

**Методическая разработка по учебной дисциплине «Электротехника»**

**на тему: «Электрические цепи постоянного тока»**

**для специальностей:**

**25.02.03** «Техническая эксплуатация электрифицированных и пилотажно-навигационных комплексов»

**23.02.03** «Техническое обслуживание и ремонт автомобильного транспорта»

**25.02.01** «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей»

**09.02.03** «Программирование в компьютерных системах»

В предлагаемой методической разработке изложены основные сведения из электростатики по теме: «Электрические цепи постоянного тока» в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом среднего профессионального образования по учебной дисциплине «Электротехника»

Данная методическая разработка позволяет курсантам самостоятельно изучать материал и использовать вопросы и задачи, приведённые в каждой главе для самоконтроля.

Организация – разработчик: Троицкий авиационный технический колледж – филиал Московского государственного технического университета Гражданской авиации.

Разработчик:

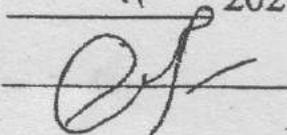
Жукова О.А., преподаватель Троицкого авиационного технического колледжа – филиала Московского государственного технического университета Гражданской авиации.

Методическая разработка

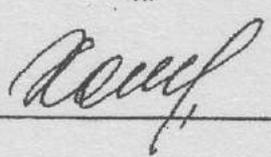
рассмотрена

на заседании ЦК АиРЭО

Протокол № 7 от «24» 11 2021 г.

Председатель ЦК АиРЭО  /Я. М. Стриженюк/

Согласовано:

Зам. директора по ПО  /В. А. Хомуткова/

## СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 2 Электрические цепи постоянного тока	3
Тема 2.1. Физические процессы в электрических цепях постоянного тока	3
2.1.1 Понятие об электрическом токе	3
2.1.2. Величина и плотность тока	3
2.1.3. Электродвижущая сила источника электрической энергии. Напряжение	4
2.1.4. Электрическая цепь и ее элементы	6
2.1.5. Электрическое сопротивление и проводимость. Зависимость сопротивления проводников от физических условий	6
2.1.6. Закон Ома	11
2.1.7. Режимы работы электрической цепи: номинальный и рабочий режимы, холостой ход и короткое замыкание	21
Тема 2. 2. Энергетические параметры электрической цепи	24
2.2.1. Работа, мощность, КПД	24
2.2.2. Тепловое действие электрического тока	30
2.2.3. Закон Джоуля — Ленца	30
Тема 2.3. Расчёт электрических цепей постоянного тока	34
2.3.1. Соединение источников ЭДС	34
2.3.2. Способы соединения потребителей постоянного тока. Первый закон Кирхгофа	39
2.3.3. Делители напряжения, потенциометры, реостаты, резисторы.	53
2.3.4. Второй закон Кирхгофа. Применение законов Кирхгофа для расчета электрических цепей	55
Список учебной литературы	57

## Раздел 2. Электрические цепи постоянного тока

### Тема 2.1. Физические процессы в электрических цепях постоянного тока

#### 2.1.1 Понятие об электрическом токе

*Движение электронов по проводнику называется электрическим током.* Электроны не проходят в своем движении всю длину проводника. Наоборот, они пробегают очень небольшие расстояния до столкновения с другими электронами, атомами или молекулами. Эти расстояния называются *длиной свободного пробега электронов.*

Практически электрический ток получают от специальных источников: гальванических элементов, аккумуляторов, генераторов.

Электрический ток непосредственно наблюдать нельзя. О прохождении тока можно судить только по тем действиям, которые он производит.

Признаки наличия тока:

- ▶ ток, проходя через растворы солей, щелочей, кислот, а также через расплавленные соли, разлагает их на составные части;
- ▶ проводник, по которому проходит электрический ток, нагревается;
- ▶ электрический ток, проходя по проводнику, создает вокруг него магнитное поле.

#### 2.1.2. Величина и плотность тока

Если через поперечное сечение проводника проходит  $Q$  кулонов электричества за  $t$  секунд, то количество электричества, прошедшего через поперечное сечение проводника в течение одной секунды, называется величиной тока и обозначается буквой  $I$ .

$$I = \frac{Q}{t}.$$

Единицей величины тока является 1 ампер, определяемый как количество электричества в 1 кулон, прошедшего через поперечное сечение проводника в 1 секунду, т. е.

$$1 \text{ ампер} = \frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ секунда}}.$$

Ток в цепи измеряется электрическим прибором — амперметром.

Тысячные доли ампера — миллиамперы измеряются миллиамперметром. Если количество электричества, протекающего по проводнику, будет меняться, то величина тока также будет меняться.

В этом случае среднее значение тока за данный промежуток времени определяется по формуле:

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t},$$

где  $\Delta Q$  — изменение количества электричества;

$\Delta t$  — изменение времени.

Чем меньше промежуток времени  $\Delta t$ , тем меньше среднее значение тока будет отличаться от истинного мгновенного значения тока в данный момент.

Ток, не изменяющийся по величине и по направлению, называется постоянным током.

Постоянный ток дают нам гальванические элементы, аккумуляторы, генераторы постоянного тока, если условия работы электрической цепи не меняются.

Отношение величины тока  $I$  к площади поперечного сечения проводника  $S$  называется **плотностью тока** и обозначается греческой буквой  $\delta$  (дельта).

$$\delta = \frac{I}{S},$$

Так как обычно площадь сечения проводников дается в квадратных миллиметрах, то плотность тока измеряется в  $A/mm^2$ .

### 2.1.3. Электродвижущая сила источника электрической энергии.

#### Напряжение

Чтобы электрический ток проходил по цепи продолжительное время, нужно непрерывно поддерживать на полюсах источника напряжения разность потенциалов. Аналогично этому, если соединить трубкой два сосуда с различными уровнями воды, то вода будет переходить из одного сосуда в другой до тех пор, пока уровни в сосудах не сравняются. Доливая воду в один сосуд и отводя ее из другого, можно добиться того, что движение воды по трубке между сосудами будет продолжаться непрерывно.

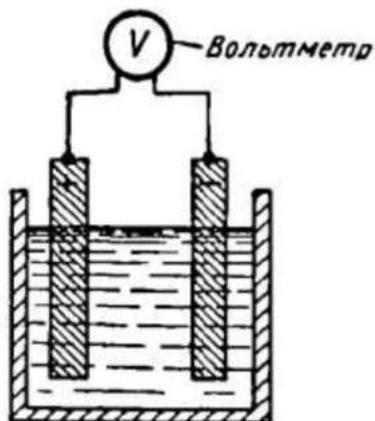


Рис. 2. Измерение вольтметром электродвижущей силы элемента

При работе источника электрической энергии электроны с анода переходят на катод.

Отсюда можно заключить, что внутри источника электрической энергии действует сила, которая должна непрерывно поддерживать ток в цепи, т. е. иначе говоря, должна обеспечивать работу этого источника.

Причина, которая устанавливает и поддерживает разность потенциалов, вызывает ток в цепи, преодолевая ее

внешнее и внутреннее сопротивление, называется *электродвижущей силой* (сокращенно ЭДС и обозначается буквой)  $E$ .

Электродвижущая сила источников электрической энергии возникает под влиянием причин, специфических для каждого из них.

В химических источниках электрической энергии (гальванических элементах, аккумуляторах) получается в результате химических реакций. В генераторах ЭДС возникает вследствие электромагнитной индукции, в термоэлементах — за счет тепловой энергии.

Разность потенциалов, вызывающая прохождение тока через сопротивление участка электрической цепи, называется напряжением между концами этого участка.

Электродвижущая сила и напряжение измеряется в вольтах. Для измерения ЭДС и напряжения служат приборы — вольтметры.

Тысячные доли вольта — милливольты — измеряются милливольтметрами, тысячи вольт — киловольты — измеряются киловольтметрами.

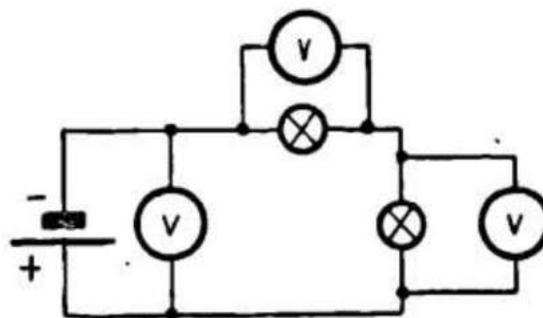


Рис. 4. Измерение вольтметром напряжений на различных участках цепи

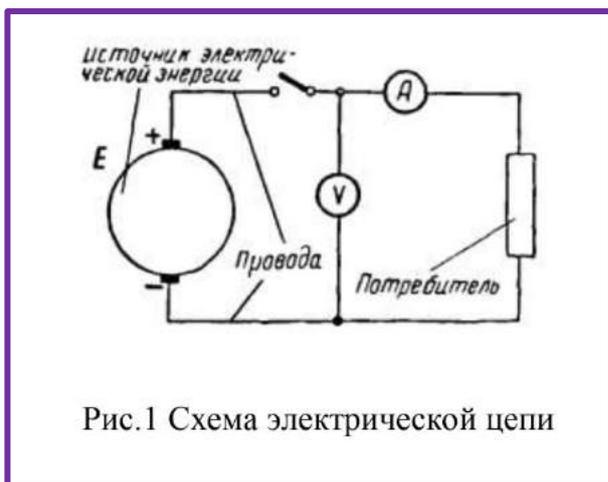
Чтобы измерить ЭДС источника электрической энергии необходимо вольтметр включить к зажимам этого источника при разомкнутой внешней

цепи (Рис.2). Для измерения напряжения на участке электрической цепи вольтметр нужно включить к концам этого участка (Рис. 4).

#### 2.1.4. Электрическая цепь и ее элементы

Простейшая электрическая цепь состоит из источника (гальванического элемента, аккумулятора, генератора и т. п.), потребителей или приемников электрической энергии (ламп накаливания, электронагревательных приборов, электродвигателей и т. п.) и соединительных проводов, соединяющих зажимы источника напряжения с зажимами потребителя.

Источник электрической энергии дает электрическую энергию, потребитель эту энергию преобразует в другие виды энергии: свет, тепло, движение и т. д. Совокупность соединенных между собой источников электрической энергии, приемников и соединяющих их проводов (линия передачи) называется **электрической цепью** (Рис.1). **Электрическая цепь** делится на внутреннюю и внешнюю части.



К внутренней части цепи относится сам источник электрической энергии. Во внешнюю часть цепи входят соединительные провода, потребители, рубильники, выключатели, электроизмерительные приборы, т. е. все то, что присоединено к зажимам источника электрической энергии.

Постоянный электрический ток может протекать только по замкнутой электрической цепи. Разрыв цепи в любом месте вызывает прекращение электрического тока.

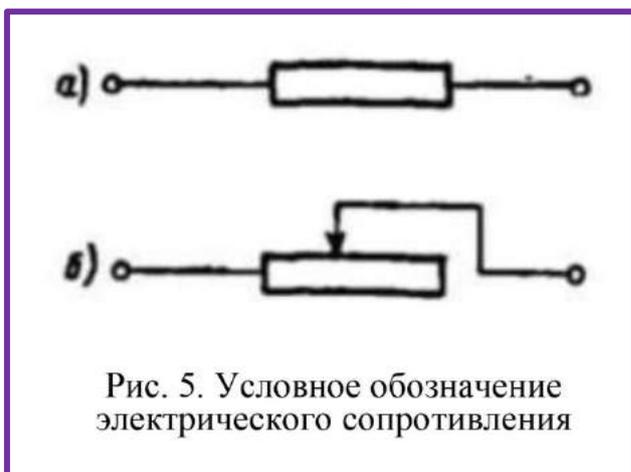
#### 2.1.5. Электрическое сопротивление и проводимость. Зависимость сопротивления проводников от физических условий

При замыкании электрической цепи, на зажимах которой имеется разность потенциалов, возникает электрический ток. Свободные электроны под влиянием электрических сил поля перемещаются вдоль проводника. В своем движении электроны наталкиваются на атомы проводника и отдают им

запас своей кинетической энергии. Скорость движения электронов непрерывно изменяется: при столкновении электронов с атомами, молекулами и другими электронами она уменьшается, потом под действием электрического поля увеличивается и снова уменьшается при новом столкновении. В результате этого в проводнике устанавливается равномерное движение потока электронов со скоростью нескольких долей сантиметра в секунду. Следовательно, электроны, проходя по проводнику, всегда встречают с его стороны сопротивление своему движению. При прохождении электрического тока через проводник последний нагревается.

**Электрическим сопротивлением** проводника называется свойство тела или среды превращать электрическую энергию в тепловую при прохождении по нему электрического тока. Обозначается латинской буквой *r*. Условное обозначение электрического сопротивления на схемах показано на рис.5, а.

Переменное электрическое сопротивление, служащее для изменения тока в цепи, называется **реостатом**. На схемах реостаты обозначаются, как



показано на рис.5, б. В общем виде реостат изготавливается из проволоки того или иного сопротивления, намотанной на изолирующем основании. Ползунок или рычаг реостата ставится в определенное положение, в результате чего в цепь вводится нужное сопротивление.

Длинный проводник малого поперечного сечения создает току большое сопротивление. Короткие проводники большого поперечного сечения оказывают току малое сопротивление.

Если взять два проводника из разного материала, но одинаковой длины и сечения, то проводники будут проводить ток по-разному. Это показывает, что сопротивление проводника зависит от материала самого проводника.

Температура проводника также оказывает влияние на его сопротивление. С повышением температуры сопротивление металлов увеличивается, а сопротивление жидкостей и угля уменьшается. Только некоторые специальные металлические сплавы (манганин, константан, никелин и др.) с увеличением температуры своего сопротивления почти не меняют.

Электрическое сопротивление проводника зависит от:

- длины проводника
- поперечного сечения проводника
- материала проводника
- температуры проводника.

За единицу сопротивления принят один Ом. Ом часто обозначается греческой прописной буквой  $\Omega$  (омега). Поэтому вместо того чтобы писать «Сопротивление проводника равно 15 Ом», можно написать просто:  $r = 15 \Omega$ .

1000 ом называется 1 килоОм (1 ком, или 1 кОм),

1 000 000 ом называется 1 мегом (1 мОм, или 1 МОм).

Сопротивление в омах проводника длиной 1 м, сечением 1 мм<sup>2</sup> называется **удельным сопротивлением** и обозначается греческой буквой  $\rho$  (ро). В табл. 1 даны удельные сопротивления некоторых проводников.

