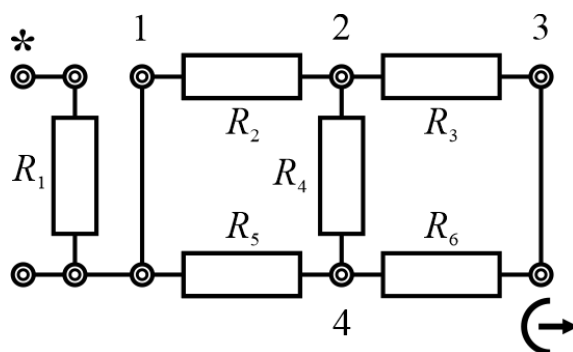


Рис. 7.1. Блок резисторов

Порядок выполнения работы

Для выполнения работы подготовьте таблицу.

№ п/п	Наименование прибора	Система прибора	Класс точности	Предел (или множитель) шкалы	Число делений шкалы	Цена деления шкалы	Измеренное значение	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
1									
2									
...									

Задание 1. Измерение сопротивления

1. Включите вольтметр В7-26 в сеть и после 15-минутного прогрева подготовьте его к работе. Проверьте установку 0 и ∞ омметра.

2. Переключатель режима установите в r_x . Клемму * на вольтметре соедините с клеммой * блока резисторов.

3. Произведите измерение полного сопротивления схемы блока резисторов при его подключении к омметру (клемма r) в точках 1, 2, 3, 4. Переключатель диапазонов 10^x при измерении устанавливается так, чтобы стрелка находилась как можно ближе к середине шкалы.

4. Оцените погрешности проведенных измерений по формулам (6.21).

Задание 2. Измерение напряжения

1. Произведите подключение схемы блока резисторов к источнику постоянного тока, который размещен в корпусе универсального вольтметра В7-26. Выходные клеммы источника тока установлены на задней панели прибора. Один из вариантов подключения схемы показан на рис. 6.11. Входные гнезда блока резистора, обозначенные как (\rightarrow и $*$, соединяются с соответствующими клеммами источника тока. Измерение напряжения производится на участках схемы между $*$ и точками, обозначенными цифрами 1, 2, 3, 4.

2. С помощью вольтметра В7-26 произведите измерения напряжения на различных участках схемы. В процессе измерений следует учитывать, что источник постоянного тока и измерительная часть вольтметра В7-26 имеют общее заземление.

3. Оцените погрешности измерений по формулам (6.18).

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Электроизмерительные приборы и их виды.
2. Объясните устройство и принцип работы приборов магнито-электрической системы.
3. Объясните устройство и принцип работы приборов электромагнитной системы.
4. Объясните устройство и принцип работы электронного вольтметра.
5. Объясните устройство и принцип работы электронного омметра.
6. Объясните устройство и принцип работы электронного осциллографа.
7. Объясните устройство и принцип работы цифровых измерительных приборов.
8. Что такое чувствительность и цена деления, как их найти?
9. Каковы особенности подключения шунтов и дополнительных сопротивлений к микроамперметру при использовании его в качестве измерителя тока и напряжения?
10. Какими величинами характеризуется погрешность измерительных приборов?
11. Что такое класс точности измерительного прибора? На какие типы делятся приборы по классам точности?
12. Что такое погрешность результата измерения? Как ее найти для приборов: а) с погрешностью чувствительности; б) с погрешностью нуля; в) со смешанной погрешностью; г) с резко неравномерной шкалой?

8. Лабораторная работа «Измерение удельного сопротивления проволоки методом амперметра – вольтметра»

Цель работы: изучение метода измерения сопротивления проволоки и определение её удельного сопротивления.

Приборы и принадлежности: установка для определения удельного сопротивления проволоки ФПМО1 (далее – установка), микрометр.

