

Федеральное агентство по образованию

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**Кафедра физики**

**А.М. Кириллов**

**ФИЗИКА  
В КОНСПЕКТАХ И ПРИМЕРАХ**

**Часть 4**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. КОЛЕБАНИЯ  
И ВОЛНЫ. ОПТИКА. МИКРОФИЗИКА**

**Учебно-методическое пособие для поступающих в ТУСУР**

**2007**

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Электрический ток
  - Основные понятия и определения
  - Электролиз
  - Электрическое сопротивление
    - Последовательное и параллельное соединения проводников
  - Закон Ома
    - Закон Ома для участка цепи
    - Закон Ома для полной (замкнутой) цепи
  - Соединения источников тока
  - Правила Кирхгофа
  - Измерение тока и разности потенциалов (напряжения) в цепи. Шунтирование электроизмерительных приборов
  - Переменный электрический ток (действующие напряжения и сила тока)
  - Закон Джоуля-Ленца
    - Коэффициент полезного действия (КПД) источника
    - Мощность переменного тока
  - Основные законы и формулы
  - Примеры решения задач
2. Электромагнетизм
  - Основные понятия и определения
  - Силовое действие магнитного поля
  - Электромагнитная индукция
  - Самоиндукция
  - Основные законы и формулы
  - Примеры решения задач
3. Колебания и волны
  - Основные понятия и определения
  - Механические колебания
  - Электромагнитные колебания
  - Переменный электрический ток
  - Волны
  - Основные законы и формулы
  - Примеры решения задач
4. Оптика
  - Основные понятия и определения
  - Законы отражения и преломления света
  - Собирающая линза
  - Рассеивающая линза
  - Оптические системы
  - Дифракционная решетка
  - Основные законы и формулы
  - Примеры решения задач
5. Микрофизика
  - Основные понятия и определения
  - Внешний фотоэффект
  - Связь массы и энергии
  - Атомные ядра
  - Основные законы и формулы
  - Примеры решения задач
6. Контрольные работы

# 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

## Основные понятия и определения

**Электрический ток** – упорядоченное движение электрических зарядов. Направление тока совпадает с направлением движения положительных зарядов и противоположно направлению движения отрицательных зарядов.

**Проводник** – тело способное пропускать через себя электрические заряды (электрический ток) благодаря наличию в нём свободных электрических зарядов (носителей тока).

**Диэлектрик (изолятор)** – тело, непр пропускающее через себя электрические заряды (электрический ток).

**Сила тока** – отношение заряда  $\Delta q$ , проходящего через поперечное сечение проводника за промежуток времени  $\Delta t$ , к этому интервалу:

$$I = \Delta q / \Delta t . \quad (1.1)$$

Единица измерения силы электрического тока – Ампер:  $[I]=A$ .

**Постоянный ток** – электрический ток, сила которого не изменяется со временем ( $I=\text{const}$ ).

Силы электростатического взаимодействия между зарядами приводят к такому их перераспределению в проводнике, при котором электрическое поле в проводнике исчезает, а потенциалы во всех его точках выравниваются. Поэтому поле электростатических сил не может являться причиной постоянного электрического тока. Постоянный ток может быть осуществлен только при условии, что напряженность электрического поля в проводнике отлична от нуля и не изменяется с течением времени. Цепи постоянного тока должны быть замкнутыми, а на свободные заряды, кроме электростатических сил, должны действовать силы неэлектрической природы, называемые *сторонними силами*.

**Узел электрической цепи** – любая точка разветвления цепи, в которой сходится не менее трех проводников с током.

**Ветвь электрической цепи** – участок цепи, расположенный между двумя узлами.

**Контур электрической цепи** – замкнутый участок цепи, образованный ветвями и узлами электрической цепи.

**Электродвижущая сила (ЭДС)  $\mathcal{E}$**  – отношение работы  $A_{\text{ст}}$ , совершаемой сторонними силами по перемещению заряда  $q$  вдоль цепи, к значению этого заряда:

$$\mathcal{E} = A_{\text{ст}} / q . \quad (1.2)$$

Единица измерения ЭДС – Вольт:  $[\mathcal{E}]=V$ .

**Источники ЭДС или источники тока** – устройства, создающие в цепи постоянную разность потенциалов (для поддержания постоянного тока) и в которых перенос заряда осуществляют сторонние силы.

**Однородный участок цепи** – участок цепи, на котором на носители тока *не действуют* сторонние силы (отсутствуют источники тока).

**Неоднородный участок цепи** – участок цепи, на котором на носители тока *действуют* сторонние силы (присутствуют источники тока).

**Напряжение** (между точками поля)  $U$  – отношение работы  $A$ , совершаемой любым электрическим полем при перемещении заряда  $q$  из одной точки поля в другую, к значению этого заряда:

$$U = A / q . \quad (1.3)$$

Единица измерения напряжения – Вольт:  $[U]=V$ .

**Плотность электрического тока** – величина, характеризующая распределение электрического тока по поперечному сечению проводника и равная отношению силы тока  $I$  к площади поперечного сечения проводника  $S$ :

$$j = I/S. \quad (1.4)$$

Единица измерения плотности электрического тока – Ампер на квадратный метр:  $[j]=\text{А/м}^2$ .

## Электролиз

**Электролиты** – вещества, растворы которых проводят электрический ток. Растворение электролита приводит к появлению ионов, способных перемещаться и приводить к появлению электрического тока.

**Электролиз** – процессы электрохимического окисления – восстановления, происходящие на погруженных в электролит электродах (анод и катод) при прохождении электрического тока.