#### Удельные сопротивления различных проводников

Таблица 1

Материал проводника	Удельное сопротивление
Серебро	0,016
Медь	0,0175
Алюминий	0,03
Вольфрам	0,05
Железо	0,13
Свинец	0,2
Никелин (сплав меди, никеля и цинка)	0,42
Манганин (сплав меди, никеля и марганца)	0,43
Константин (сплав меди, никеля и алюминия)	0,5
Ртуть	0,94
Нихром (сплав никеля, хрома, железа и марганца)	1,1

Из таблицы видно, что железная проволока длиной 1 м и сечением 1 мм<sup>2</sup> обладает сопротивлением 0,13 Ом. Чтобы получить 1 Ом сопротивления, нужно взять 7,7 м такой проволоки. Наименьшим удельным сопротивлением обладает серебро. 1 ом сопротивления можно получить, если взять 62,5 м серебряной проволоки сечением 1 мм<sup>2</sup>. Серебро — лучший проводник, но большая стоимость серебра исключает возможность его массового применения. После серебра в таблице идет медь: 1 м медной проволоки сечением 1 мм<sup>2</sup> обладает сопротивлением 0,0175 ом. Чтобы получить сопротивление в 1 ом, нужно взять 57 м такой проволоки.

Химически чистая, полученная путем рафинирования, медь нашла себе повсеместное применение в электротехнике для изготовления проводов, кабелей, обмоток электрических машин и аппаратов. Широко применяют также в качестве проводников алюминий и железо.

Сопротивление проводника можно определить по формуле:

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S},$$

где  $r$  — сопротивление проводника в омах;

$\rho$  — удельное сопротивление проводника;

$l$  — длина проводника в м;

$S$  — сечение проводника в  $мм^2$ .

**Пример 1.** Определить сопротивление 200 м железной проволоки сечением 5  $мм^2$ .

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0,13 \cdot 200}{5} = 5,2 \text{ ом.}$$

**Пример 2.** Вычислить сопротивление 2 км алюминиевой проволоки сечением 2,5  $мм^2$ .

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0,03 \cdot 2000}{2,5} = 24 \text{ ом.}$$

Из формулы сопротивления легко можно определить длину, удельное сопротивление и сечение проводника.

**Пример 3.** Для радиоприемника необходимо намотать сопротивление в 30 ом из никелиновой проволоки сечением 0,21  $мм^2$ . Определить необходимую длину проволоки.

$$l = \frac{r \cdot S}{\rho} = \frac{30 \cdot 0,21}{0,42} = 15 \text{ м.}$$

**Пример 4.** Определить сечение 20 м нихромовой проволоки, если сопротивление ее равно 25 Ом.

$$S = \frac{\rho \cdot l}{r} = \frac{1,1 \cdot 20}{25} = 0,88 \text{ мм}^2.$$

**Пример 5.** Проволока сечением 0,5 мм<sup>2</sup> и длиной 40 м имеет сопротивление 16 Ом. Определить материал проволоки.

Материал проводника характеризует его удельное сопротивление.

$$\rho = \frac{r \cdot S}{l} = \frac{16 \cdot 0,5}{40} = 0,2.$$

По таблице удельных сопротивлений находим, что таким сопротивлением обладает свинец.

Из формулы температурного коэффициента сопротивления определим  $r_t$ :

$$r_t = r_0 [1 + \alpha (t - t_0)] :$$

**Пример 6.** Определить сопротивление железной проволоки, нагретой до 200°, если сопротивление ее при 0° было 100 Ом.

$$r_t = r_0 [1 + \alpha (t - t_0)] = 100 (1 + 0,0066 \cdot 200) = 232 \text{ Ом}.$$

**Пример 7.** Термометр сопротивления, изготовленный из платиновой проволоки, в помещении с температурой 15° имел сопротивление 20 Ом. Термометр поместили в печь и через некоторое время было измерено его сопротивление. Оно оказалось равным 29,6 Ом. Определить температуру печи

$$t = \frac{r_t - r_0}{r_0 \alpha} + t_0 = \frac{29,6 - 20}{20 \cdot 0,0032} + 15 = 165^\circ.$$

До сих пор мы рассматривали сопротивление проводника как препятствие, которое оказывает проводник электрическому току. Но все же ток по проводнику проходит. Следовательно, кроме сопротивления

(препятствия), проводник обладает также способностью проводить электрический ток, т. е. проводимостью.

Чем большим сопротивлением обладает проводник, тем меньшую он имеет проводимость, тем хуже он проводит электрический ток, и, наоборот, чем меньше сопротивление проводника, тем большей проводимостью он обладает, тем легче току пройти по проводнику. Поэтому сопротивление и проводимость проводника есть величины обратные.

Из математики известно, что число, обратное 5, есть  $\frac{1}{5}$  и, наоборот, число, обратное  $\frac{1}{7}$ , есть 7. Следовательно, если сопротивление проводника обозначается буквой  $r$ , то проводимость определяется как  $\frac{1}{r}$ . Обычно проводимость обозначается буквой  $g$ .

Электрическая проводимость измеряется в  $\frac{1}{\text{Ом}}$  или в сименсах.

**Пример 8.** Сопротивление проводника равно 20 ом. Определить его проводимость.

Если  $r = 20$  ом, то

$$g = \frac{1}{r} = \frac{1}{20} = 0,05 \frac{1}{\text{ом}}.$$

**Пример 9.** Проводимость проводника равна  $0,1 \frac{1}{\text{Ом}}$ .

Определить его сопротивление,

$$\text{Если } g = 0,1 \frac{1}{\text{ом}}, \text{ то } r = \frac{1}{0,1} = 10 \text{ ом}.$$

### 2.1.6. Закон Ома

Соберем электрическую цепь (Рис. 6, а), состоящую из аккумулятора 1 напряжением в 2 В, рычажного реостата 2, двух измерительных приборов— вольтметра 3 и амперметра 4 и соединительных проводов 5. Установим в цепи при помощи реостата сопротивление, равное 2 Ом. Тогда вольтметр, включенный на зажимы аккумулятора, покажет напряжение в 2 В, а ампер-

метр, включенный последовательно в цепь, покажет ток, равный 1А. Увеличим напряжение до 4 в путь включения другого аккумулятора (Рис. 6, б). При том же сопротивлении в цепи — 2 Ом — амперметр покажет уже ток в 2А. Аккумулятор напряжением 6 Изменит показание амперметра до 3А (Рис. 6, в). Сведем наблюдения в табл. 3.

Зависимость тока в цепи от напряжения при неизменном сопротивлении

Таблица 3

Напряжение цепи, В	Сопротивление цепи, Ом	Ток цепи, А
2	2	1
4	2	2
6	2	3

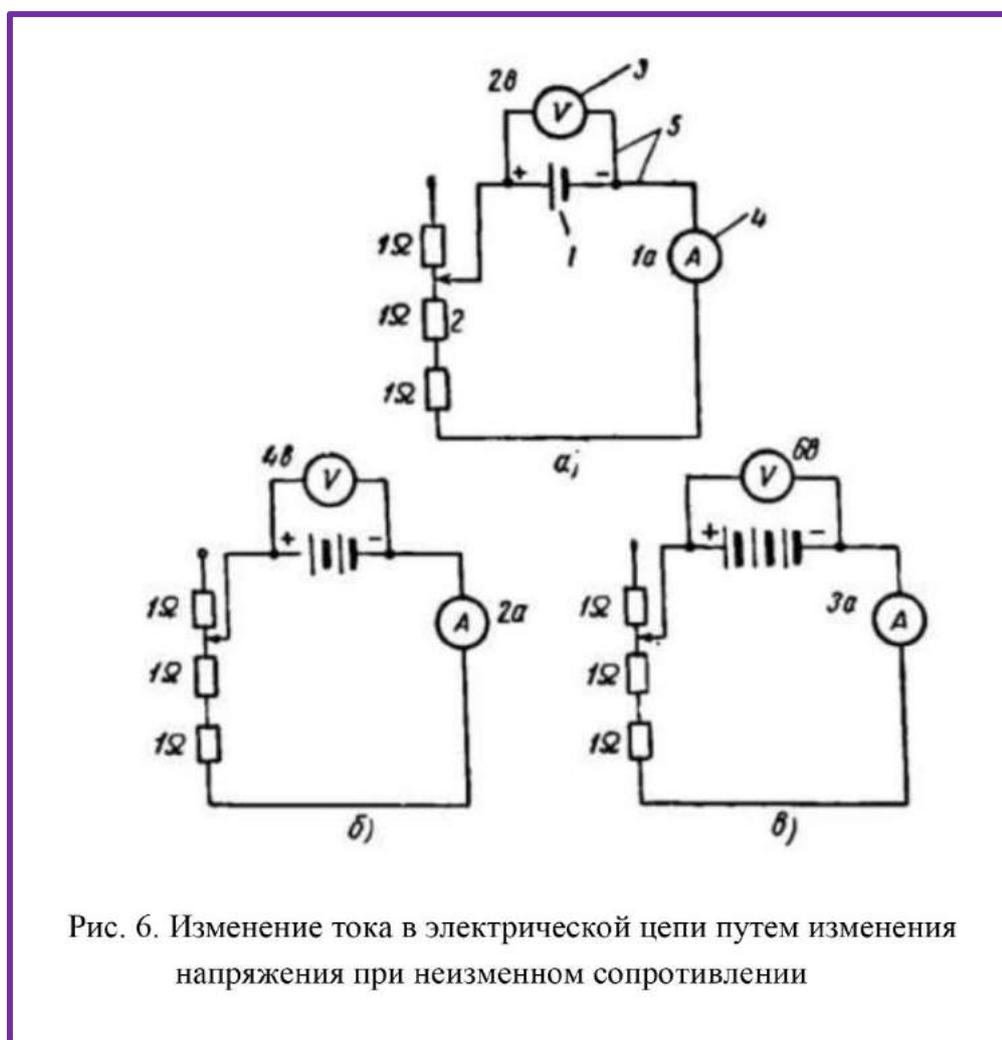


Рис. 6. Изменение тока в электрической цепи путем изменения напряжения при неизменном сопротивлении

Отсюда можно сделать вывод, что ток в цепи при постоянном сопротивлении тем больше, чем больше напряжение этой цепи, причем ток будет увеличиваться во столько раз, во сколько раз увеличивается напряжение.

Теперь в такой же цепи поставим аккумулятор с напряжением 2 в и установим при помощи реостата сопротивление в цепи, равное 1 ом (Рис.7, а). Тогда амперметр покажет 2 а.

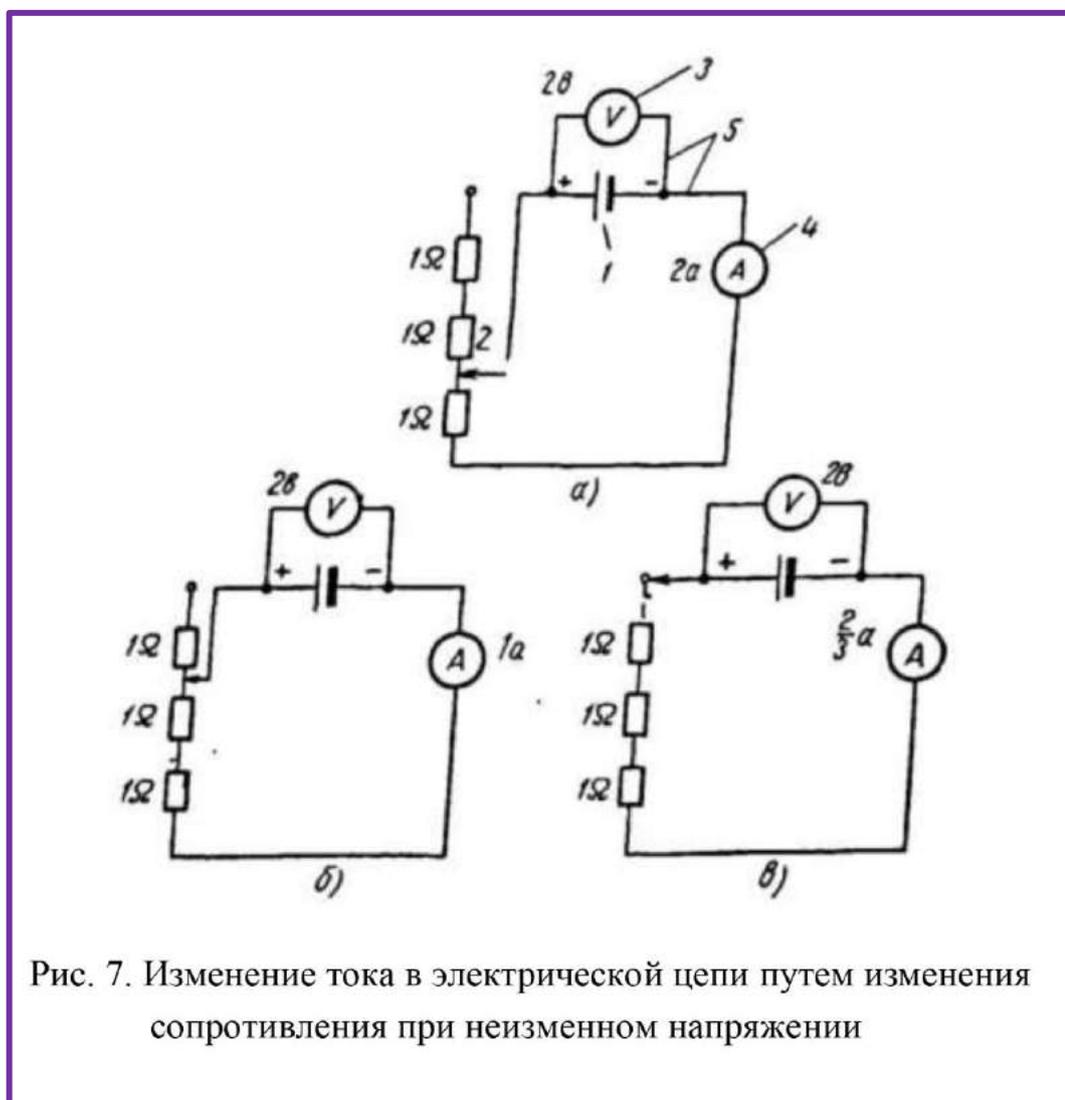


Рис. 7. Изменение тока в электрической цепи путем изменения сопротивления при неизменном напряжении

Увеличим реостатом сопротивление до 2 ом (Рис.7, б). Показание амперметра (при том же напряжении цепи) будет уже 1 а.

При сопротивлении в цепи 3 ом (Рис.7, в) показание амперметра будет  $\frac{2}{3}$  А.

Результаты опыта сведем в табл. 4.