Метод эксперимента

Для измерения сопротивлений применяются различные методы. Наиболее простым из них является метод амперметра – вольтметра, основанный на измерении тока через резистор, напряжения на нем и применении закона Ома (2.7) для нахождения сопротивления. Подключить амперметр и вольтметр к исследуемому сопротивлению можно двумя способами (см. Cx1 и Cx2 на рис. 8.1). Здесь R – переменное сопротивление (реостат) для регулировки тока в цепи; R_A – сопротивление амперметра; R_V – сопротивление вольтметра; R_X – исследуемое сопротивление.

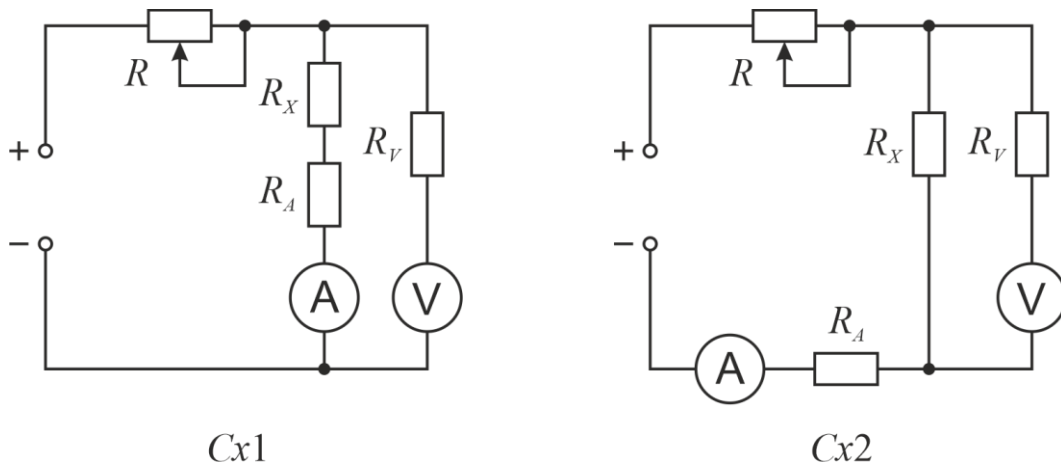


Рис. 8.1. Схемы для измерения сопротивления методом амперметра – вольтметра

Пусть U_i и I_i – показания вольтметра и амперметра. Рассчитанные по этим показаниям величины исследуемого сопротивления $R_1 = U_1 / I_1$ для схемы Cx1 и $R_2 = U_2 / I_2$ для схемы Cx2 будут отличаться друг от друга и от искомого R_X вследствие того, что сопротивления реальных прибо-

ров конечны (для идеального амперметра сопротивление равно нулю, а для идеального вольтметра – бесконечности).

В схеме Cx1 амперметр измеряет силу тока, проходящего через R_X , но вольтметр измеряет суммарное напряжение на R_X и на амперметре. Поэтому сопротивление, найденное по формуле (2.7), будет завышенным:

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = R_X + R_A. \quad (8.1)$$

В схеме Cx2 амперметр измеряет не величину прошедшего через R_X тока, а сумму токов, проходящих через R_X и вольтметр R_V . Поэтому сопротивление, найденное по формуле (2.7), будет заниженным:

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{R_X R_V}{R_X + R_V}. \quad (8.2)$$

Выразим из формул (8.1) и (8.2) искомое сопротивление R_X .

Для схемы Cx1:

$$R_X = R_1 \left(1 - \frac{R_A}{R_1}\right). \quad (8.3)$$

Для схемы Cx2:

$$R_X = R_2 \frac{1}{1 - R_2 / R_V} \approx R_2 \left(1 + \frac{R_2}{R_V}\right). \quad (8.4)$$

Как видно из выражений (8.3) и (8.4), при подсчете искомого сопротивления по приближенной формуле возникает методическая погрешность:

$$\Delta R_{Mi} = R_i - R_X. \quad (8.5)$$

Методические погрешности возникают из-за несовершенства метода измерения, упрощения расчетных формул, неучета ряда факторов, неизученности явлений. Поскольку в практике измерений подсчет сопротивлений часто производится по приближенной формуле $R_X \approx U / I$, то необходимо знать, какую схему следует выбрать для того, чтобы методическая погрешность была минимальна. Как видно из выражений (8.3) и (8.4), пользоваться схемой Cx1 нужно для больших сопротивлений ($R_X \gg R_A$), а схемой Cx2 – для малых сопротивлений ($R_X \ll R_V$).