**Закон Фарадея (электролиза):** масса  $m$  вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна заряду  $\Delta q$ , прошедшему через электролит:

$$m = k \cdot \Delta q, \quad (1.5)$$

где  $k$  – электрохимический эквивалент вещества ( $[k]=\text{кг/Кл}$ ).

## Электрическое сопротивление

**Электрическое сопротивление**  $R$  – величина, характеризующая противодействие электрической цепи (или её участка) электрическому току. Сопротивление обусловлено преобразованием электрической энергии в другие виды энергии. Причина же в рассеянии электронов на различных дефектах проводника. В том, что электрическое сопротивление металлов является следствием взаимодействия электронов проводимости с различными дефектами, убеждает, например, тот факт, что удельное сопротивление кристаллов металлов сильно зависит от наличия в них примесей. Например, введение 1% примеси марганца увеличивает удельное сопротивление меди в три раза.

Единица измерения электрического сопротивления – Ом:  $[R]=\text{Ом}$ .

Сопротивление  $R$  зависит от свойств проводника и его геометрических размеров:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1.6)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление вещества,  $l$  – длина проводника,  $S$  – площадь поперечного сечения.

**Удельное электрическое сопротивление**  $\rho$  – характеристика электрического сопротивления вещества. Удельное сопротивление – сопротивление цилиндрического образца вещества сечением  $S=1 \text{ м}^2$  и длиной  $l=1 \text{ м}$ .

Единица измерения удельного электрического сопротивления – Ом-метр:  $[\rho]=\text{Ом}\cdot\text{м}$ .

**Зависимость пути от времени имеет параболический характер. На Вашем графике этого не видно (более того, Вы построили прямую линию)!!! сопротивления от температуры.**

С изменением температуры  $t$  (по шкале Цельсия) удельное сопротивление  $\rho$  изменяется:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (1.7)$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление проводника при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления (особый для каждого металла). У чистых металлов  $\alpha \approx 273^{-1} \text{ К}^{-1}$ .

Возрастание удельного сопротивления объясняется тем, что с ростом температуры увеличивается амплитуда колебаний ионов кристаллической решетки металлов и возрастает вероятность их столкновения с электронами проводимости (свободными электронами – переносчиками тока). При столкновении с ионами электроны теряют скорость направленного движения (рассеиваются). Это и приводит к возрастанию удельного сопротивления. Кроме того, при повышении температуры возрастает число

дефектов в кристаллической решетке (причина – тепловые колебания ионов). Это также приводит к возрастанию удельного сопротивления кристалла.

### Электрическая проводимость

Величина

$$G = 1/R, \quad (1.8)$$

обратная электрическому сопротивлению, называется *электрической проводимостью* проводника. Единица проводимости – сименс:  $[G]=\text{См}$ . 1 См – проводимость участка электрической цепи сопротивлением 1 Ом.

Величина, обратная удельному сопротивлению,

$$\gamma = 1/\rho \quad (1.9)$$

называется *удельной электрической проводимостью* вещества проводника. Ее единица – сименс на метр:  $[\gamma]=\text{См/м}$ .

### Последовательное и параллельное соединения проводников

Проводники в электрических цепях могут соединяться последовательно и параллельно. При последовательном соединении проводников конец первого проводника соединяется с началом второго и т.д. (рис. 1.1). При этом сила тока  $I$  одинакова во всех проводниках, а напряжение  $U$  на концах всей цепи равно сумме напряжений на всех последовательно включенных проводниках.

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_N = \sum_{i=1}^N U_i. \quad (1.10)$$

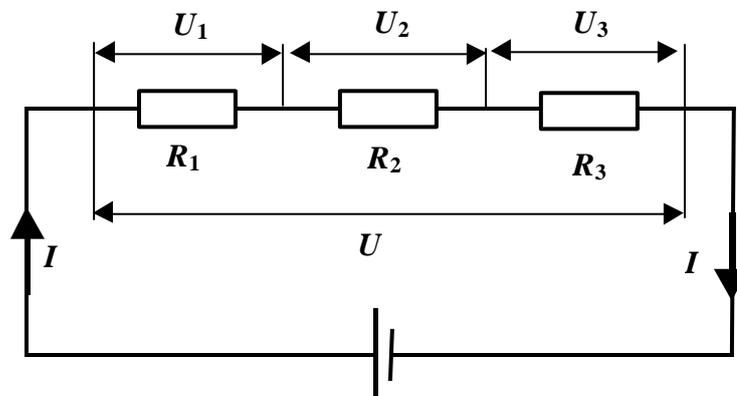


Рисунок 1.1 – Последовательное соединение проводников

Общее электрическое сопротивление *последовательно* соединенных проводников равно сумме электрических сопротивлений всех проводников:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N = \sum_{i=1}^N R_i. \quad (1.11)$$

При параллельном соединении проводников их начала и концы имеют общие точки подключения к источнику тока (рис. 1.2). При этом напряжение  $U$  на всех проводниках одинаково, а сила тока  $I$  в неразветвленной цепи равна сумме сил токов во всех параллельно включенных проводниках.