Зависимость тока в цепи от сопротивления при неизменном напряжении

Таблица 4

Напряжение цепи, В	Сопротивление цепи, Ом	Ток цепи, А
2	1	2
2	2	1

Вывод: при постоянном напряжении ток в цепи будет тем больше, чем меньше сопротивление этой цепи, причем ток в цепи увеличивается во столько раз, во сколько раз уменьшается сопротивление цепи.

Как показывают опыты, ток на участке цепи прямо пропорционален напряжению на этом участке и обратно пропорционален сопротивлению того участка. Эта зависимость известна под названием закона Ома.

Если обозначим:  $I$  — ток в амперах,  $U$  — напряжение в вольтах,  $r$  — сопротивление в омах, то закон Ома можно представить формулой:

$$I = \frac{U}{r},$$

т. е. ток на данном участке цепи равен напряжению на этом участке, деленному на сопротивление того же участка.

**Пример 10.** Определить ток, который будет проходить по нити лампы накаливания, если нить имеет неизменное сопротивление 240 Ом, а лампа включена в сеть с напряжением 120 в. ,

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120}{240} = 0,5 \text{ а.}$$

Пользуясь формулой закона Ома, можно определить ток, напряжение и сопротивление цепи.

$$U = I \cdot r,$$

т. е. напряжение цепи равно произведению тока на сопротивление этой цепи и

$$r = \frac{U}{I},$$

т. е. сопротивление цепи равно напряжению, деленному на ток цепи.

**Пример 11.** Какое нужно напряжение, чтобы в цепи с сопротивлением  $6 \text{ Ом}$  протекал ток  $20 \text{ а}$ ?

$$U = I \cdot r = 20 \cdot 6 = 120 \text{ в.}$$

**Пример 12.** На спирали электрической плитки протекает ток в  $5 \text{ а}$ . Плитка включена в сеть с напряжением  $220 \text{ в}$ . Определить сопротивление спирали электрической плитки.

$$r = \frac{U}{I} = \frac{220}{5} = 44 \text{ ом.}$$

Если в формуле  $U = I \cdot r$  ток равен  $1 \text{ А}$ , а сопротивление  $1 \text{ Ом}$ , то напряжение будет равно  $1 \text{ В}$ :

$$1 \text{ В} = 1 \text{ а} \cdot 1 \text{ Ом.}$$

Напряжение в  $1 \text{ В}$  действует в цепи с сопротивлением  $1 \text{ Ом}$  при токе в  $1 \text{ А}$ .

На рис. 8 приведена электрическая цепь, состоящая из аккумулятора, сопротивления  $r$  и длинных соединительных проводов, имеющих свое определенное сопротивление.

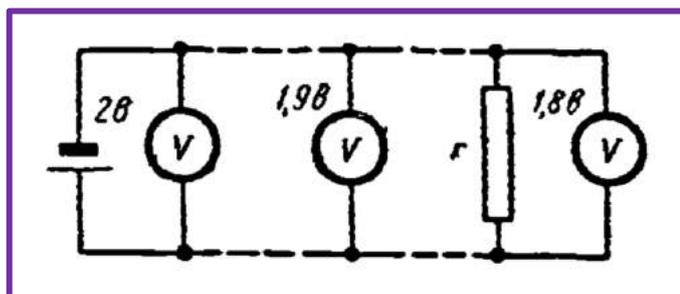


Рис. 8. Потеря напряжения вдоль электрической цепи

Как видно из фигуры, вольтметр, присоединенный к зажимам аккумулятора, показывает  $2 \text{ в}$ . Уже в середине линии вольтметр показывает только  $1,9 \text{ в}$ , а около сопротивления  $r$  напряжение равно всего  $1,8 \text{ в}$ . Такое уменьшение напряжения вдоль цепи между отдельными точками этой цепи называется **потерей напряжения**.

Потеря напряжения вдоль электрической цепи происходит потому, что часть приложенного напряжения расходуется на преодоление сопротивления цепи. При этом потеря напряжения на участке цепи будет тем больше, чем больше ток и чем больше сопротивление этого участка цепи. Из закона Ома для участка цепи следует, что потеря напряжения в вольтах на участке цепи равно току в амперах, протекающему по этому участку, умноженному на сопротивление в омах того же участка:

$$U = I \cdot r.$$

**Пример 13.** От генератора, напряжение, на зажимах которого 115 в, электроэнергия передается электродвигателю по проводам, сопротивление которых 0,1 Ом. Определить напряжение на зажимах двигателя, если он потребляет ток в 50 А.

Очевидно, что на зажимах двигателя напряжение будет меньше, чем на зажимах генератора, так как в линии будет потеря напряжения. По формуле

$$U = I \cdot r = 50 \cdot 0,1 = 5 \text{ в.}$$

Если в линии потеря напряжения равна 5В, то напряжение у электродвигателя будет  $115 - 5 = 110 \text{ В}$ .

**Пример 14.** Генератор дает напряжение 240 в. Электроэнергия по линии из двух медных проводов длиной по 350 м, сечением  $10 \text{ мм}^2$  передается к электродвигателю, потребляющему ток в 15 А. Требуется узнать напряжение на зажимах двигателя.

Напряжение на зажимах двигателя будет меньше напряжения генератора на величину потери напряжения в линии. Потеря напряжения в линии  $U = I \cdot R$ .

Так как сопротивление  $r$  проводов неизвестно, определяем его по формуле:

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0,0175 \cdot 700}{10} = 1,22 \text{ ом}$$

(длина  $l$  равна 700 м, так как току приходится идти от генератора к двигателю и оттуда обратно к генератору).

Подставляя  $r$  в формулу, получим:

$$U = I \cdot r = 15 \cdot 1,22 = 18,3 \text{ в.}$$

Следовательно, напряжение на зажимах двигателя будет  $240 - 18,3 = 221,7 \text{ В}$ .

**Пример 15.** Определить поперечное сечение алюминиевых проводов, которое необходимо применить, чтобы подвести электрическую энергию к двигателю, работающему при напряжении в  $120 \text{ В}$  и токе в  $20 \text{ А}$ . Энергия к двигателю будет подаваться от генератора напряжением  $127 \text{ В}$  по линии длиной  $150 \text{ м}$ .

Находим допустимую потерю напряжения:

$$127 - 120 = 7 \text{ в.}$$

Сопrotивление проводов линии должно быть равно:

$$r = \frac{U}{I} = \frac{7}{20} = 0,35 \text{ ом.}$$

Из формулы

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

определяем сечение провода:

$$S = \frac{\rho \cdot l}{r} = \frac{0,03 \cdot 300}{0,35} = 25,7 \text{ мм}^2.$$

По справочнику выбираем имеющееся сечение  $25 \text{ мм}^2$ .

Если ту же линию выполнить медным проводом, то сечение его будет равно:

$$S = \frac{\rho \cdot l}{r} = \frac{0,0175 \cdot 300}{0,35} = 15 \text{ мм}^2.$$

Выбираем сечение  $16 \text{ мм}^2$ .

Иногда приходится умышленно добиваться потери напряжения, чтобы уменьшить величину приложенного напряжения.

**Пример 16.** Для устойчивого горения электрической дуги требуется ток 10А при напряжении 40 В. Определить величину добавочного сопротивления, которое нужно включить последовательно с дуговой установкой, чтобы питать ее от сети с напряжением 120В.

Потеря напряжения в добавочном сопротивлении составит:

$$120 - 40 = 80 \text{ в.}$$

Зная потерю напряжения в добавочном сопротивлении и ток, протекающий через него, можно по закону Ома для участка цепи определить величину этого сопротивления:

$$r = \frac{U}{I} = \frac{80}{10} = 8 \text{ ом.}$$

Электрический ток, проходя по внутренней части цепи, преодолевает ее внутреннее сопротивление и поэтому внутри источника напряжения также происходит падение напряжения.

Следовательно, электродвижущая сила (ЭДС) источника электрической энергии идет на покрытие внутренних и внешних потерь напряжения в цепи.

Если обозначить  $E$  — электродвижущую силу в вольтах,  $I$  — ток в амперах,  $R$  — сопротивление внешней части цепи в омах,  $r_0$  — сопротивление внутренней части цепи в омах,  $U_0$  — внутреннее падение напряжения и  $U$  — внешнее падение напряжения цепи, то получим, что

$$E = U_0 + U = Ir_0 + Ir = I(r_0 + r),$$

$$I = \frac{E}{r_0 + r}.$$

Закон Ома для всей цепи: *ток в электрической цепи равен электродвижущей силе, деленной на сопротивление всей цепи (сумму внутреннего и внешнего сопротивлений).*

**Пример 17.** Электродвижущая сила  $E$  элемента равна  $1,5 \text{ В}$ , его внутреннее сопротивление  $r_0 = 0,3 \text{ Ом}$ . Элемент замкнут на сопротивление  $r = 2,7 \text{ ом}$ . Определить ток в цепи.

$$I = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{1,5}{0,3 + 2,7} = 0,5 \text{ а.}$$

**Пример 18.** Определить ЭДС  $E$  элемента, замкнутого на сопротивление  $r = 2 \text{ Ом}$ , если ток в цепи  $I = 0,6 \text{ А}$ . Внутреннее сопротивление элемента  $r_0 = 0,5 \text{ Ом}$ .

Вольтметр, включенный на зажимы элемента, покажет напряжение на них, равное напряжению сети или падению напряжения во внешней цепи.

$$U = I \cdot r = 0,6 \cdot 2 = 1,2 \text{ в.}$$

Следовательно, часть ЭДС элемента идет на покрытие внутренних потерь, а остальная часть —  $1,2 \text{ В}$  отдается в сеть.

Внутреннее падение напряжения

$$U_0 = I \cdot r_0 = 0,6 \cdot 0,5 = 3 \text{ В}$$

Так как  $E = U_0 + U$ , то  $E = 0,3 + 1,2 = 1,5 \text{ В}$

Тот же ответ можно получить, если воспользоваться формулой закона Ома для всей цепи:

$$I = \frac{E}{r_0 + r},$$

откуда

$$E = I (r_0 + r) = 0,6 (0,5 + 2) = 1,5 \text{ в.}$$

Вольтметр, включенный на зажимы любого источника ЭДС во время его работы, показывает напряжение на них или напряжение сети. При размыкании электрической цепи ток по ней проходить не будет. Ток не будет проходить также и внутри источника ЭДС, а, следовательно, не будет и внутреннего падения напряжения. Поэтому вольтметр при разомкнутой цепи покажет ЭДС источника электрической энергии.

Таким образом, вольтметр включенный на зажимы источника ЭДС показывает:

- а) при замкнутой электрической цепи — напряжение сети;
- б) при разомкнутой электрической цепи — ЭДС источника электрической энергии.

**Пример 19.** Электродвижущая сила элемента 1,8 В. Он замкнут на сопротивление  $r = 2,7$  Ом. Ток в цепи равен 0,5 А. Определить внутреннее сопротивление  $r_0$  элемента и внутреннее падение напряжения  $U_0$ .

$$r_0 + r = \frac{E}{I} = \frac{1,8}{0,5} = 3,6 \text{ ом.}$$

Так как  $r = 2,7$  Ом, то

$$r_0 = 3,6 - 2,7 = 0,9 \text{ ом;}$$

$$U_0 = I \cdot r_0 = 0,5 \cdot 0,9 = 0,45 \text{ в.}$$

Из решенных примеров видно, что показание вольтметра включенного на зажимы источника ЭДС не остается постоянным при различных условиях работы электрической цепи. При увеличении тока в цепи увеличивается также внутреннее падение напряжения. Поэтому, при неизменной ЭДС на долю внешней сети будет приходиться все меньшее и меньшее напряжение.

В табл. 5 показано, как меняется напряжение электрической цепи ( $U$ ) в зависимости от изменения внешнего сопротивления ( $r$ ) при неизменных ЭДС ( $E$ ) и внутреннем сопротивлении ( $r_0$ ) источника энергии.

Зависимость напряжения цепи от сопротивления  $r$  при неизменных ЭДС и внутреннем сопротивлении  $r_0$

Таблица 5

$E$	$r_0$	$r$	$I = \frac{E}{r_0+r}$	$U_0 = I \cdot r_0$	$U = I \cdot r$
2	0,5	2	0,8	0,4	1,6
2	0,5	1	1,33	0,67	1,33
2	0,5	0,5	2	1	1

2.1.7. Режимы работы электрической цепи: номинальный и рабочий режимы, холостой ход и короткое замыкание



Режим работы электрической цепи, т. е. ее электрическое состояние, определяется величинами токов, напряжений и мощностей ее отдельных элементов.

Наиболее характерные режимы электрических цепей рассмотрим на примере простейшей цепи с переменным сопротивлением приемника электрической энергии (рис. 9).

### Номинальный режим

Источники и приемники электрической энергии, провода, а также вспомогательные аппараты и приборы характеризуются номинальными величинами тока  $I_n$ , напряжения  $U_n$ , мощности  $P_n$  и т. д., на которые эти устройства рассчитаны заводами - изготовителями для нормальной работы. Номинальные величины обычно указываются в паспорте устройства.

Режим работы, при котором действительные токи, напряжения, мощности элементов электрической цепи соответствуют их номинальным величинам, называется **номинальным** (нормальным).

Отклонения от номинального режима нежелательны, а превышение номинальных величин в большинстве случаев недопустимо, так как при этом не могут быть гарантированы расчетные продолжительность и экономичность работы электрических устройств и установок.

Для обеспечения нормальных условий работы приемников Электрической энергии необходимо соблюдать соответствие напряжений: действительное напряжение на зажимах устройства должно быть равно его номинальному напряжению.

### Рабочий режим

Режимы электрической цепи по различным причинам могут отличаться от номинального.

Если в электрической цепи действительные характеристики режима отличаются от номинальных величин ее элементов, но отклонения находятся в допустимых пределах, то режим называется рабочим. На схеме рис. 9 сопротивление соединительных проводов отнесено к приемнику. Применяя к этой цепи закон сохранения энергии, нетрудно составить уравнение энергетического баланса за некоторое время:

$$W_{\text{и}} - W_0 = W_{\text{п}},$$

где  $W_{\text{и}} = EIt$  — энергия источника;  $W_{\text{п}} = I^2Rt$  — энергия приемника;  
 $W_0$  — энергия потерь в источнике.

По аналогии с энергией приемника энергию потерь выразим в виде  $W_0 = I^2r$ , где  $r$  — внутреннее сопротивление источника.

В этом случае энергетический баланс имеет вид

$$EIt = I^2rt + I^2Rt;$$

после сокращения на  $t$  получим уравнение баланса мощностей

$$EI = I^2r + I^2R.$$

Далее, сокращая на  $I$ , получаем уравнение баланса напряжений

$$E = Ir + IR, \text{ или } E = U_0 + U,$$

где  $U_0$  — внутреннее падение напряжения в источнике;  $U$  — напряжение на внешних зажимах источника.