Расчет по приближенной формуле можно производить, если модуль методической погрешности меньше величины инструментальной погрешности, определяемой классом точности амперметра и вольтметра:

$$\Delta R_{Ii} = R_i \sqrt{\left(\frac{\gamma_A}{100\%} \cdot \frac{I_{\max}}{I} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_V}{100\%} \cdot \frac{U_{\max}}{U} \right)^2}, \quad (8.6)$$

где γ_A и γ_V – классы точности, указанные в процентах на шкалах амперметра и вольтметра соответственно, I_{\max} и U_{\max} – максимальные показания на шкалах, I и U – измеренные значения тока и напряжения.

Описание и принцип работы установки

На рис. 8.2 изображен общий вид установки. Она состоит из основания 1 с регулируемыми опорами 2, к которому крепятся блок питания 24 и стойка 6.

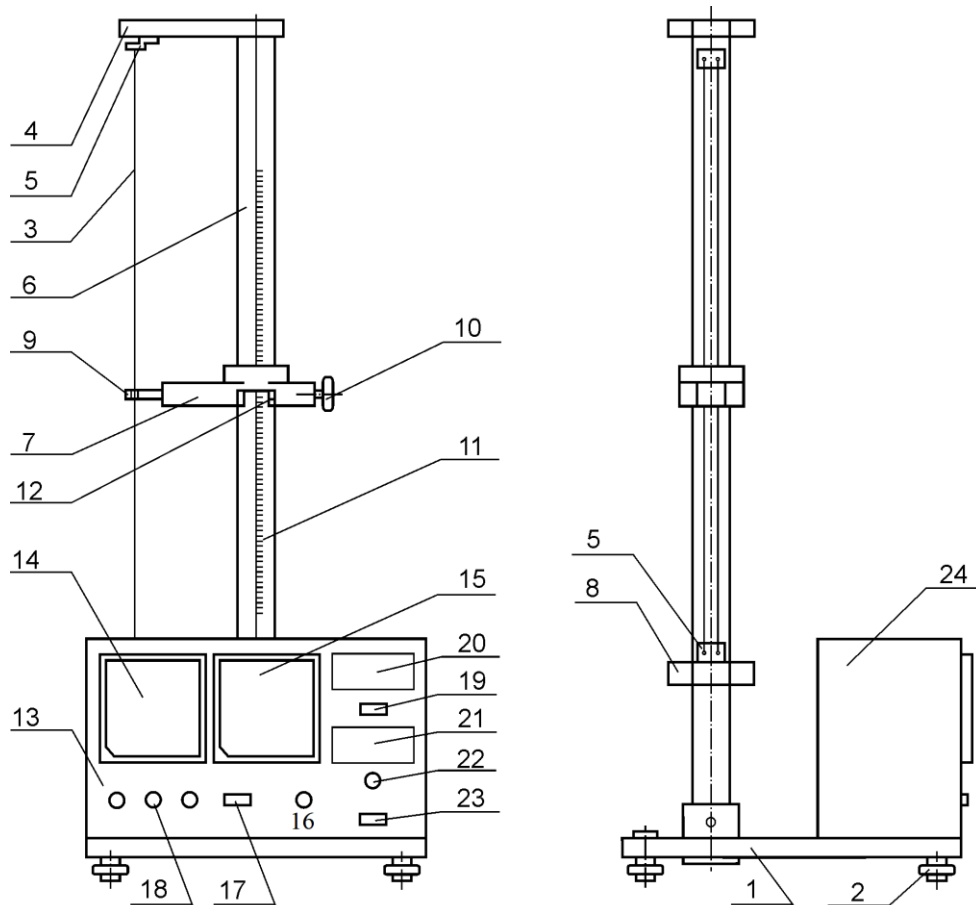


Рис. 8.2. Общий вид установки

На стойке 6 установлены два неподвижных кронштейна 4 и 8, один подвижный кронштейн 7; по всей его длине нанесены метки с ценой деления линейки 11, равной 1 мм. Между неподвижными кронштейнами 4 и 8 с помощью крепежных винтов 5 закрепляется проволока 3. Гальванический контакт с проволокой 3 осуществляет токосъемный – контакт 9, а визирная метка 12 указывает длину измеряемого участка. На лицевой панели 13 блока питания 24 расположены миллиамперметр 15, ручка регулировки тока 16, вольтметр 14, кнопки включения сети 23, рода работ 19, 17, лампочка сигнализации 22, два рисунка схемы измерения сопротивления 20, 21 и клеммы 18 для подключения моста постоянного тока.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Исследование метода измерения сопротивления

1. Установите подвижный кронштейн 7 в среднее положение на стойке 6, ослабив винт 10.
2. Включите тумблер «Сеть», при этом должна загореться индикаторная лампочка.
3. Кнопки рода работ 17, 19 включите в положение «В – А» и «Сх1».
4. Установите ручкой регулировки тока 16 значение тока амперметра.
5. Снимите показания тока I_1 с амперметра, напряжения U_1 – с вольтметра.
6. Определите приближенное сопротивление R_1 проволоки по формуле (2.7), уточненное сопротивление R_x по формуле (8.3), методическую погрешность ΔR_{M1} по формуле (8.5) и инструментальную погрешность $\Delta R_{И1}$ по формуле (8.6). Сделайте вывод о возможности нахождения сопротивления по приближенной формуле.