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N = \sum_{i=1}^N I_i . \quad (1.12)$$

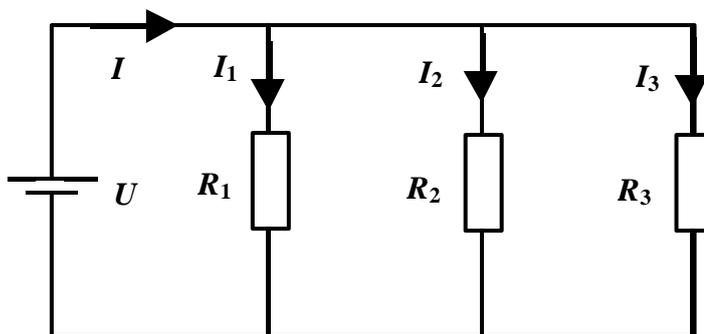


Рисунок 1.2 – Параллельное соединение проводников

При *параллельном* включении проводников общая проводимость  $G$  цепи равна сумме проводимостей  $G_i$  соответствующих проводников с сопротивлениями  $R_i$ :

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_N = \sum_{i=1}^N G_i . \quad (1.13)$$

Из выражений (1.8) и (1.13) следует, что

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N} = \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{R_i} \right) , \quad (1.14)$$

где  $R$  – общее сопротивление параллельно соединенных проводников.

Параллельный способ включения широко применяется для подключения осветительных электрических ламп и различных электроприборов к электрической сети.

## Закон Ома

### Закон Ома для участка цепи

Георг Ом установил, что *отношение напряжения  $U_R$  между концами металлического однородного проводника (т.е. проводника в котором не действуют сторонние силы), являющегося участком электрической цепи, к силе тока  $I$  в цепи есть величина постоянная:*

$$\frac{U_R}{I} = R = \text{const} , \quad (1.15)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление рассматриваемого участка цепи.

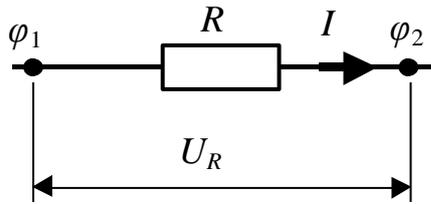


Рисунок 1.3 – Иллюстрация к закону Ома для участка цепи

Экспериментально установленную зависимость силы тока  $I$  от напряжения  $U_R$  и электрического сопротивления  $R$  участка цепи называют **законом Ома для участка цепи**:

$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}, \quad (1.16)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  - электрические потенциалы на концах участка цепи.

*Сила тока  $I$  прямо пропорциональна напряжению  $U$  и обратно пропорциональна электрическому сопротивлению  $R$  участка цепи.*

**Закон Ома для полной (замкнутой) цепи**

*Сила тока в электрической цепи прямо пропорциональна электродвижущей силе  $\varepsilon$  источника тока и обратна пропорциональна сумме электрических сопротивлений внешнего  $R$  и внутреннего  $r$  участков цепи:*

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (1.17)$$

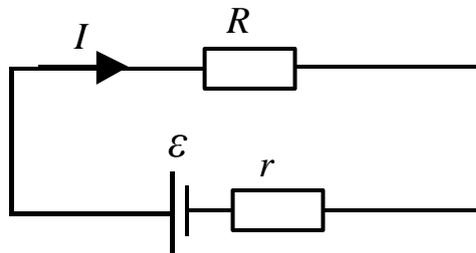


Рисунок 1.4 – Иллюстрация к закону Ома для полной цепи

**Следствия из закона Ома для полной цепи**

1. Если внутренне сопротивление источника тока  $r$  мало по сравнению с внешним сопротивлением  $R$ , то оно не оказывает заметного влияния на силу тока в цепи. При этом напряжение на зажимах источника приблизительно равно ЭДС:

$$U = IR \approx \varepsilon.$$

2. Когда внешнее сопротивление цепи стремится к нулю ( $R \rightarrow 0$ ) - при коротком замыкании, сила тока в цепи определяется внутренним сопротивлением источника и принимает максимальное значение:

$$I_{\max} = \frac{\varepsilon}{r}. \quad (1.18)$$

3. При разомкнутой цепи, когда  $R \rightarrow \infty$  (сопротивление внешнего участка цепи бесконечно велико) и  $I=0$ , напряжение источника тока равно его ЭДС, или ЭДС источника определяется разностью потенциалов на его клеммах:

$$\varepsilon = U = \varphi_2 - \varphi_1.$$

## Соединения источников тока

На практике несколько источников электрической энергии соединяются в группу – батарею источников электрической энергии. Соединение в батарею может быть последовательное, параллельное и смешанное.

### Последовательное соединение

При последовательном соединении положительный полюс предыдущего источника соединяется с отрицательным полюсом последующего (рис. 1.5).

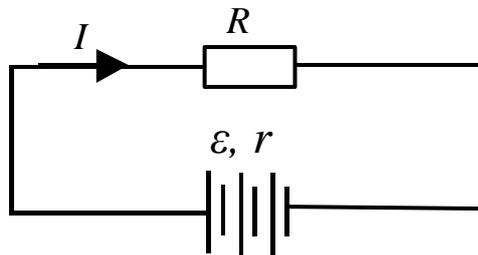


Рисунок 1.5 – Последовательное соединение источников тока

Полная ЭДС цепи равна алгебраической сумме ЭДС отдельных элементов, а внутреннее сопротивление батареи равно сумме сопротивлений всех источников:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \sum_i \varepsilon_i, \\ r &= \sum_i r_i. \end{aligned} \quad (1.19)$$

### Параллельное соединение

При параллельном соединении источников все их положительные полюсы присоединены к одному концу проводника, а отрицательные – к другому (рис. 1.6).