Ток в цепи

$$I = E/(r + R). \quad (3.15)$$

Эта формула является выражением закона Ома для простейшей цепи.

Напряжение  $U$  на внешних зажимах источника, равно в этом случае напряжению на приёмнике, меньше ЭДС источника на величину внутреннего падения напряжения  $I \cdot r$

$$U = IR = E - Ir \quad (3.16)$$

Отношение мощности  $P_{\text{п}}$  приемника к мощности  $P_{\text{и}}$  источника называется коэффициентом полезного действия источника:

$$\eta = P_{\text{п}}/P_{\text{и}}. \quad (3.17)$$

КПД источника можно определить отношением напряжения на зажимах источника к его ЭДС:

$$\eta = P_{\text{п}}/P_{\text{и}} = UI/EI = U/E. \quad (3.18)$$

### Режим холостого хода

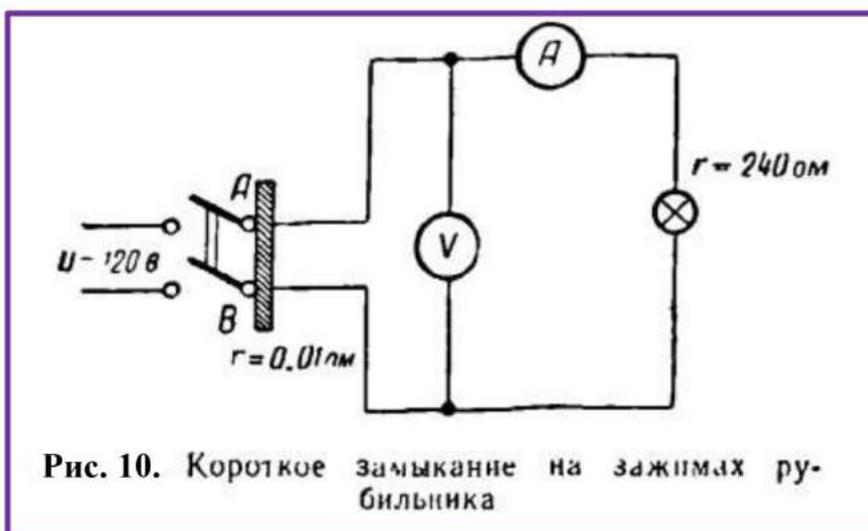
При  $R = \infty$  тока в цепи не будет. Этот случай соответствует размыканию цепи. Режим электрической цепи или отдельных источников, при котором ток в них равен нулю, называется *режимом холостого хода*. При холостом ходе напряжение на внешних зажимах источника равно его ЭДС:  $U = E$ . При  $R = 0$ , согласно выражению (3.15),  $I = E / r = I_{\text{н}}$ , а напряжение на зажимах приемника и источника  $U = 0$ .

### Короткое замыкание

На рис.10 показана схема включения электрической лампы накаливания в электрическую сеть. Если сопротивление этой лампы  $r_{л} = 240 \text{ Ом}$ , а напряжение сети  $U = 120 \text{ В}$ , то ток в цепи лампы будет:

$$I = \frac{U}{r_{л}} = \frac{120}{240} = 0,5 \text{ а.}$$

Разберем случай, когда провода, идущие к лампе накаливания, оказались замкнутыми через очень малое сопротивление, например толстый



металлический стержень, случайно попавший на два провода. В этом случае ток сети, подходя к точке А, будет разветвляться по двум путям: одна, большая его часть, пойдет по металлическому стержню — пути с

малым сопротивлением, а другая, небольшая часть тока, будет проходить по пути с большим сопротивлением — лампе накаливания.

Определим ток, текущий по металлическому стержню с сопротивлением  $r = 0,01 \text{ Ом}$ .

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120}{0,01} = 12\,000 \text{ а.}$$

В случае короткого замыкания напряжение сети будет меньше  $120 \text{ В}$ , так как большой ток создаст в сети большое падение напряжения и поэтому ток, протекающий по металлическому стержню, будет меньше  $12\,000 \text{ А}$ . Но все же этот ток будет во много раз превышать ток, потреблявшийся ранее лампой накаливания.

Ток, проходя по проводнику, выделяет тепло, и проводник нагревается. В нашем примере сечение проводов электрической цепи было рассчитано на

небольшой ток — 0,5 А. При замыкании проводов по цепи будет протекать очень большой ток — 12 000 А.

Такой ток вызовет выделение громадного количества тепла, что приведет к обугливанию и сгоранию изоляции проводов, расплавлению материала проводов, порче электроизмерительных приборов, оплавлению контактов выключателей, ножей рубильников и т. д.

Источник электрической энергии, питающий такую цепь, также может быть поврежден. Перегрев проводов может вызвать пожар.

Каждая электрическая сеть рассчитывается на свой, нормальный для нее ток.

Аварийный режим работы сети, когда вследствие уменьшения ее сопротивления ток в ней резко увеличивается, называется **коротким замыканием**.

Для предотвращения последствий короткого замыкания необходимо соблюдать следующие основные условия при монтаже и эксплуатации электрических установок:

- 1) изоляция проводов должна соответствовать своему назначению (напряжению сети и условиям ее работы);
- 2) сечение проводов должно быть таково, чтобы нагревание их при существующих условиях работы не достигало опасной величины;
- 3) проложенные провода должны быть надежно защищены от механических повреждений;
- 4) провода должны быть проложены на изоляторах или роликах, обладающих достаточной механической и электрической прочностью;
- 5) места соединений и ответвлений должны быть так же надежно изолированы, как и самые провода;
- 6) скрещивание проводов должно быть выполнено так, чтобы провода не касались друг друга;
- 7) через стены, потолки и полы провода должны быть проложены так, чтобы они были защищены от сырости, механических и химических повреждений и хорошо изолированы.

Чтобы избежать внезапного, опасного увеличения тока в электрической цепи при ее коротком замыкании, цепь защищают плавкими предохранителями. Они представляют собой легкоплавкую проволочку, включенную последовательно в сеть. При увеличении тока сверх определенной величины проволочка предохранителя нагревается и плавится, в результате чего электрическая цепь автоматически разрывается и ток в ней прекращается.

## Тема 2. 2. Энергетические параметры электрической цепи

### 2.2.1. Работа, мощность, КПД.

К цепи, представленной на рис.11 приложено постоянное напряжение  $U$ .

$$U = \varphi_A - \varphi_B$$



За время  $t$  по цепи протекло количество электричества  $Q$ . Силы электрического поля, действующего вдоль проводника, перенесли за это время заряд  $Q$  из точки А в точку Б. Работа электрических сил поля или, что то же, работа электрического тока может быть подсчитана по формуле:

$$A = Q \cdot (\varphi_A - \varphi_B) = Q \cdot U$$

так как  $Q = I \cdot t$ , то окончательно:

$$A = UIt,$$

где  $A$  — работа в джоулях;

$I$  — ток в амперах;

$t$  — время в секундах;

$U$  - напряжение в вольтах.

По закону Ома  $U = I \cdot r$ . Поэтому формулу работы можно написать и так:

$$A = I^2 \cdot r \cdot t$$

Работа, произведенная в единицу времени, называется мощностью и обозначается буквой  $P$ .

$$P = \frac{A}{t}$$

Единица мощности:

$$\frac{1 \text{ джоуль}}{1 \text{ секунду}} = 1 \frac{\text{дж}}{\text{сек}} = 1 \text{ вт.}$$

$1 \frac{\text{дж}}{\text{сек}}$  иначе называется ваттом ( $\text{Вт}$ ). Подставляя в формулу мощности выражение для работы электрического тока, имеем:

$$P = \frac{UIt}{t} = UI;$$

$$P = UI \text{ вт}$$

или

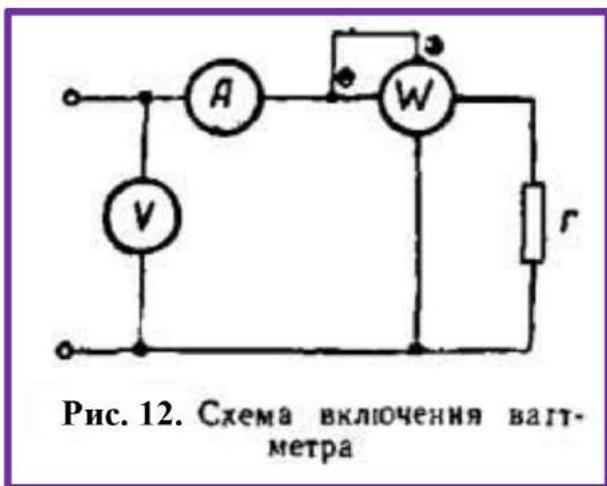
$$P = \frac{I^2rt}{t} = I^2r; P = I^2r \text{ вт.}$$

Кроме ватта, применяются более крупные единицы мощности:

100 Вт = 1 гектоватт (ГВт).

1 000 Вт = 1 киловатт (кВт).

1 000 000 Вт = 1 мегаватт (МВт).



Электрическая мощность измеряется ваттметром. Ваттметр имеет две обмотки: последовательную и параллельную. Схема включения ваттметра показана на рис. 12

Из формулы  $P = I \cdot U$  видно, что мощность, потребляемую в сети, можно определить, умножив ток на напряжение. Поэтому для определения мощности,

потребляемой сетью, следует показание амперметра умножить на показание вольтметра.

Так, например, мощность, потребляемая в цепи, при показании амперметра  $3\text{ А}$  и вольтметра  $120\text{ В}$  будет:

$$P = IU = 3 \cdot 120 = 360 \text{ вт.}$$

Для практических измерений электрической работы (энергии) джоуль является слишком мелкой единицей.

Если время  $t$  подставлять не в секундах, а в часах, то получим более крупные единицы электрической энергии:

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{сек.}$$

$$1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ ватт-секунд} = 3600 \text{ Дж.}$$

$$100 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 1 \text{ гектоватт-час (гВт} \cdot \text{ч).}$$

$$1000 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 1 \text{ киловатт-час (кВт} \cdot \text{ч).}$$

Электрическая энергия измеряется счетчиками электрической энергии.

**Пример 20.** Определить мощность, потребляемую электрическим двигателем, если ток в цепи равен  $8\text{ А}$  и двигатель включен в сеть напряжением  $220\text{ в}$ .

$$P = IU = 8 \cdot 220 = 1760 \text{ вт} = 17,6 \text{ звт} = 1,76 \text{ квт.}$$

**Пример 21.** Какова мощность, потребляемая электрической плиткой, если плитка берет из сети ток в  $5\text{ А}$ , а сопротивление спирали плитки равно  $24\text{ Ом}$ ?

$$P = I^2 r = 25 \cdot 24 = 600 \text{ вт} = 6 \text{ звт} = 0,6 \text{ квт.}$$

При переводе механической мощности в электрическую и обратно необходимо помнить, что

$$1 \text{ лошадиная сила (л. с.)} = 736 \text{ Вт.}$$

$$1 \text{ киловатт (кВт)} = 1,36 \text{ л.с.}$$

**Пример 22.** Определить энергию, расходуемую электрической плиткой мощностью  $600\text{ Вт}$  в течение  $5\text{ час}$ .

$$A = P \cdot t = 600 \cdot 5 = 3000 \text{ вт} \cdot \text{ч} = 30 \text{ звт} \cdot \text{ч} = 3 \text{ квт} \cdot \text{ч}$$

**Пример 23.** Определить стоимость горения двенадцати электрических ламп в течение месяца (30 дней), если четыре из них по 60 Вт горят по 6 час, в сутки, а остальные восемь ламп по 25 Вт горят по 4 часа в сутки, Цена за энергию (тариф) 0,4 коп. за 1 кВт·ч

Мощность четырех ламп по 60 вт.

$$P = 60 \cdot 4 = 240 \text{ вт.}$$

Число часов горения этих ламп в месяц:

$$t = 6 \cdot 30 = 180 \text{ час.}$$

Энергия, расходуемая этими лампами:

$$A = P \cdot t = 240 \cdot 180 = 43\,200 \text{ вт} \cdot \text{ч} = 432 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Мощность остальных восьми ламп по 25 Вт:

$$25 \cdot 8 = 200 \text{ вт.}$$

Число часов горения этих ламп в месяц:

$$4 \cdot 30 = 120 \text{ час.}$$

Энергия, расходуемая этими лампами:

$$A = P \cdot t = 200 \cdot 120 = 24\,000 \text{ вт} \cdot \text{ч} = 240 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Общее количество расходуемой энергии.

$$432 + 240 = 672 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Стоимость всей энергии:

672·0,4 = 268,8 коп. ≈ 2 р. 69 к.

### 2.2.2. Тепловое действие электрического тока

Как известно, все тела состоят из молекул и эти молекулы непрерывно движутся. Чем выше температура тела, тем быстрее движение молекул вещества этого тела. Но есть температура, при которой движение молекул прекращается. Температура эта равна минус  $273^{\circ}\text{C}$ . Абсолютный нуль — так называют ученые эту температуру. На земле такой температуры в естественных условиях нет. Получить температуру, близкую к ней, можно только в лабораториях.

В проводнике, по которому течет электрический ток, так же как и во всех телах, есть движение молекул. При наличии в проводнике электрического тока электроны сталкиваются с двигающимися молекулами проводника и усиливают их движение, что приводит к нагреву проводника.

Количество тепла измеряется в калориях (кал). Одной калорией называется такое количество тепла, которое необходимо для нагрева 1 г воды на  $1^{\circ}\text{C}$ . 1 ккал равна 1000 кал.

**Пример 24.** Сколько нужно тепла, чтобы нагреть до кипения 250 г воды, взятой при температуре  $10^{\circ}$ ?

Рассуждаем так: для нагрева 1 г воды на  $1^{\circ}$  нужна 1 кал тепла. Для нагрева 250 г воды на  $1^{\circ}$  нужно 250 кал. Для нагрева 250 г воды от  $10$  до  $100^{\circ}$  (на  $90^{\circ}$ ) нужно  $250 \cdot 90 = 22\,500$  кал = 22,5 ккал.

### 2.2.3. Закон Джоуля — Ленца

В результате опытов было установлено, что количество тепла, выделяемого током при прохождении по проводнику, зависит от сопротивления самого проводника, тока и времени его прохождения.

Этот физический закон был впервые установлен в 1841 г. английским физиком Джоулем, а несколько позднее (в 1844 г.) независимо от него русским академиком Эмилем Христиановичем Ленцем (1804—1865).