7. Включите кнопку рода работ в «Сх2» и снимите показания тока I_2 с амперметра, напряжения U_2 – с вольтметра.
8. Определите приближенное сопротивление R_2 проволоки по формуле (2.7), уточненное сопротивление R_x по формуле (8.4), методиче-

скую погрешность ΔR_{M2} по формуле (8.5) и инструментальную погрешность ΔR_{I2} по формуле (8.6). Сделайте вывод о возможности нахождения сопротивления по приближенной формуле.

9. На основании сравнения методических погрешностей ΔR_{M1} и ΔR_{M2} сделайте вывод, какую из схем нужно использовать в данных условиях?

Задание 2. Измерение удельного сопротивления проволоки

1. Измерьте микрометром диаметр D проволоки.

2. Включите кнопку рода работ в «Сх2»

3. Установите подвижный кронштейн 7 в положение $l = 10$ см, ручкой регулировки тока 16 установите силу тока $I = 150$ мА, определите показания вольтметра U и занесите их в табл. 8.1.

Таблица 8.1

l , см	10	20	30	40
U , В				
R , Ом				
ΔR , Ом				
δR , %				

4. Проведите измерения напряжения U по п. 3 для других положений кронштейна 7, поддерживая силу тока $I = 150$ мА.

5. Рассчитайте сопротивление проволоки R по формуле (2.7), погрешность сопротивления ΔR по формуле (8.6) и относительную погрешность сопротивления $\delta R = \Delta R/R$.

6. Постройте график зависимости $R = f(l)$ по данным табл. 8.1 с учетом погрешности и убедитесь в линейном характере этой зависимости, то есть справедливости формулы (2.5).

7. По данным измерения сопротивления табл. 8.1, имеющим наименьшую относительную погрешность δR , рассчитайте удельное сопротивление ρ по формуле

$$\rho = R \frac{\pi D^2}{4l}. \quad (8.7)$$

8. Оцените относительную и абсолютную погрешности измерения удельного сопротивления по формулам

$$\delta\rho = \sqrt{\delta R^2 + 4\delta D^2 + \delta l^2}, \quad \Delta\rho = \rho \cdot \delta\rho, \quad (8.8)$$

где $\delta D = \Delta D/D$ и $\delta l = \Delta l/l$ – относительные погрешности диаметра и длины проволоки, абсолютные погрешности ΔD и Δl принять равными цене деления соответствующего измерительного прибора.