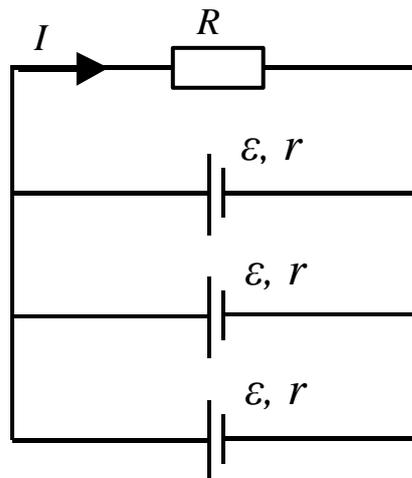


Рисунок 1.6 – Параллельное соединение источников тока

Полная ЭДС цепи (всей батареи) равна ЭДС одного источника:

$$\varepsilon_{\bar{o}} = \varepsilon, \quad (1.20)$$

а внутреннее сопротивление батареи равно (согласно правилу параллельного соединения)

$$r_{\bar{o}} = r/n, \quad (1.21)$$

где  $n$  – число параллельно соединенных источников.

Параллельное соединение источников тока применяется в тех случаях, когда нужно усилить ток во внешней цепи, не изменяя напряжения, причем сопротивление внешней цепи мало по сравнению с сопротивлением одного источника.

## Правила Кирхгофа

Правила Кирхгофа облегчают решение разветвленных цепей.

### Первое правило Кирхгофа (правило узлов)

*Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:*

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \quad (1.22)$$

где  $n$  – число проводников, сходящихся в узле.

Условно принято, что токи, текущие к узлу, считаются положительными, а токи, текущие от узла, отрицательными.

Например, для рисунка 1.7 первое правило Кирхгофа запишется так:

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0.$$

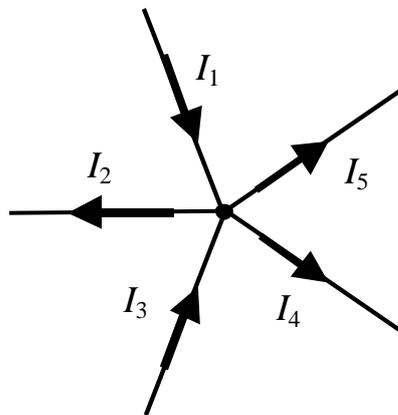


Рисунок 1.7 – Узел токов

### Второе правило Кирхгофа (правило контуров)

*В любом замкнутом контуре, выделенном в электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов  $I_i$  на соответствующие сопротивления  $R_i$  (т.е. сумма падений напряжений на сопротивлениях) равна алгебраической сумме всех электродвижущих сил  $\varepsilon_k$  в этом контуре:*

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^m \varepsilon_k. \quad (1.23)$$

При суммировании соблюдаются следующие правила:

- 1) токи считаются положительными, если они совпадают с условно выбранным направлением обхода контура (отрицательным в противном случае);
- 2) ЭДС считается положительной, если она способствует протеканию тока в направлении выбранного обхода контура (направление обхода совпадает с переходом от отрицательного полюса к положительному), и отрицательной в противном случае.

Рассмотрим применение правила контуров на примере контура, представленного на рисунке 1.8.

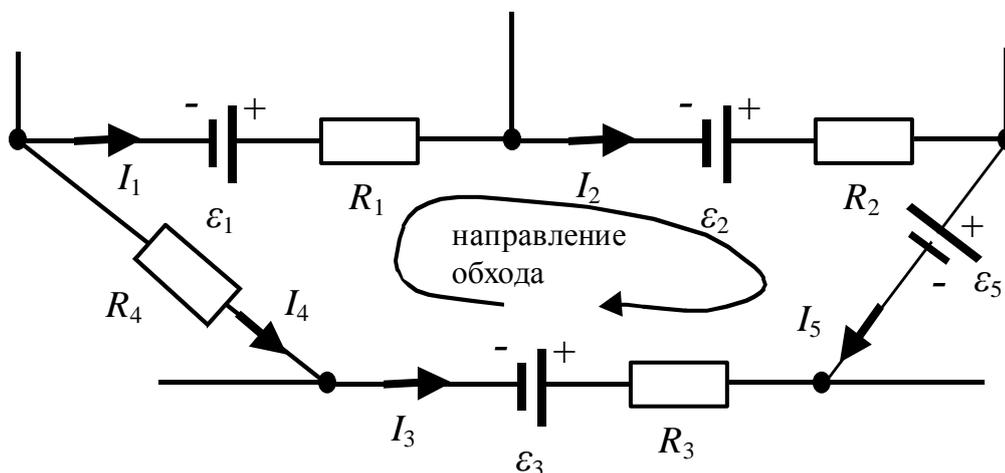


Рисунок 1.8 – Контур, выделенный из разветвленной цепи

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_4 R_4 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3 - \varepsilon_5.$$

## Измерение тока и разности потенциалов (напряжения) в цепи. Шунтирование электроизмерительных приборов

**Амперметр** – прибор для измерения силы электрического тока.

Силу электрического тока в цепи измеряют *амперметром*, который включается в цепь последовательно по отношению к тому участку, в котором измеряется ток (рис. 1.9).

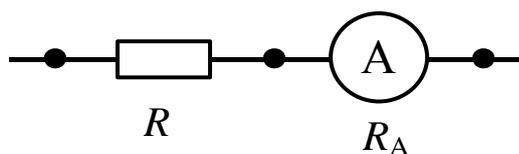


Рисунок 1.9 – Измерение силы тока

Т.к. сам амперметр обладает сопротивлением  $R_A$ , то при его включении сопротивление всей цепи возрастает, а ток в ней уменьшается в соответствии с законом Ома. Чем меньше сопротивление амперметра, тем меньше изменяется ток в цепи при включении в нее амперметра и тем точнее его показания. Следовательно, сопротивление амперметра должно быть очень малым.

Любой амперметр рассчитан на измерение сил токов до некоторого максимального значения  $I_A$ , т.е. имеет верхний предел измерений. Для измерения токов, больших, чем те, на которые рассчитан амперметр, *параллельно* ему включают резистор  $R_{ш}$ , называемый *шунтом* (рис. 1.10).