Количественные соотношения, имеющие место при нагревании проводника током, называются законом Джоуля — Ленца.

$$1 \text{ квт} = \frac{1}{0,736} \text{ л. с.} = 1,36 \text{ л. с.},$$

откуда

$$1 \frac{\text{кГм}}{\text{сек}} = \frac{1}{75} \text{ л. с.} = \frac{736}{75} \text{ вт} = 9,81 \text{ вт} = 9,81 \frac{\text{дж}}{\text{сек}};$$

$$1 \text{ дж} = \frac{1 \text{ кГм}}{9,81} = 0,102 \text{ кГм.}$$

Так как  $1 \text{ кал} = 0,427 \text{ кГм}$ , то

$$1 \text{ дж} = \frac{0,102}{0,427} \text{ кал} = 0,24 \text{ кал.}$$

Таким образом,

$$1 \text{ дж} = 0,24 \text{ кал.}$$

Энергия электрического тока определяется по формуле

$$A = I^2 r t \text{ дж.}$$

Так как энергия тока идет на нагрев, то количество тепла, выделяемое током в проводнике, равно:

$$Q = 0,24 I^2 r t \text{ кал.}$$

Эта формула, выражающая закон Джоуля — Ленца, показывает, что количество тепла в калориях, выделяемое током при прохождении по проводнику, равно коэффициенту 0,24, умноженному на квадрат тока в амперах, сопротивление в омах и время в секундах.

**Пример 25.** Определить, сколько тепла выделит ток в  $6 \text{ А}$ , проходя по проводнику сопротивлением  $2 \text{ Ом}$ , в течение  $3 \text{ мин}$ .

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot r \cdot t = 0,24 \cdot 36 \cdot 2 \cdot 180 = 3110,4 \text{ кал.}$$

Формулу закона Джоуля — Ленца можно написать так:

$$Q = 0,24 \cdot I \cdot I \cdot r \cdot t,$$

а так как  $I \cdot r = U$ , то можно написать:

$$Q = 0,24 \cdot I \cdot U \cdot t \text{ кал.}$$

**Пример 26.** Электрическая плитка включена в сеть напряжением 120 В. Ток, протекающий по спирали плитки, 5 А. Требуется определить, сколько тепла выделит ток за 2 часа,

$$Q = 0,24 \cdot I \cdot U \cdot t = 0,24 \cdot 5 \cdot 120 \cdot 7200 = 1\,036\,800 \text{ кал} = 1036,8 \text{ ккал.}$$

### Задачи

**Задача 1** Источник электрической энергии имеет в качестве нагрузки реостат с переменным сопротивлением  $R$ . ЭДС источника  $E = 24 \text{ В}$ . а его внутреннее сопротивление  $r = 1 \text{ Ом}$ . Построить графики зависимости напряжения  $U$  на зажимах источника, мощности источника  $P_{\text{и}}$ , мощности приемника  $P_{\text{п}}$ , КПД  $\eta$  источника, мощности потерь внутри источника  $P_0$  от тока в цепи при изменении сопротивления нагрузки от  $R = \infty$  (холостой ход) до  $R = 0$  (короткое замыкание), считая ЭДС источника постоянной.

**Решение.** Для решения задачи воспользуемся схемой рис. 9. Для сопротивления нагрузки  $R = 11 \text{ Ом}$

$I = \frac{E}{R + r} = \frac{24}{11 + 1} = 2 \text{ А};$	$U = IR = 2 \cdot 11 = 22 \text{ В};$
$P_{\text{и}} = EI = 24 \cdot 2 = 48 \text{ Вт};$	$P_{\text{п}} = I^2 R = 2^2 \cdot 11 = 44 \text{ Вт};$

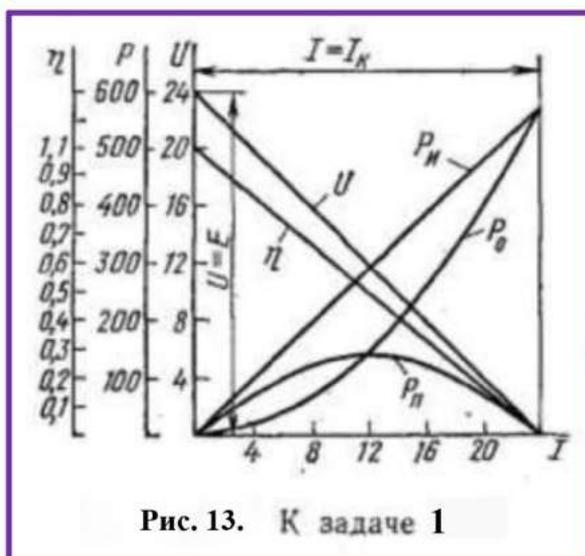
$$P_0 = I^2 r = 2^2 \cdot 1 = 4 \text{ Вт};$$

$$\eta = P_{\text{п}}/P_{\text{н}} = 44/48 = 0,917.$$

Для других величин сопротивления  $R$  результаты подсчетов приведены в табл. 6.

Таблица 6

$R, \text{Ом}$	$\infty$	23	11	7	5	3	2	1	0,2	0
$I, \text{А}$	0	1	2	3	4	6	8	12	20	24
$U, \text{В}$	24	23	22	21	20	18	16	12	4	0
$P_{\text{п}}, \text{Вт}$	0	24	48	72	96	144	192	288	480	576
$P_{\text{г}}, \text{Вт}$	0	23	44	63	80	108	128	144	80	0
$P_0, \text{Вт}$	0	1	4	9	16	36	64	144	400	576
$\eta$	1	0,96	0,917	0,875	0,835	0,75	0,667	0,5	0,167	0



По данным таблицы в прямоугольной системе координат строим график  $U$ ,  $P_{\text{п}}$ ,  $P_{\text{г}}$ ,  $P_0$ ,  $\eta$  в функции  $I$ . Графики показаны на рис. 13.

Дополнительные вопросы к задаче

1. При каком соотношении между сопротивлениями  $R$  и  $r$  мощность приемника получается наибольшей?
2. Почему уменьшается напряжение на зажимах источника при увеличении нагрузки (тока в цепи)?
3. В чем состоит недостаток круто падающей внешней характеристики источника  $U(I)$  с точки зрения условий работы приемников?

падающей внешней характеристики источника  $U(I)$  с точки зрения условий работы приемников?

**Задача 2.** К источнику электрической энергии ЭДС  $E = 18 \text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $r = 0,25 \text{ Ом}$  подключен приемник энергии, имеющий сопротивление  $R = 5,75 \text{ Ом}$ . Начертить схему цепи и определить: 1) напряжение на внешних зажимах источника и его КПД; 2) стоимость

энергии, израсходованной в приемнике за 30 дней при работе по 7 ч в день, если цена электроэнергии 4 коп. за 1 кВт-ч.

**Задача 3.** В электрической цепи, состоящей из источника и приемника электрической энергии, ток  $I = 2 \text{ А}$ . Внутреннее сопротивление источника  $1 \text{ Ом}$ . Сопротивление приемника  $R = 23 \text{ Ом}$ . Начертить схему цепи и определить: 1) ЭДС источника; 2) мощность приемника, мощность и КПД источника.

## Тема 2.3. Расчёт электрических цепей постоянного тока

### 2.3.1. Соединение источников ЭДС.

#### Последовательное соединение источников

Источники ЭДС (аккумуляторы, элементы) включаются между собой последовательно, параллельно и смешанно.

1. Последовательное соединение источников ЭДС. На рис. 14, а представлено последовательное соединение трех аккумуляторов.

Такое соединение аккумуляторов, когда минус каждого предыдущего элемента соединен с плюсом последующего элемента, называется **последовательным соединением**. Группа соединенных между собой аккумуляторов называется **батареей**.

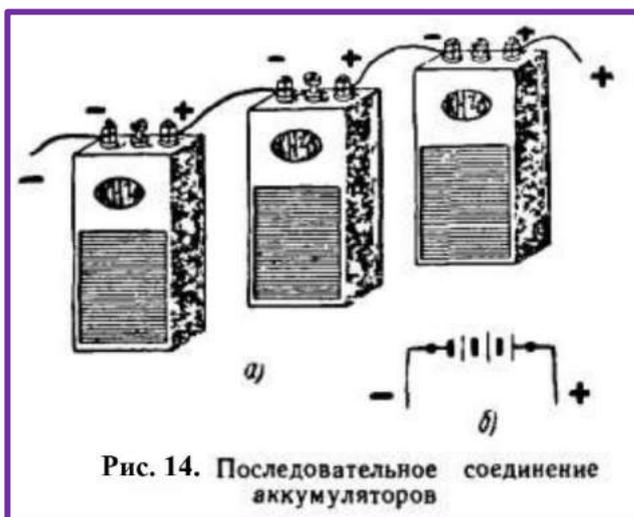


Рис. 14. Последовательное соединение аккумуляторов

Схематически последовательное соединение трех аккумуляторов в батарею показано на рис. 14, б. Так как э. д. с. аккумуляторов в этом случае направлены в одну сторону, ЭДС всей батареи равна их сумме:

$$E = E_1 + E_2 + E_3.$$

Внутреннее сопротивление батареи равно сумме внутренних сопротивлений отдельных аккумуляторов:

$$r_0 = r_{01} + r_{02} + r_{03}.$$

Если батарея окажется замкнутой на внешнее сопротивление  $r$ , то ток в цепи будет найден по формуле:

$$I = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{r_{01} + r_{02} + r_{03} + r}.$$

Последовательно соединяют аккумуляторы в том случае, когда напряжение потребителя выше ЭДС одного аккумулятора, а ток потребителя имеет величину, не превышающую разрядный ток аккумулятора.

Практически приходится соединять между собой в батарее только однотипные аккумуляторы, т. е. имеющие одинаковые ЭДС, внутренние сопротивления и емкость.

В этом случае э. д. с. батареи, состоящей из  $n$  аккумуляторов, равна:

$$E_{\text{бат}} = En.$$

Внутреннее сопротивление батареи

$$r_0 = r_{01}n.$$

Ток батареи, замкнутой на внешнее сопротивление, будет:

$$I = \frac{En}{r_{01}n + r}.$$

Пример. Батарея из пяти аккумуляторов с ЭДС по 1,2 в и внутренним сопротивлением по 0,2 ом замкнута на внешнее сопротивление 11 ом. Определить ток, отдаваемый батареей в сеть.



$$I = \frac{En}{r_{01}n + r} = \frac{1,2 \cdot 5}{0,2 \cdot 5 + 11} = 0,5 \text{ а.}$$

Параллельное соединение источников ЭДС

Если плюсы нескольких аккумуляторов соединить между

собой и вывести общий плюс, а минусы этих же аккумуляторов также соединить между собой и вывести общий минус, то такое соединение будет называться параллельным соединением. На рис.15, а представлено параллельное соединение трех аккумуляторов, а на рис.15, б дана схема того же соединения.

Обязательным условием для параллельного соединения аккумуляторов является равенство их э. д. с., внутренних сопротивлений и емкостей, так как иначе между аккумуляторами будут протекать уравнивающие токи, вредные для батареи.

ЭДС батареи при параллельном соединении равна ЭДС одного аккумулятора:

$$E_{\text{бат}} = E_1 = E_2 = E_3 = \dots E_n.$$

Но так как каждый аккумулятор создает ток в одном направлении, то батарея в целом может отдать в сеть ток больший, чем каждый аккумулятор в отдельности.

Внутреннее сопротивление батареи, состоящей из  $n$  параллельно включенных аккумуляторов, будет и в  $n$  раз меньше сопротивления каждого аккумулятора:

$$r_0 = \frac{r_{01}}{n}.$$

Ток, отдаваемый батареей в сеть, будет:

$$I = \frac{E}{\frac{r_{01}}{n} + r}.$$

Параллельное соединение аккумуляторов применяется в том случае, когда напряжение потребителя равно э. д. с. аккумулятора, а ток, необходимый потребителю, больше разрядного тока одного аккумулятора.

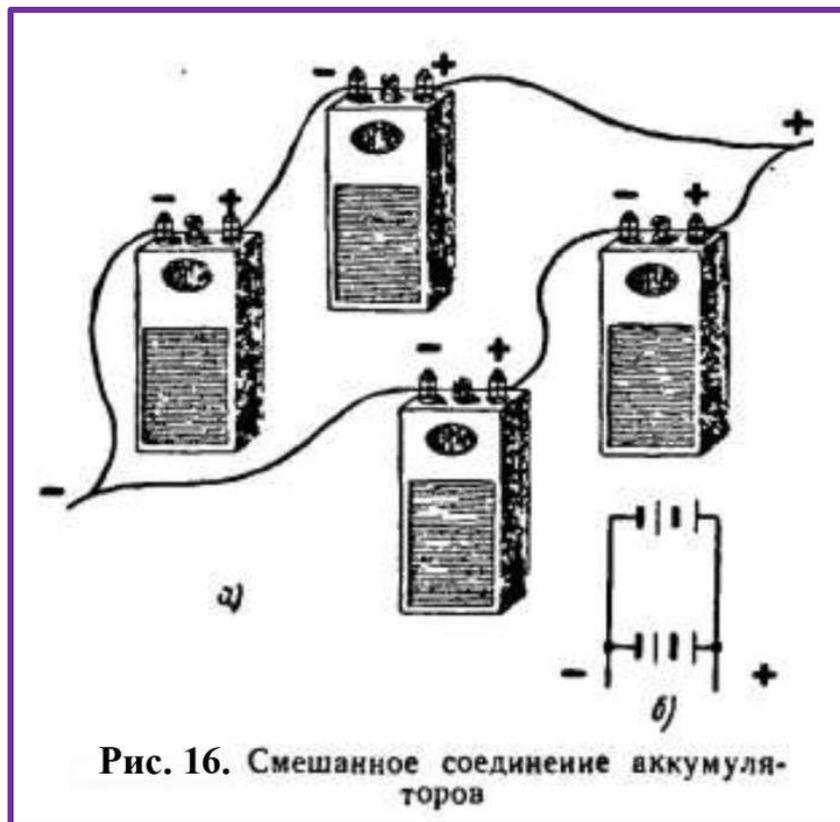
**Пример 27.** Определить ток, отдаваемый в сеть батареей, состоящей из двух параллельно включенных аккумуляторов, если э. д. с. каждого аккумулятора равна 2 в, а внутреннее сопротивление — 0,02 ом. Внешнее сопротивление равно 1,99 ом.

$$I = \frac{E}{\frac{r_{01}}{n} + r} = \frac{2}{\frac{0,02}{2} + 1,99} = 1 \text{ а.}$$

### Смешанное соединение источников ЭДС

Комбинируя последовательное и параллельное соединения, мы получим смешанное соединение аккумуляторов. На фиг. 66, а представлено смешанное соединение четырех аккумуляторов из двух параллельных групп по два элемента в каждой группе, а на фиг. 16, б дана схема этого соединения. ЭДС батареи со смешанным соединением аккумуляторов равна сумме ЭДС элементов, последовательно включенных в каждую группу.

$$E_{\text{бат}} =$$



Внутреннее сопротивление аккумуляторов в группе

$$r_{0_{\text{гр}}} = r_{01}n.$$

Внутреннее сопротивление батареи, состоящей из  $m$  групп,

$$r_{об} = \frac{r_{0гр}}{m} = \frac{r_{01n}}{m}.$$

Ток, отдаваемый батареей в сеть сопротивлением  $r$  Ом,

$$I = \frac{E_{бат}}{r_{об} + r} = \frac{En}{\frac{r_{01n}}{m} + r}.$$

Смешанное соединение аккумуляторов применяется в том случае, когда напряжение и ток потребителя больше ЭДС и разрядного тока одного аккумулятора.