9. По значению ρ определите с помощью справочных данных табл. 8.2, из какого материала изготовлена проволока.

Таблица 8.2

Удельное электрическое сопротивление ρ
при $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$

Материал	ρ , Ом·мм ² /м	Материал	ρ , Ом·мм ² /м
Серебро	0,016	Манганин (сплав)	0,43
Медь	0,017	Константан (сплав)	0,50
Золото	0,024	Ртуть	0,96
Алюминий	0,028	Нихром (сплав)	1,1
Вольфрам	0,055	Фехраль (сплав)	1,3
Железо	0,10	Графит	13
Свинец	0,21	Фарфор	1019
Никелин (сплав)	0,4	Эбонит	1020

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что называется силой тока и плотностью тока?
2. Запишите закон Ома в дифференциальной и интегральной формах.
3. Что называется электрическим сопротивлением проводника и от чего оно зависит?
4. Дайте определение удельного сопротивления проводника.
5. Каковы основные недостатки измерения электрического сопротивления по методу амперметра – вольтметра?

9. Лабораторная работа «Определение удельного сопротивления проводников методом мостика Уитстона»

Цель работы: изучение основ классической теории электропроводности металлов, определение удельного сопротивления различных проводников мостовым методом.

Приборы и принадлежности: экспериментальный макет, в состав которого входят: источник тока, набор исследуемых проводников, реохорд, эталонные сопротивления, гальванометр.

Метод эксперимента

В измерительной технике широко используются различные мостовые схемы. Одним из простейших измерительных мостов является *мостик Уитстона*, принципиальная электрическая схема которого показана на рис. 9.1.

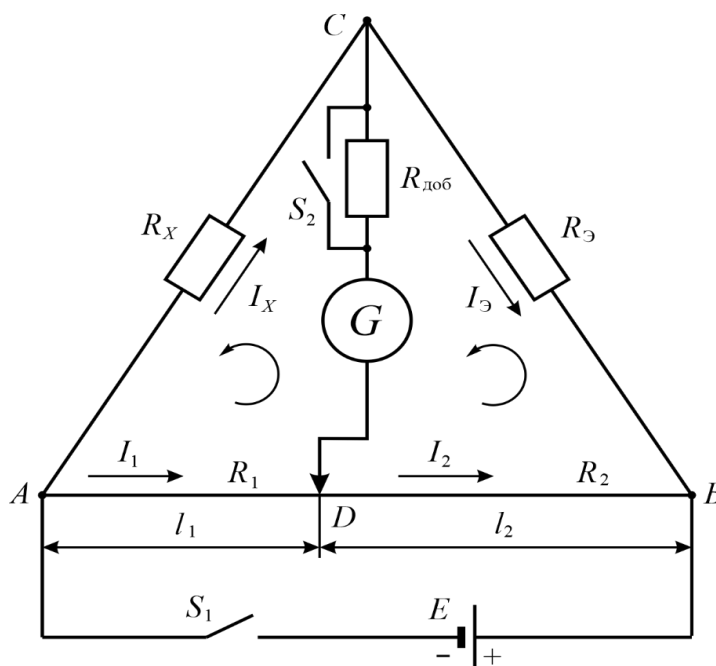


Рис. 9.1. Электрическая схема установки

Он состоит из реохорда – специальной градуированной линейки с зажимами на концах, между которыми натянута однородная по составу и сечению проволока (участок AB); вдоль проволоки может перемещаться скользящий контакт D . Схема мостика также содержит: измеряемое сопротивление R_x , эталонное сопротивление $R_{\text{э}}$, нуль-гальванометр G , добавочное сопротивление в цепи гальванометра $R_{\text{доб}}$, ключ (кнопку) S_2 и источник постоянного тока E , включаемый в цепь ключом S_1 .