**Шунт** – проводник, присоединяемый параллельно амперметру для увеличения предела его измерений.

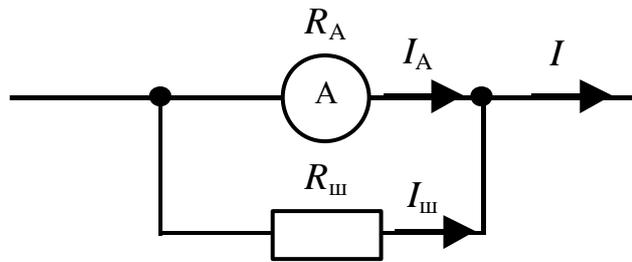


Рисунок 1.10 – Шунтирование амперметра

Сопротивление шунта в несколько раз меньше, чем собственное сопротивление амперметра  $R_A$ , поэтому большая часть измеряемой силы тока  $I$  пройдет через шунт. Через амперметр должен идти ток, не превышающий  $I_A$ , причем эта сила тока меньше измеряемой силы тока  $I$  в  $n$  раз:

$$I_A = I/n.$$

Следовательно, цена деления амперметра (нижний предел измерений) возрастет в  $n$  раз.

Нужное сопротивление шунта можно рассчитать, применяя правила параллельного соединения проводников. При параллельном соединении напряжение на шунте  $U_{ш}$  и амперметре  $U_A$  одинаково  $U_{ш} = U_A$ , т.е.

$$I_{ш}R_{ш} = I_A R_A. \quad (*)$$

Сила тока  $I$ , измеряемая в цепи, равна:

$$I = I_A + I_{ш} = I_A \cdot n. \quad (**)$$

Решая систему из двух уравнений (\*) и (\*\*), получим. Что сопротивление шунта равно:

$$R_{ш} = \frac{R_A}{n-1}. \quad (1.24)$$

**Вольтметр** – прибор для измерения электрического напряжения.

Вольтметр включается в цепь параллельно тому участку цепи, на котором измеряется напряжение (рис. 1.11).

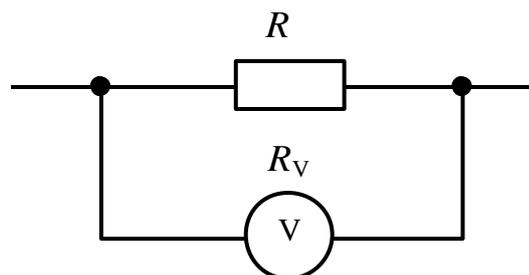


Рисунок 1.11 – Измерение напряжения

Вольтметр обладает сопротивлением  $R_V$ . После его включения в цепь сопротивление всей цепи уменьшается, а ток в ней увеличивается. Следовательно, сопротивление вольтметра должно быть достаточно большим по сравнению с сопротивлением участка цепи, на котором измеряется напряжение. При этом ток в вольтметре будет мал и не внесет заметных искажений в измеряемое напряжение.

Любой вольтметр рассчитан на предельное напряжение  $U_V$ . Для расширения пределов измерения напряжений вольтметра пользуются добавочными сопротивлениями (шунтами)  $R_{ш}$ , которые присоединяют последовательно вольтметру (рис. 1.12).

**Дополнительное сопротивление** – проводник, присоединяемый последовательно с вольтметром для увеличения предела его измерений.

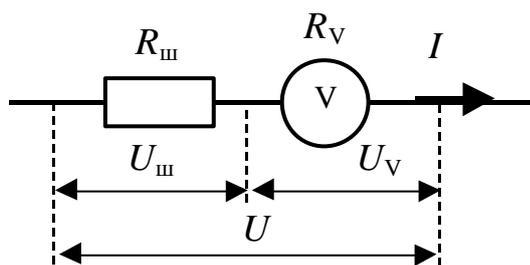


Рисунок 1.12 – Шунтирование вольтметра

Величину добавочного сопротивления  $R_{ш}$ , необходимого для измерения напряжений в  $n$  раз больших, чем те, на которые рассчитан прибор, найдем согласно правилам последовательного соединения проводников и закона Ома. Пусть измеряемое напряжение в  $n$  раз больше напряжения, на которое рассчитан вольтметр,. Тогда

$$I = \frac{U_v}{R_v} = \frac{U}{R_{ш} + R_v} = \frac{U_v \cdot n}{R_{ш} + R_v}. \quad (*)$$

Из выражения (\*) следует, что

$$R_{ш} = (n - 1) \cdot R_v. \quad (1.25)$$

## Переменный электрический ток (действующие напряжение и сила тока)

**Переменный ток** – ток, изменяющийся во времени по гармоническому закону.

**Период переменного тока** – наименьший промежуток времени, через который значения силы тока и напряжения повторяются.

Переменный ток представляет собой вынужденные электромагнитные колебания, происходящие с частотой  $\nu$  (циклической частотой  $\omega = 2\pi\nu$ ), совпадающей с частотой вынуждающей ЭДС (напряжения). ЭДС (напряжение) меняется во времени по гармоническому закону:

$$U(t) = U_m \sin \omega t, \quad (1.26)$$

где  $U$  – мгновенное значение напряжения;  $U_m$  – амплитуда напряжения (т.е. максимальное значение напряжения).

Сила переменного тока в цепи также меняется по гармоническому закону:

$$I(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.27)$$

где  $I(t)$  – мгновенное значение силы тока;  $I_m$  – амплитуда силы тока (т.е. максимальное значение силы тока);  $\varphi$  – сдвиг (разность) фаз между колебаниями тока и напряжения (ЭДС).