**Пример 28.** Имеется батарея, состоящая из двух групп аккумуляторов по три аккумулятора в группе. Батарея замкнута на сопротивление 1.65 Ом, ЭДС аккумулятора 1.2 В, внутреннее сопротивление 0.1 Ом.

$$I = \frac{En}{\frac{r_{01n}}{m} + r} = \frac{1,2 \cdot 3}{\frac{0,1 \cdot 3}{2} + 1,65} = 2 \text{ а.}$$

Мы разобрали ряд случаев соединения источников ЭДС. Выясним теперь, какой способ соединения является наиболее экономичным с точки зрения максимальной отдачи мощности во внешней цепи. Математика дает ответ на этот вопрос. Оказывается, что для выделения во внешней цепи максимальной полезной мощности необходимо равенство сопротивлений внутренней и внешней части цепи:

$$r_0 = r.$$

### Контрольные вопросы

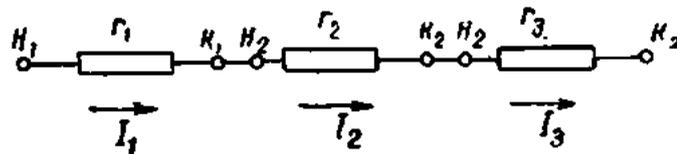
1. Что называется электролизом?
2. От чего зависит количество вещества, выделившегося на электродах при электролизе?
3. Что называется электрохимическим эквивалентом вещества?
4. В чем сущность первого и второго законов Фарадея?
5. Указать техническое применение электролиза.

6. Как устроен простейший гальванический элемент?
7. Как устроены и работают аккумуляторы?
8. Как соединяются между собой источники напряжения?

### 2.3.2. Способы соединения потребителей постоянного тока. Первый закон Кирхгофа

Отдельные проводники электрической цепи могут быть соединены между собой последовательно, параллельно и смешанно.

**Последовательным соединением потребителей** называется такое соединение, когда конец первого проводника соединен с началом второго, конец второго проводника соединен с началом третьего и т. д.



Общее сопротивление цепи, состоящее из нескольких последовательно соединенных проводников, равно сумме сопротивлений отдельных проводников:

$$r = r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n.$$

Ток на отдельных участках последовательной цепи везде одинаков:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I.$$

**Пример 29.** На рис. 17 представлена электрическая цепь, состоящая из трех последовательно включенных сопротивлений  $r_1 = 2$  Ом,  $r_2 = 3$  Ом,  $r_3 = 5$  Ом. Требуется определить показания вольтметров  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  и  $V$ , если ток в цепи равен 4 а.

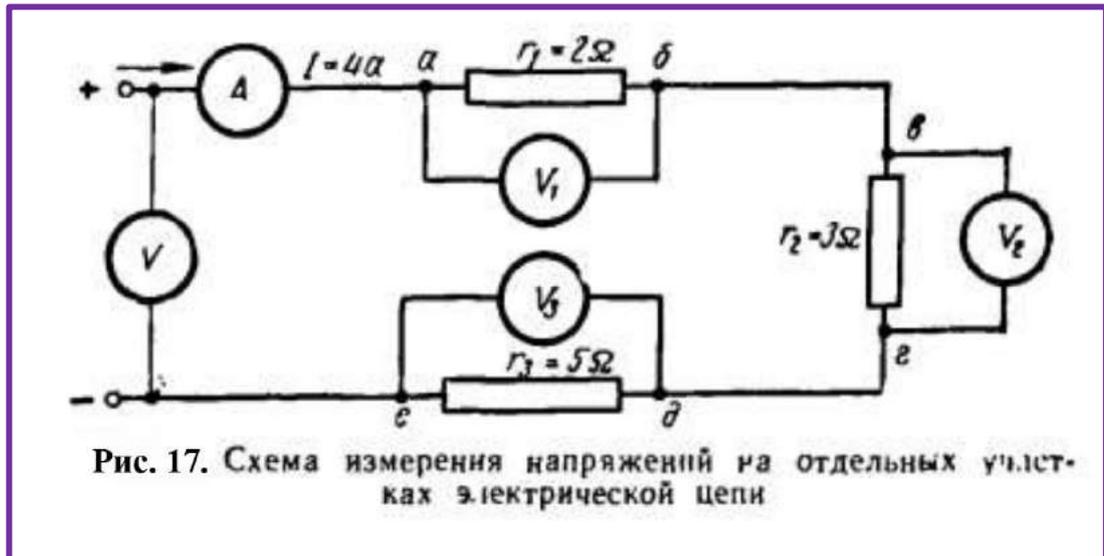
Сопротивление всей цепи

$$r = r_1 + r_2 + r_3 = 2 + 3 + 5 = 10 \text{ ом.}$$

По закону Ома напряжение на зажимах цепи равно току цепи, умноженному на ее сопротивление:

$$U = I \cdot r = 4 \cdot 10 = 40 \text{ в.}$$

Следовательно, вольтметр  $V$ , присоединенный к зажимам источника напряжения, покажет напряжение 40 В.



В сопротивлении  $r_1$  при протекании тока будет падение напряжения:

$$U_1 = I \cdot r_1 = 4 \cdot 2 = 8 \text{ в.}$$

Вольтметр  $V_1$  включенный между точками а и б, покажет 8 в. В сопротивлении  $r_2$  также происходит падение напряжения:

$$U_2 = I \cdot r_2 = 4 \cdot 3 = 12 \text{ в.}$$

Вольтметр  $V_2$ , включенный между точками в и г., покажет 12 в. Падение напряжения в сопротивлении  $r_3$ :

$$U_3 = I \cdot r_3 = 4 \cdot 5 = 20 \text{ в.}$$

Вольтметр  $V_3$ , включенный между точками д и е покажет 20 в.

Если вольтметр присоединить одним концом к точке а, другим концом к точке г, то он покажет разность потенциалов между этими точками, равную сумме падений напряжения в сопротивлениях  $r_1$  и  $r_2$  ( $8+12=20$  в).

Таким образом, вольтметр  $V$ , измеряющий напряжение на зажимах цепи и включенный между точками  $a$  и  $e$ , покажет разность потенциалов между этими точками или сумму падений напряжения в сопротивлениях  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$ .

Отсюда видно, что сумма падений напряжения на отдельных участках электрической цепи равна напряжению на зажимах цепи.

Так как при последовательном соединении ток цепи на всех участках одинаков, то падение напряжения пропорционально сопротивлению данного участка.

**Пример 30.** Три сопротивления 10, 15 и 20 ом соединены последовательно, как показано на рис. 18. Ток в цепи 5 а. Определить падение напряжения на каждом сопротивлении.

$$\begin{aligned}U_1 &= I \cdot r_1 = 5 \cdot 10 = 50 \text{ в,} \\U_2 &= I \cdot r_2 = 5 \cdot 15 = 75 \text{ в,} \\U_3 &= I \cdot r_3 = 5 \cdot 20 = 100 \text{ в.}\end{aligned}$$

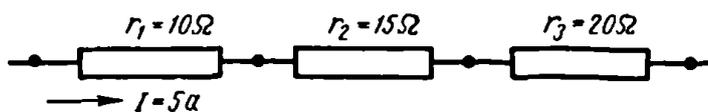


Рисунок 18. К примеру 30

Общее напряжение цепи равно сумме падений напряжения на отдельных участках цепи:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = 50 + 75 + 100 = 225 \text{ в.}$$

### Вопросы для самопроверки

1. При последовательном соединении резисторов:
  - А. Через все резисторы проходит одинаковый ток.
  - Б. Сила тока в каждом резисторе прямо пропорциональна его сопротивлению.
  - В. Сила тока в каждом резисторе обратно пропорциональна его сопротивлению.
  - Г. Сила тока различна в каждом сопротивлении.
2. Если сила тока в каждой точке электрической цепи одинакова, то это цепь:
  - А. Постоянного тока.

- Б. Переменного тока.
- В. Последовательная.
- Г. Параллельная.

3. При последовательном соединении резисторов:

- А. Чем больше сопротивление резистора, тем больший ток он потребляет.
- Б. Чем меньше сопротивление резистора, тем больший ток он потребляет.
- В. Чем ближе к источнику напряжения расположен резистор, тем больший ток он потребляет.
- Г. Сила тока в каждом резисторе одинакова.

4. Чтобы потребители, соединенные последовательно, работали должным образом, необходимо:

- А. Чтобы они соответствовали тому же напряжению.
- Б. Чтобы они соответствовали той же силе тока.
- В. Чтобы их сопротивления были одинаковыми.
- Г. Чтобы они были хорошо изолированы.

5. Сопротивление последовательной цепи равно:

- А. Сумме сопротивлений.
- Б. Обратному значению суммы сопротивлений.
- В. Сумме квадратов сопротивлений.
- Г. Наибольшему сопротивлению, имеющемуся в цепи.

6. Если включить дополнительный резистор в последовательную цепь, ток в цепи:

- А. Не изменится.
- Б. Увеличится.
- В. Уменьшится.
- Г. Зависит от сопротивления резистора.

7. Принятый термин для обозначения потерь напряжения:

- А. Потеря потенциала.
- Б. Разность потенциалов.
- В. Разность напряжений.
- Г. Падение напряжения.

8. Падение напряжения на сопротивлении - это:

- А. Разность потенциалов между двумя точками.
- Б. Снижение напряжения между двумя точками.

- В. Величина напряжения, вызванная протеканием тока через это сопротивление.
- Г. Снижение напряжения источника.

9. Падение напряжения на резисторе в последовательной цепи:

- А. Прямо пропорционально силе тока, протекающего через резистор, и прямо пропорционально его сопротивлению.
- Б. Прямо пропорционально силе тока, протекающего через резистор, и обратно пропорционально его сопротивлению.
- В. Прямо пропорционально сопротивлению и обратно пропорционально силе тока, протекающего через резистор.
- Г. Обратно пропорционально сопротивлению и обратно пропорционально силе тока, протекающего через резистор.

10. При последовательном соединении резисторов напряжение распределяется между ними:

- А. Прямо пропорционально сопротивлениям.
- Б. Обратно пропорционально сопротивлениям.
- В. Поровну.
- Г. Прямо пропорционально току в цепи.

**Параллельным соединением потребителей** называется такое соединение, когда начала всех проводников соединены в одну точку, а концы проводников — в другую точку (рис. 18). Начало цепи присоединяется к одному полюсу источника напряжения, а конец цепи — к другому полюсу.

Из рисунка видно, что при параллельном соединении потребителей для прохождения тока имеется несколько путей. Ток, протекая к точке разветвления А, растекается далее по трём сопротивлениям и равен сумме токов, уходящих от этой точки:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$



Если токи, приходящие к точке разветвления, считать положительными, а уходящие — отрицательными, то для точки разветвления можно написать:

$$\sum_{k=1}^{k=n} I_k = 0,$$

т. е. алгебраическая сумма токов для любой узловой точки цепи всегда равна нулю. Это соотношение, связывающее токи в любой точке разветвления цепи, называется **первым законом Кирхгофа**. Обычно при расчете электрических цепей направления токов в ветвях, присоединенных к какой-либо точке разветвления, неизвестны. Поэтому для возможности самой записи уравнения первого закона Кирхгофа нужно перед началом расчета цепи произвольно выбрать так называемые положительные направления токов во всех ее ветвях и обозначить их стрелками на схеме.

Пользуясь законом Ома, можно вывести формулу для подсчета общего сопротивления при параллельном соединении потребителей.

Общий ток, приходящий к точке А, равен:

$$I = \frac{U}{r}$$

Токи в каждой из ветвей имеют значения:

$$I_1 = \frac{U}{r_1}; \quad I_2 = \frac{U}{r_2}; \quad I_3 = \frac{U}{r_3}.$$

По первому закону Кирхгофа

$$\frac{U}{r} = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{r_2} + \frac{U}{r_3}.$$

или

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Вынося  $U$  в правой части равенства за скобки, получим:

$$\frac{U}{r} = U \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \right).$$

Сокращая обе части равенства на  $U$ , получим формулу подсчета общей проводимости:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}$$

или

$$g = g_1 + g_2 + g_3.$$

Таким образом, при параллельном соединении увеличивается не сопротивление, а проводимость.

**Пример 31.** Определить общее сопротивление трех параллельно включенных сопротивлений, если  $r_1 = 2$  Ом,  $r_2 = 3$  Ом,  $r_3 = 4$  Ом.

$$g = g_1 + g_2 + g_3 = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} = \frac{6 + 4 + 3}{12} = \frac{13}{12} \frac{1}{\text{Ом}},$$

откуда

$$r = \frac{12}{13} = 0,92 \text{ Ом}.$$

**Пример 32.** Пять сопротивлений 20, 30, 15, 40 и 60 Ом включены параллельно в сети. Определить общее сопротивление:

$$\begin{aligned} g = g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5 &= \frac{1}{20} + \frac{1}{30} + \frac{1}{15} + \frac{1}{40} + \frac{1}{60} = \\ &= \frac{6 + 4 + 8 + 3 + 2}{120} = \frac{23}{120} \frac{1}{\text{Ом}}, \end{aligned}$$

откуда

$$r = \frac{120}{23} = 5,2 \text{ Ом}.$$

Следует заметить, что при подсчете общего сопротивления разветвления оно получается всегда меньше, чем самое меньшее сопротивление, входящее в разветвление.