При замыкании ключа S_1 в цепи пойдёт ток, разветвляясь в узлах A , B , C и D . Подбором сопротивления $R_{\text{э}}$ и изменением соотношения между сопротивлениями плеч реохорда R_1 и R_2 можно добиться отсутствия тока в цепи гальванометра G . Применяв второе правило Кирхгофа для контуров $ACDA$ и $DCBD$, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} I_1 R_1 - I_X R_X = 0, \\ I_2 R_2 - I_{\text{э}} R_{\text{э}} = 0. \end{cases} \quad (9.1)$$

Согласно первому правилу Кирхгофа $I_1 = I_2$ и $I_X = I_{\text{э}}$. Тогда

$$R_X = R_{\text{э}} \frac{R_1}{R_2}. \quad (9.2)$$

Сопротивления плеч реохорда R_1 и R_2 можно выразить через длины l_1 и l_2 , удельное сопротивление ρ_p и сечение S_p проволоки реохорда:

$$R_1 = \rho_p \frac{l_1}{S_p}, \quad R_2 = \rho_p \frac{l_2}{S_p}.$$

Откуда

$$R_X = R_{\text{э}} \frac{l_1}{l_2} = R_{\text{э}} \frac{l_1}{L_p - l_1} = R_{\text{э}} \frac{l_1/L_p}{1 - l_1/L_p}, \quad (9.3)$$

где L_p – длина реохорда.

Из формулы (9.3) видно, что искомое сопротивление определяется только отношением длины плеча реохорда к длине самого реохорда. Поэтому удобно использовать безразмерную величину показания реохорда $l = l_1/L_p$. Тогда получаем расчетную формулу:

$$R_X = R_{\text{э}} \frac{l}{1-l}. \quad (9.4)$$

Абсолютная погрешность сопротивления может быть найдена по формуле расчета косвенной погрешности:

$$\Delta R_X = \sqrt{\left(\frac{\partial R_X}{\partial R_{\text{э}}} \Delta R_{\text{э}} \right)^2 + \left(\frac{\partial R_X}{\partial l} \Delta l \right)^2} \approx R_X \frac{\gamma}{l(1-l)}, \quad (9.5)$$

где величина $\gamma = \Delta l_1/L_p$ называется классом точности реохорда и для используемого в работе экспериментального макета составляет 0,5 %.

Искомое удельное сопротивление проволоки ρ_x связано с его сопротивлением R_x зависимостью

$$R_x = \rho_x \frac{L}{S}, \quad (9.6)$$

где L – длина; S – площадь сечения исследуемого проводника, откуда получаем формулу для расчёта ρ_x :

$$\rho_x = \frac{\pi d^2}{4L} R_x, \quad (9.7)$$

где d – диаметр исследуемой проволоки.

Абсолютная погрешность удельного сопротивления может быть найдена по формуле:

$$\Delta\rho = \rho_x \sqrt{4\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_x}{R_x}\right)^2} \approx \rho_x \sqrt{4\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_x}{R_x}\right)^2}, \quad (9.8)$$

где Δd – абсолютная погрешность диаметра проволоки (указана на экспериментальном макете).

Порядок выполнения работы

1. Включить экспериментальный макет тумблером «Сеть».
2. Установить переключатель «Материал» в положение «1» (нихром).
3. Установить подвижный контакт реохорда в среднее положение.
4. Установить переключатель « R_x , Ом» в положение «10», добиться баланса моста с помощью перемещения подвижного контакта реохорда. Показания гальванометра G должны быть в пределах ± 1 ед. Если сбалансировать мост не удастся, установить переключатель « R_x , Ом» в положение «100» и повторить балансировку.
5. Добиться точной балансировки моста при нажатой кнопке «Чувствительность».
6. Занести величину эталонного сопротивления R_x и положение скользящего контакта реохорда l в таблицу.
7. Провести такие же измерения для других материалов: манганина, константана, никелина, железа, меди.
8. Используя формулы (9.4) и (9.5), рассчитать сопротивление R_x каждого образца и его абсолютную погрешность ΔR_x .
9. Используя формулы (9.7) и (9.8), рассчитать удельное сопротивление ρ_x каждого образца и его абсолютную погрешность $\Delta\rho_x$.
10. Рассчитать относительную погрешность $\Delta\rho_x/\rho_x$ измерения удельного сопротивления.