Поскольку сила и напряжение (ЭДС) переменного тока во времени изменяются и их средние значения за период при синусоидальном токе равны нулю, то они не могут быть характеристиками переменного тока. В качестве характеристик переменного тока принимают *эффективные*, или *действующие*, значения этих величин, полученные при

сопоставлении среднего теплового действия переменного тока с тепловым действием постоянного тока соответствующей силы.

**Действующим**, или **эффективным**, значением силы переменного тока называется сила такого постоянного тока, который в данном проводнике выделяет такую же энергию, что и переменный ток за то же время.

Действующее значение силы переменного тока  $I$  определяется величиной, равной квадратному корню из среднего за период значения квадрата силы тока:

$$I = \sqrt{\langle I^2(t) \rangle}.$$

В случае гармонического тока действующее значение силы тока связано с амплитудным значением силы тока соотношением:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (1.28)$$

Действующее значение переменного напряжения (ЭДС) определяются аналогично:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (1.29)$$

Амперметр и вольтметр переменного тока измеряют именно действующие значения силы тока и напряжения.

## Закон Джоуля-Ленца

**Работа тока** – работа сил электрического поля, создающего упорядоченное движение заряженных частиц в проводнике (т.е. электрический ток).

Работа, совершаемая электрическим полем по перемещению заряда  $q$  на участке цепи, равна

$$A = q \cdot U.$$

Согласно выражению (1.1) и закону Ома (1.15):

$$A = I \cdot U \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t, \quad (1.30)$$

где  $I$  – сила тока на рассматриваемом участке цепи,  $U$  – напряжение на участке цепи,  $R$  – сопротивление участка цепи,  $t$  – время прохождения тока по участку цепи.

**Мощность электрического тока** при прохождении его по проводнику с сопротивлением  $R$  равна работе, совершаемой током за единицу времени:

$$P = \frac{A}{t} = I \cdot U = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}. \quad (1.31)$$

**Полная мощность**, развиваемая источником тока с ЭДС  $\varepsilon$  и внутренним сопротивлением  $r$ , когда во внешней цепи включена нагрузка с сопротивлением  $R$ , определяют по формуле:

$$P_{\Sigma} = I \cdot \varepsilon = I^2 \cdot (R + r) = \frac{\varepsilon^2}{R + r}. \quad (1.32)$$

Полная мощность идет на выделение тепла во внешнем и внутреннем сопротивлении.

**Полезная мощность** – мощность выделяемая во внешнем сопротивлении, с учетом закона Ома для полной цепи (1.17) равна:

$$P_{\text{полез}} = I \cdot U = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R = \frac{\varepsilon^2 \cdot R}{(R + r)^2}. \quad (1.33)$$

Она используется в электронагревательных и осветительных приборах (лампах накаливания).

**Рассеиваемая (теряемая) мощность** – мощность выделяемая на внутреннем сопротивлении  $r$  источника тока равна:

$$P_{\text{тер}} = I^2 \cdot r = \frac{\varepsilon^2 \cdot r}{(R + r)^2}. \quad (1.34)$$

Мощность тока во все цепи  $P_{\text{общ}}$  при любом соединении равна сумме мощностей  $P_i$  на отдельных участках цепи:

$$P_{\text{общ}} = \sum_i P_i. \quad (1.35)$$

Работа электрического поля приводит к нагреванию проводника, если на участке цепи под действием электрического поля не совершается механическая работа и не происходят химические превращения веществ. Поэтому энергия (количество теплоты), выделяемая на данном участке цепи за время  $t$ , равна работе электрического тока:

$$Q = A.$$

Количество теплоты, выделяющееся проводником при нагревании его током, определяют по закону Джоуля-Ленца:

$$Q = I \cdot U \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t. \quad (1.36)$$

Количество теплоты, выделяемое проводником с током равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения тока по проводнику.

**Коэффициент полезного действия (КПД) источника:**

$$\eta = \frac{P_{\text{полез}}}{P_{\Sigma}} = \frac{I^2 R}{I^2 (R + r)} = \frac{R}{R + r} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{P_{\text{полез}}}{P_{\Sigma}} = \frac{I \cdot U}{I \cdot \varepsilon} = \frac{U}{\varepsilon}. \quad (1.37)$$

**Мощность переменного тока.**

Мгновенная мощность переменного тока

$$P(t) = U(t) \cdot I(t). \quad (1.38)$$

Средняя мощность переменного тока

$$\langle P \rangle = U \cdot I = U_m \cdot I_m / 2. \quad (1.39)$$

По своему тепловому действию цепь переменного тока с амплитудными значениями напряжения  $U_m$  и силы тока  $I_m$  эквивалентна цепи постоянного тока, сила тока и напряжение которого совпадают с действующими значениями силы тока и напряжения переменного тока (1.28)-(1.29).

## Основные законы и формул

Таблица 1.1 Основные законы и формулы

Название закона (формулы)	Математическая запись закона, формула
Закон электролиза	$m = kq$
Электрическое сопротивление	$R = \rho \frac{l}{S}$
Зависимость электрического сопротивления от температуры	$\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$ $\rho = \rho_0 \alpha T$
Сопротивление последовательно соединённых проводников	$R = R_1 + R_2 + \dots + R_N = \sum_{i=1}^N R_i$
Сопротивление параллельно соединённых проводников	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$
Закон Ома для участка цепи	$I = \frac{U_R}{R} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}$
Закон Ома для полной цепи	$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$
Ток короткого замыкания	$I_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{r}$
ЭДС и внутреннее сопротивление батареи, последовательно соединённых источников тока	$\mathcal{E} = \sum_i \mathcal{E}_i,$ $r = \sum_i r_i .$
ЭДС и внутреннее сопротивление батареи, параллельно соединённых источников тока	$\mathcal{E}_\sigma = \mathcal{E}$ $r_\sigma = r/n$
Первое правила Кирхгофа	$\sum_{k=1}^n I_k = 0$
Второе правило Кирхгофа	$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^m \mathcal{E}_k$
Шунтирование амперметра	$\begin{cases} I_{III} R_{III} = I_A R_A \\ I = I_A + I_{III} = I_A \cdot n \end{cases} \Rightarrow R_{III} = \frac{R_A}{n-1}$
Шунтирование вольтметра	$I = \frac{U_V}{R_V} = \frac{U}{R_{III} + R_V} = \frac{U_V \cdot n}{R_{III} + R_V} \Rightarrow R_{III} = (n-1) \cdot R_V$