Если сопротивления, включенные параллельно, равны между собой, то общее сопротивление  $r$  цепи равно сопротивлению одной ветви  $r_1$  деленному на число ветвей  $n$ :

$$r = \frac{r_1}{n}.$$

**Пример 33.** Определить общее сопротивление четырех параллельно включенных сопротивлений по 20 Ом каждое:

$$r = \frac{r_1}{n} = \frac{20}{4} = 5 \text{ Ом}.$$

Для проверки попробуем найти сопротивление разветвления по формуле:

$$g = g_1 + g_2 + g_3 + g_4 = \frac{1}{20} + \frac{1}{20} + \frac{1}{20} + \frac{1}{20} = \frac{4}{20} \frac{1}{\text{Ом}},$$

откуда

$$r = \frac{20}{4} = 5 \text{ Ом}.$$

Как видим, ответ получается тот же.

**Пример 34.** Пусть требуется определить токи в каждой ветви при параллельном их соединении, изображенном на рис. 19, а.

Найдем общее сопротивление цепи:

$$g = g_1 + g_2 + g_3 = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{6} = \frac{6 + 3 + 2}{12} = \frac{11}{12} \frac{1}{\text{Ом}},$$

откуда

$$r = \frac{12}{11} = 1,09 \text{ Ом}.$$

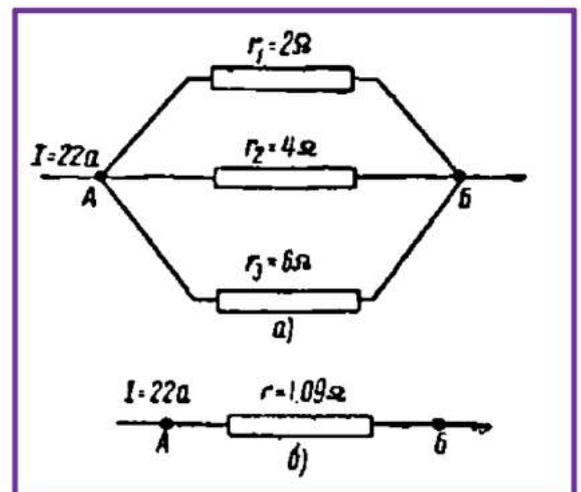


Рис. 19. К примеру 34

Теперь все разветвление мы можем изобразить упрощенно как одно сопротивление (рис. 19, б).

Падение напряжения на участке между точками А к Б будет:

$$U = I \cdot r = 22 \cdot 1,09 = 24 \text{ в.}$$

Возвращаясь снова к рис. 19, а, видим, что все три сопротивления окажутся под напряжением 24 в, так как они включены между точками А и Б.

Рассматривая первую ветвь разветвления с сопротивлением  $r_1$ , мы видим, что напряжение на этом участке 24 в, сопротивление участка 2 ом.

По закону Ома для участка цепи ток на этом участке будет:

$$I_1 = \frac{U}{r_1} = \frac{24}{2} = 12 \text{ а.}$$

Ток второй ветви

$$I_2 = \frac{U}{r_2} = \frac{24}{4} = 6 \text{ а.}$$

Ток третьей ветви

$$I_3 = \frac{U}{r_3} = \frac{24}{6} = 4 \text{ а.}$$

Проверим по первому закону Кирхгофа

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 12 + 6 + 4 = 22 \text{ а.}$$

Следовательно, задача решена верно.

Обратим внимание на то, как распределяются токи в ветвях нашего параллельного соединения.

**Первая ветвь:  $r_1 = 2 \text{ ом}, I_1 = 12 \text{ а.}$**

**Вторая ветвь:  $r_2 = 4 \text{ ом}, I_2 = 6 \text{ а.}$**

**Третья ветвь:  $r_3 = 6 \text{ ом}, I_3 = 4 \text{ а.}$**

Как видим, сопротивление первой ветви в два раза меньше сопротивления второй ветви, а ток первой ветви в два раза больше тока второй ветви. Сопротивление третьей ветви в три раза больше сопротивления

первой ветви, а ток третьей ветви в три раза меньше тока первой ветви. Отсюда можно сделать вывод, что токи в ветвях при параллельном соединении распределяются обратно пропорционально сопротивлениям этих ветвей. Таким образом, по ветви с большим сопротивлением потечет ток меньший, чем по ветви с малым сопротивлением.

Для двух параллельных ветвей можно также, конечно, пользоваться данной выше формулой.

Однако общее сопротивление в этом случае легче подсчитать по формуле:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{r_1 + r_2}{r_1 \cdot r_2}$$

или окончательно:

$$r = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}.$$

#### Вопросы для самопроверки

1. Одинаковые сопротивления присоединены параллельно к источнику напряжения.
  - А. Более высокое сопротивление находится под более высоким напряжением.
  - Б. Более низкое сопротивление находится под более низким напряжением.
  - В. Все сопротивления находятся под одинаковым напряжением.
  - Г. Напряжения разделяются в прямо пропорциональной зависимости от сопротивлений.
2. Для того чтобы параллельно соединенные потребители функционировали должным образом, они должны быть:
  - А. Рассчитаны на присоединение к одному источнику напряжения (напряжение сети).
  - Б. Рассчитаны на протекание одинакового тока.
  - В. Одинакового сопротивления.
  - Г. Хорошо изолированы.
3. К узлу подходят три провода. По каждому протекает ток 5 А. От узла отходит один провод, по которому протекает ток:  
А. 3/5 А.      Б. 3      А. В.      15 А.      Г. 1 А.

4. Четыре лампы присоединены параллельно к источнику напряжения, причем каждая потребляет ток силой 0,5 А. Суммарное потребление тока от источника составит:  
А. 0,5 А.      Б. 2А.      В. 4 А.      Г.1 А.
5. Пять ламп одинакового сопротивления присоединены параллельно к источнику напряжения. Суммарный ток составляет 5 А. Ток каждой лампочки равен:  
А. 5 А.      Б.1А.      В. 25 А.      Г. 2,5 А.
6. Четыре лампы одинакового сопротивления присоединены параллельно к источнику напряжения 100 В. Каждая лампочка рассчитана на напряжение:  
А. 25 В.      Б. 400 В.      В.100 В.      Г.2,5 В.
7. При параллельном соединении резисторов:  
А. Ток, протекающий через каждый резистор, не зависит от токов, протекающих через другие резисторы.  
Б. Ток, протекающий через каждый резистор, зависит от токов, протекающих через другие резисторы.  
В. Ток, протекающий через каждый резистор, зависит от тока в резисторе с наибольшим сопротивлением.  
Г. Все ответы неправильные.
8. В параллельно соединенных сопротивлениях токи распределяются:  
А. В соответствии с законом Кирхгофа.  
Б. В соответствии с законом Ома.  
В. Прямо пропорционально сопротивлениям.  
Г. Обратно пропорционально сопротивлениям.
9. При параллельном соединении потребителей:  
А. Через нагрузку с наименьшим сопротивлением протекает наибольший ток.  
Б. Через нагрузку с наибольшим сопротивлением протекает наибольший ток.  
В. Через каждую нагрузку протекает одинаковый ток.  
Г. Сила тока вообще не зависит от сопротивления.

10. При параллельном соединении резисторов сопротивление цепи будет:

- А. Равно сумме сопротивлений.
- Б. Меньше самого низкого сопротивления.
- В. Больше самого высокого сопротивления.
- Г. Меньше самого высокого сопротивления, но больше самого низкого сопротивления.

**Смешанным соединением потребителей** называется такое соединение, где имеются и последовательное и параллельное соединения отдельных проводников. Примером может служить соединение, изображенное на рис. 20.



**Пример 35.** Определить общее сопротивление смешанного соединения, представленного на рис. 19, если

$$r_1 = 2 \text{ ом}, r_2 = 3 \text{ ом}, r_3 = 5 \text{ ом}, r_4 = 4 \text{ ом}, \\ r_5 = 8 \text{ ом} \text{ и } r_6 = 6 \text{ ом}.$$

Находим общее сопротивление первого разветвления:

$$g_{1,2} = g_1 + g_2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} = \frac{3+2}{6} = \frac{5}{6} \frac{1}{\text{ом}},$$

откуда

$$r_{1,2} = \frac{6}{5} = 1,2 \text{ ом}.$$

Общее сопротивление второму разветвления:

$$g_{4,5,6} = g_4 + g_5 + g_6 = \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{6} = \frac{6 + 3 + 4}{24} = \frac{13}{24} \frac{1}{\text{ом}}$$

откуда

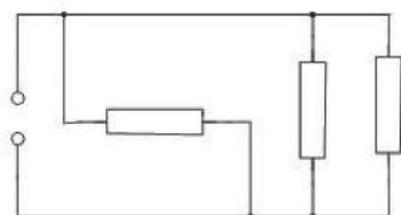
$$r_{4,5,6} = \frac{24}{13} = 1,85 \text{ ом.}$$

Общее сопротивление цепи:

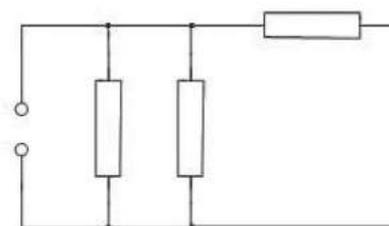
$$r = r_{1,2} + r_3 + r_{4,5,6} = 1,2 + 5 + 1,85 = 8,05 \text{ ом.}$$

Вопросы для самопроверки

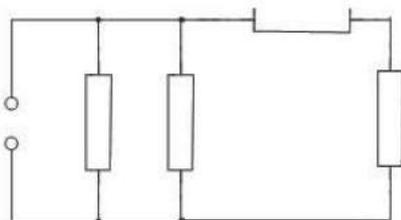
1. На какой схеме показано смешанное соединение?



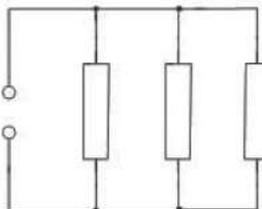
А



Б

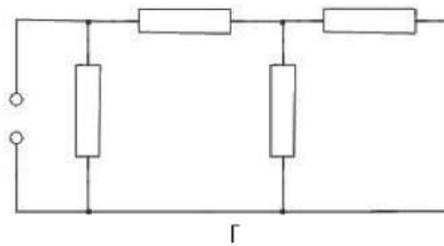
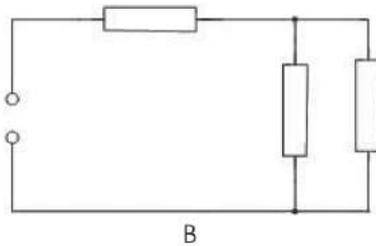
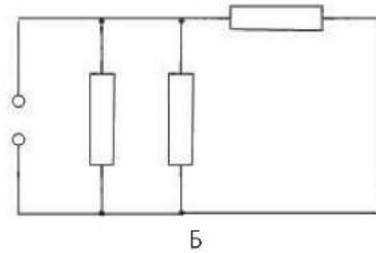
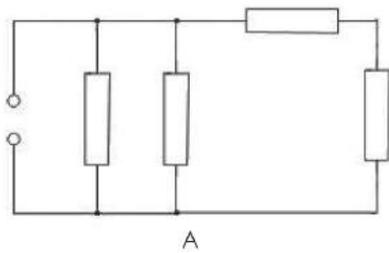


В



Г

2. На какой схеме не показано смешанное соединение?



3. Резисторы, соединенные смешанно:

А. Часть из них соединена параллельно, часть из них соединена последовательно.

Б. Часть из них соединена параллельно, остальные - также параллельно.

В. Часть из них соединена последовательно, остальные - также последовательно.

Г. Все резисторы соединены либо параллельно, либо последовательно.

4. Сопротивление электрической цепи смешанного соединения устанавливается согласно:

А. Силам токов и падениям напряжений в цепи.

Б. Способу соединения резисторов.

В. Величинам сопротивлений и способу соединения.

Г. Силам токов и числу резисторов, соединенных параллельно.

Д.

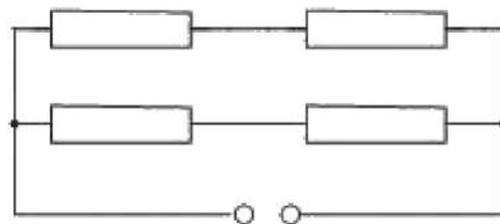
5. На рисунке показана:

А. Параллельная цепь.

Б. Последовательная цепь.

В. Смешанная цепь.

Г. Ни один ответ не является правильным.



### 2.3.3. Делители напряжения, потенциометры, реостаты, резисторы.

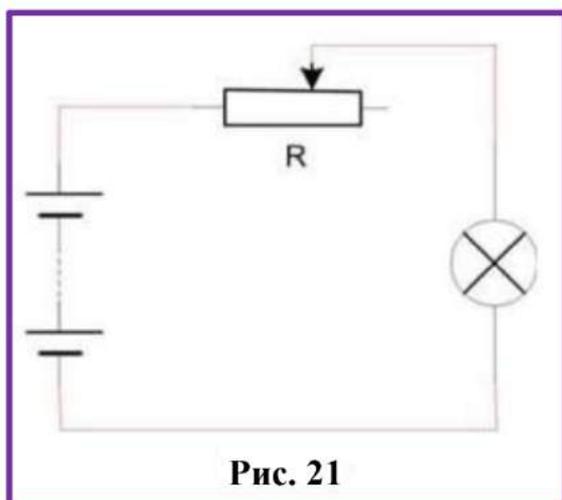


Рис. 21

До сих пор мы были знакомы с реостатом как с переменным резистором, который служит для изменения силы тока в последовательной цепи или для сброса избыточного напряжения (рис. 21).

Путем изменения сопротивления  $R$  мы изменяем силу тока в цепи и приводим напряжение на лампочке в соответствии с необходимым. При таком соединении только часть реостата задействована в цепи. При полном сопротивлении он

задействован полностью.

Теперь познакомимся с другим способом включения реостата в электрическую цепь (рис. 22).

При таком подключении реостат полностью включен в электрическую цепь и может изменять не силу тока в ней, а напряжение между точками А и В.

Подключим вольтметр между этими точками (рис. 22).

Если передвигать ползунок реостата от одного конца к другому, то можно убедиться, что вольтметр будет показывать различные на-

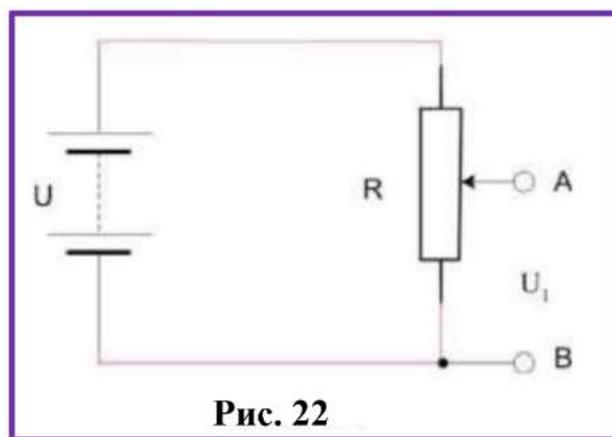


Рис. 22

пряжения от 0 до  $U$ . Можно сказать, что ползунок делит реостат на два сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , соединенных последовательно, но их величины мы можем изменять по нашему желанию при одном условии:  $R_1 + R_2 = R$ .