Материал	R_x , Ом	l	$1-l$	R_x , Ом	ΔR_x , Ом	ρ_x , 10^{-8} Ом·м	$\Delta \rho_x$, 10^{-8} Ом·м	$\frac{\Delta \rho_x}{\rho_x}$, %
1. Нихром								
2. Манганин								
3. Константан								
4. Никелин								
5. Железо								
6. Медь								

Вопросы и задания для самоконтроля

1. В чём заключается мостовой метод определения сопротивлений? Каковы достоинства мостовых методов измерения?

2. Показать, что наибольшая точность измерения сопротивлений с помощью мостика Уитстона получается при среднем положении скользящего контакта реохорда.

3. Используя положения классической теории электропроводности, получить закон Ома в дифференциальной форме.

4. Сформулировать и записать закон Ома для участка цепи, для замкнутой цепи и для неоднородного участка цепи.

5. Что такое удельное сопротивление и удельная проводимость проводника? Как они определяются и от чего зависят? В каких единицах измеряются?

6. Получить формулу для расчёта сопротивления проводника на основе правил Кирхгофа.

7. Почему тепловое движение электронов не может привести к возникновению электрического тока?

8. Как классическая теория электропроводности металлов объясняет зависимость сопротивления металлов от температуры?

Библиографический список

1. Физическая энциклопедия / под ред. А. М. Прохорова. Т. 1 – 5. – М.: Сов. энциклопедия; Большая российская энциклопедия, 1988 – 1998.
2. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А. М. Прохоров. Ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. – М.: Сов. энциклопедия, 1984. – 944 с., ил., 2 л. цв. ил.
3. Детлаф А. А. Курс физики: учеб. пособие для студентов высших технических учебных заведений / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 9-е изд., стер. – М.: Академия, 2014. – 720 с.
4. Трофимова Т. И. Курс физики: учеб. пособие для инженерно-технических специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 20-е изд., стер. – М.: Академия, 2014. – 560 с.
5. Савельев И. В. Курс физики: учебник. Т. 2: Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. – М.: Лань, 2008. – 480 с.
6. Иродов И. Е. Электромагнетизм. Основные законы: учебник. – М.: Бинном. Лаборатория знаний, 2000. – 352 с.
7. Сивухин Д. В. Общий курс физики: учебник. Т. 3: Электричество. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 656 с.
8. Калашников Н. П., Смондырев М. А. Основы физики.: учеб. пособие. Т. 1. – М.: Лаборатория знаний, 2017. – 545 с.
9. Информационно-измерительная техника и технологии: учебник для вузов / В.И. Калашников, С.В. Нефедов, А.Б. Путилин и др.; под ред. Г.Г. Раннева. – М.: Высш. школа, 2002.
10. Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 2001.
11. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985.
12. Основы метрологии и электрические измерения / под ред. Е.М. Душина. – Л.: Энергоиздат, 1987.
13. Вольтметр универсальный В7-26 (техническое описание и инструкция по эксплуатации).

Оглавление

Введение	1
1. Характеристики электрического тока	3
2. Закон Ома	4
3. Правила Кирхгофа	5
4. Работа и мощность тока. Закон Джоуля – Ленца	7
5. Классическая теория электропроводности металлов	8
6. Электроизмерительные приборы	12
6.1. Электромеханические измерительные приборы	12
6.2. Электронные аналоговые измерительные приборы	16
6.3. Цифровые измерительные приборы	20
6.4. Основные характеристики электроизмерительных приборов	23
7. Лабораторная работа «Изучение электроизмерительных приборов» ..	33
8. Лабораторная работа «Измерение удельного сопротивления проволо-	
ки методом амперметра-вольтметра»	37
9. Лабораторная работа «Определение удельного сопротивления	
проводников методом мостика Уитстона»	43
Библиографический список	47