Действующие напряжения и сила переменного тока	$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$
Работа электрического тока	$A = q \cdot U = I \cdot U \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t$
Мощность электрического тока	$P = \frac{A}{t} = I \cdot U = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$
Полная мощность	$P_{\Sigma} = I \cdot \varepsilon = I^2 \cdot (R + r) = \frac{\varepsilon^2}{R + r}$
Полезная мощность	$P_{\text{полез}} = I \cdot U = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R = \frac{\varepsilon^2 \cdot R}{(R + r)^2}$
Рассеиваемая (теряемая) мощность	$P_{\text{тер}} = I^2 \cdot r = \frac{\varepsilon^2 \cdot r}{(R + r)^2}$
Закон Джоуля-Ленца	$Q = I \cdot U \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t$
Коэффициент полезного действия (КПД) источника	$\eta = \frac{P_{\text{полез}}}{P_{\Sigma}} = \frac{I^2 R}{I^2 (R + r)} = \frac{R}{R + r} \quad \text{или}$ $\eta = \frac{P_{\text{полез}}}{P_{\Sigma}} = \frac{I \cdot U}{I \cdot \varepsilon} = \frac{U}{\varepsilon}.$
Мгновенная мощность переменного тока	$P(t) = U(t) \cdot I(t)$
Средняя мощность переменного тока	$\langle P \rangle = U \cdot I = U_m \cdot I_m / 2$

## Задачи

### Электролиз

1. К электродам гальванической ванны приложено напряжение 50 В. При хромировании ванна потребляет мощность 1 кВт. Определить в граммах массу хрома, выделяющегося на катоде за 15 минут. Электрохимической эквивалент хрома равен 0,18 мг/Кл. [3,24]

### Плотность электрического тока

2. Электромотор рулевой машинки автопилота самолёта рассчитан на 27 В и потребляет мощность 1620 Вт. Определить в мм<sup>2</sup> минимальную площадь сечения подводящих проводов, если допустимая плотность тока в них 6 А/мм<sup>2</sup>. [10]

### Удельное сопротивление

3. На катушку намотано 10 м провода с площадью поперечного сечения 0,5 мм<sup>2</sup>. Найти в мкОм·м удельное сопротивление сплава, из которого изготовлен провод, если сопротивление провода постоянному току равно 2000 Ом. [100]

### Зависимость сопротивления от температуры

4. Для определения температурного коэффициента сопротивления меди на катушку медной проволоки подавали одно и то же напряжение. При погружении этой катушки в тающий снег сила тока была 14 мА, а при опускании в кипяток сила тока стала 10 мА. Найти по этим данным температурный коэффициент меди. [0,004]

### Последовательное и параллельное соединения проводников

5. Из двенадцати одинаковых прямых проволочных проводников с сопротивлениями  $R=4$  Ом изготовлен куб. Определить сопротивление между двумя противоположными вершинами, принадлежащими одной грани куба. [3]

### Закон Ома для участка цепи

6. Определить в СИ величину заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника сопротивлением 12 Ом за 50 с, если к его концам приложено напряжение 6 В. [25]

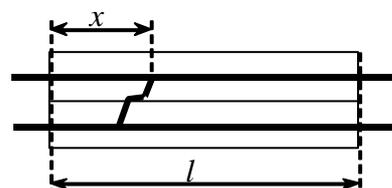
### Закон Ома для полной (замкнутой) цепи

7. Элемент с э.д.с. 2,1 В и внутренним сопротивлением 0,2 Ом соединён с реостатом. Определить в СИ силу тока в реостате, если падение напряжения на нём составляет 2 В. [0,5]

8. Конденсаторная батарея состоящая из двух последовательно соединенных конденсаторов с ёмкостями  $C_1=3$  мкФ и  $C_2=2$  мкФ, подключена для зарядки к источнику питания с ЭДС 15 В. К этому же источнику параллельно с батареей подключено активное сопротивление. В конце зарядки напряжение на конденсаторах равно  $U_1$  и  $U_2$ , а сила тока через источник равна  $I_1$ . Если сопротивление замкнуть, то через некоторое время через источник будет течь постоянный ток, равный  $3I_1$ . Определить в СИ величину  $U_1$ . [4]

9. В двухпроводной линии длиной  $l=3,6$  км на некотором расстоянии  $x$  от ее начала произошло частичное нарушение изоляции. Для поиска места нарушения провели следующие три измерения.

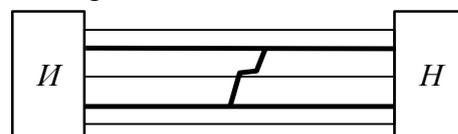
- Входное сопротивление при разомкнутом выходе – 9 Ом.
- Входное сопротивление при замкнутом накоротко выходе – 6 Ом.
- Выходное сопротивление при разомкнутом входе – 12 Ом.