Добавив дополнительный вольтметр (рис. 23) и передвигая постепенно ползунок реостата от одного конца к другому, мы можем убедиться, что этим самым мы

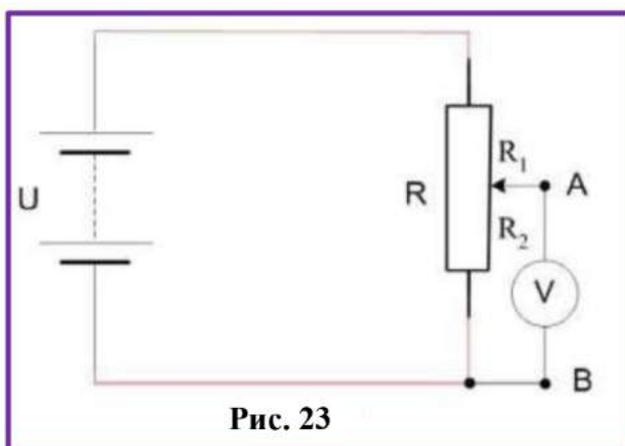


Рис. 23

изменяем по нашему желанию напряжения АВ и АС, причем  $U_{AB} + U_{AC} = U$ .

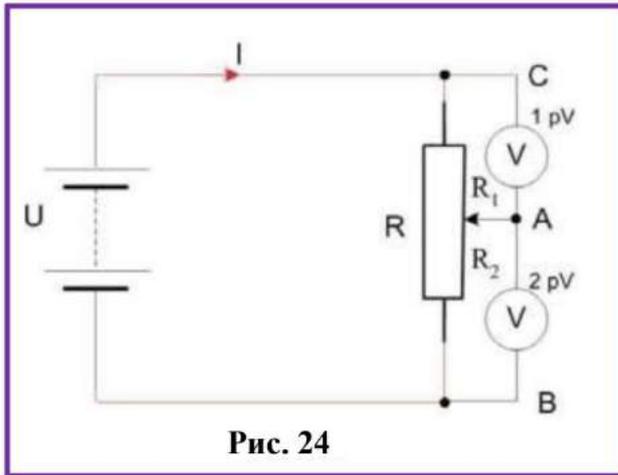
По этой причине реостат, включенный подобным образом, называется **делитель напряжения, или потенциометр**.

Сила тока в цепи  $I = U/R$ .

Напряжение АВ:  $U_{AB} = IR_2 = UR_2/R$ .

Напряжение АС:  $U_{AC} = IR_1 = UR_1/R$ .

**Пример 36.** На рис. 24 изображен реостат, включенный в качестве потенциометра. Определить  $U_{AB}$ , если  $R_2 = 16$  Ом.

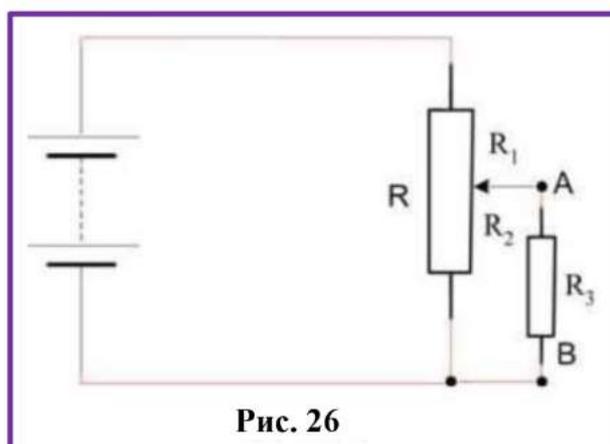
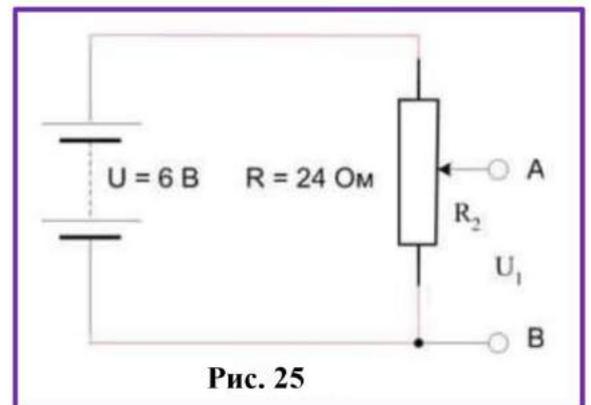


$$I = U/R = 6/24 = 0,25 \text{ A.}$$

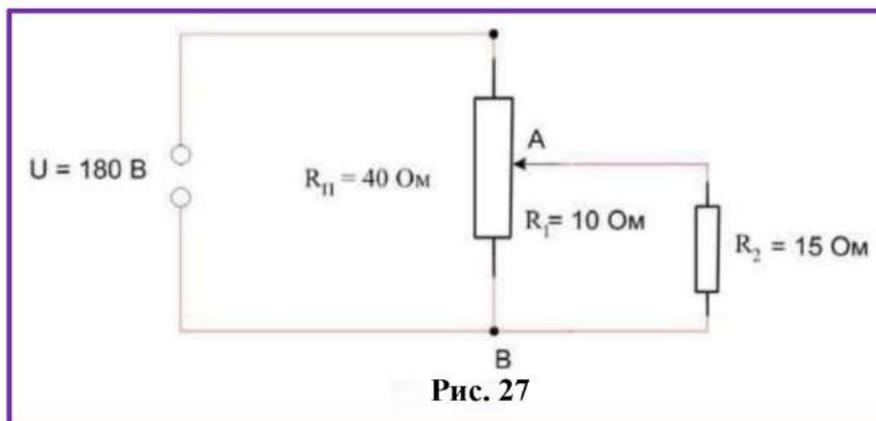
$$U_{AB} = IR_2 = 0,25 \times 16 = 4 \text{ В.}$$

Мы пользуемся делителем напряжения, когда потребитель предназначен для напряжения ниже, чем напряжение источника. Для этого мы подключаем нагрузку между точками А и В, как показано на рис. 25.

Если сопротивление нагрузки  $R_3$  значительно ниже, по сравнению с сопротивлением  $R_2$ , то цепь, показанная на рис. 26, будет цепью смешанного соединения, рассчитываемой по общим правилам смешанных цепей.



**Пример 37.** Определить силу тока, протекающего через резистор  $R_2$  (рис. 27).

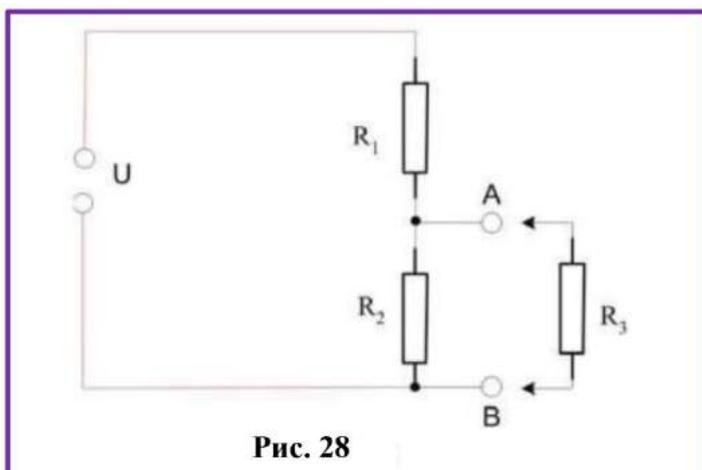


$$R = (R_{II} - R_1) + R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 40 - 10 + 150/25 = 36 \text{ Ом.}$$

$$I = U/R = 180/36 = 5 \text{ А.}$$

$$U_{AB} = IR_{1,2} = 5 \times 6 = 30 \text{ В.}$$

$$I_{R_2} = U_{AB}/R_2 = 30/15 = 2 \text{ А.}$$



Делитель напряжения может быть также выполнен соединением постоянных резисторов, и в этом случае он представляет обычную смешанную цепь (рис. 28).

Принципиальная разница между реостатным делителем напряжения и резисторным состоит в том, что первый делитель изменяет напряжение плавно, а второй – ступенчато.

### 2.3.4. Второй закон Кирхгофа. Применение законов Кирхгофа для расчета электрических цепей

Выражение  $\sum E = \sum IR$  представляет собой второй закон Кирхгофа. Формула показывает, что во всяком замкнутом контуре алгебраическая сумма электродвижущих сил равна алгебраической сумме падений напряжений.

*Задачей расчета* электрической цепи обычно является определение токов, напряжений и мощностей всех или части ветвей цепи при известных элементах, составляющих цепь, и ее конфигурации. Классическим приемом

расчета сложных электрических цепей является непосредственное применение законов Кирхгофа:

1. Сумма токов, входящих в узел, равна сумме токов, выходящих из него.
2. Сумма падений напряжений в последовательной цепи равна напряжению источника.

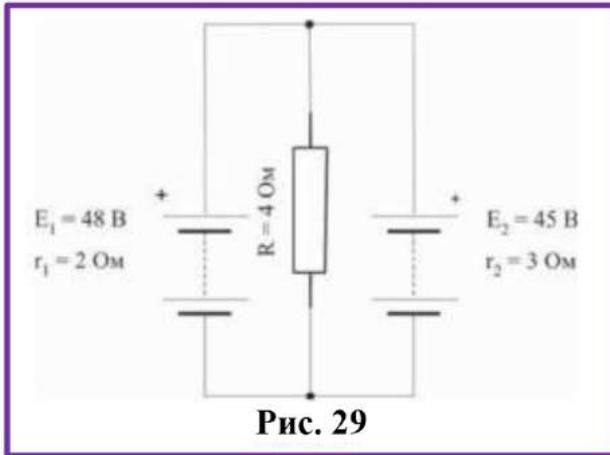


Рис. 29

**Пример 38.** Определить ток в резисторе  $R$  (рис. 29).

Сначала определим направления токов в каждой ветви (рис. 30).

Согласно закону узла:

$$I_3 = I_1 + I_2.$$

Согласно второму закону Кирхгофа по отношению к первой ветви:

$$E_1 = I_1 R_1 + I_3 R;$$

по отношению ко второй ветви:

$$E_2 = I_2 R_2 + I_3 R.$$

Подставим числовые данные в эти равенства:

Подставим во второе равенство

$$\begin{aligned} I_2 &= I_3 - I_1; \\ 48 &= 2I_1 + 4I_3. \\ 45 &= 3I_3 - 3I_1 + 4I_3. \end{aligned}$$

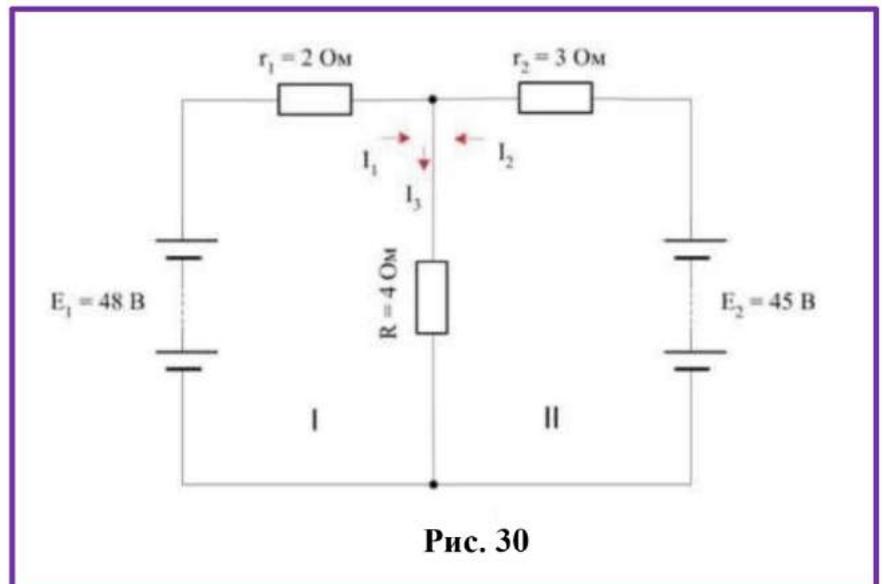


Рис. 30

Откуда:

$$\begin{array}{r|l} 48 = 2I_1 + 4I_3. & \times 3 \\ 45 = -3I_1 + 7I_3. & \times 2 \end{array}$$

Складываем два полученных равенства:

$$\begin{aligned} 144 &= 6I_1 + 12I_3. \\ 90 &= -6I_1 + 14I_3. \\ \hline 234 &= 0 + 26I_3. \end{aligned}$$

Откуда:

$$I_3 = 234 / 26 = 9 \text{ А.}$$

### Список учебной литературы Основные источники

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника (3 – е изд.) (в электронном формате) 2018
2. Гальперин М.В. Электротехника и электроника Издательство ФОРУМ 2019

### Дополнительные источники

3. Иванов И.И., Соловьев Г.И., Фролов В. Я. Электротехника и основы электроники: Учебник. — 8е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2016. — 736 с. ЭБС ЛАНЬ
4. И.О. Мартынова. Электротехника: учебник/. — М.: КНОРУС, 2015. — 304 с. — (Среднее профессиональное образование)
5. Шестёркин А.Н. Введение в электротехнику. Элементы и устройства вычислительной техники. Учебное пособие для вузов, 2015г - коллекция Инженерно-технической науки - Издательство Горячая линия - Телеком ЭБС ЛАНЬ
6. И. А. Данилов П. М. Иванов «Общая электротехника с основами электроники» Учеб. пособие для студ. не электротехнических спец. Учеб. заведений /М.: Высш. школ, 2005. -752 с.
7. В. А. Гаврилюк. Общая электротехника с основами электроники. Учебник для техникумов/ В.А. Гаврилюк,
8. Б.С. Гершунский, А.В. Ковальчук, Ю.А. Куницкий, А.Г. Шаповаленко «Общая электротехника с основами электроники» - Киев: Высшая школа. 1980. - 480 с.

### Интернет-ресурсы

[http://www.ielectro.ru/Products.html?fn\\_tab2doc=4](http://www.ielectro.ru/Products.html?fn_tab2doc=4)  
<http://electricalschool.info/spravochnik/electroteh/>  
<http://docs.cntd.ru/document/1200011373> <http://www.sonel.ru/ru/biblio/theory/>  
<http://fcior.edu.ru/search.page?phrase=%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0> <http://any-book.org/download/69479.html>