Определить в км расстояние  $x$ . [1,2]

10. К одному концу двухпроводной линии передачи электроэнергии подсоединён источник постоянного напряжения  $I$ , а к другому – нагрузка  $H$  с сопротивлением 40 Ом. Сопротивление каждого провода линии равно 25 Ом. В линии произошло

повреждение изоляции, в результате чего ток через источник возрос в 2 раза, а ток через нагрузку упал в 8 раз. Найти в СИ сопротивление изоляции в месте повреждения. [3,2]



11. Можно ли две лампочки мощностью 35 Вт и 75 Вт, рассчитанные на напряжение 127 В, включить последовательно в сеть с напряжением 220 В, если допустимое перенапряжение не более 10%? Если да, то ответ **1**, если нет, ответ **0**. [0]

12. Вольтамперная характеристика электрической дуги задается выражением  $U = a/I$ , где  $U$  - напряжение дуги в вольтах,  $I$  - ток дуги в амперах,  $a = 16$  В·А. Определить в СИ силу тока в цепи, если электроды дуги подключить к источнику с э.д.с. 80 В последовательно с резистором сопротивлением 100 Ом. [0,4]

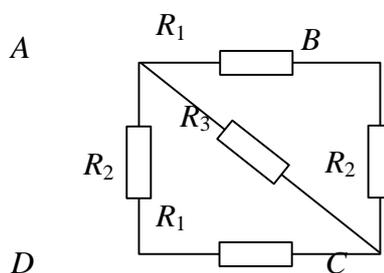
### Соединения источников тока. Зарядка аккумуляторов

13. Сопротивление внешней цепи (нагрузки) для аккумуляторной батареи равно 3 Ом. Батарея состоит из восьми *одинаковых* аккумуляторов. Если аккумуляторы соединить в *две одинаковые параллельные* группы, то на нагрузке выделяется такая же мощность, как и при *последовательном* соединении всех аккумуляторов. Определить в СИ внутреннее сопротивление одного аккумулятора. [0,75]

14. Напряжение в сети зарядной станции аккумуляторов равно 13 В. Внутреннее сопротивление аккумулятора, поставленного на зарядку, составляет 0,4 Ом, а его остаточная э.д.с. равна 11 В. Найти отношение мощности, расходуемой станцией, к мощности, идущей на нагревание аккумулятора. Внутреннее сопротивление аккумулятора в процессе зарядки считать постоянным. [6,5]

### Правила Кирхгофа

15. На рисунке изображена электрическая цепь. В ней  $R_1 = 1$  Ом,  $R_2 = 3$  Ом,  $R_3 = 2$  Ом. Определить, во сколько раз сопротивление между точками  $B$  и  $D$  больше, чем сопротивление между точками  $A$  и  $C$ . [1,75]



### Шунтирование электроизмерительных приборов

16. Миллиамперметр со шкалой, рассчитанной на 200 мА, необходимо использовать как амперметр для измерения тока 5,2 А. Рассчитать в СИ максимальное сопротивление шунта, если внутреннее сопротивление миллиамперметра 8 Ом. [0,32]

17. Вольтметр имеет шкалу на 10 В и внутреннее сопротивление 200 Ом. Для того, чтобы этим прибором можно было измерить напряжение больше 10 В, к нему нужно последовательно подключить добавочный резистор. Определить в СИ сопротивление добавочного резистора, позволяющего измерять напряжения до 50 В. [800]

### Закон Джоуля-Ленца. Мощность тока

18. Нагреватель кипятильника состоит из четырех одинаковых элементов. Сопротивление каждого из них 1 Ом. Нагреватель питается от батареи с э.д.с. 8 В и внутренним сопротивлением 1 Ом. Элементы нагревателя включены так, чтобы вода нагревалась наиболее быстро. Найти в СИ мощность нагревателя. [16]

19. Нагревательный элемент термостата, состоящий из двух одинаковых параллельно соединённых спиралей, подключается к источнику тока с внутренним сопротивлением 10 Ом. Каким должно быть сопротивление каждой спирали, чтобы при перегорании одной из них это не отразилось на температуре термостата? Ответ дать в СИ. [14,1]

20. Электромотор станка подсоединён к цепи проводом с сопротивлением 0,5 Ом. Напряжение в сети 127 В. Какова максимально допустимая мощность, потребляемая мотором, если напряжение на нём не должно быть ниже 120 В. Ответ дать в СИ. [1680]

21. Электрический чайник содержит два нагревательных элемента. Регулятор мощности чайника позволяет включать элементы или по отдельности, или оба вместе -

последовательно или параллельно. При включении одного из элементов вода в чайнике закипает за 20 мин, при включении другого - за 30 мин. Найти отношение времени закипания чайника при параллельном включении нагревателей ко времени закипания при последовательном включении. [0,24]

22. Электрическую батарею замыкают сначала на внешнее сопротивление 2 Ом, а затем на внешнее сопротивление 0,5 Ом. В каждом из этих случаев во внешней цепи выделяется *одна и та же* мощность 4,5 Вт. Определить в СИ э.д.с. батареи. [4,5]

### **КПД**

23. Электромотор имеет омическое сопротивление 1,98 Ом и приводится в движение от сети 110 В. Ток, проходящий через мотор при его работе, равен 10 А. Определить в процентах к.п.д. мотора. [82]

### **Переменный ток**

24. Через спираль нагревателя, сопротивление которой постоянно, пропускают постоянный ток. На сколько процентов изменится средняя тепловая мощность, выделяющаяся в спирали, если через неё одновременно с постоянным током пропускать переменный (синусоидальный) ток? Амплитуда переменного тока составляет 30% от силы тока постоянного. [4,5]