

## Лекция №2. Законы Ома

**Цель:** выяснить природу электрического тока, условия его появления и существования, определить его количественные характеристики и законы.

### **Электрическая цепь**

*Электрической цепью* называют совокупность устройств, предназначенных для получения, передачи, преобразования и использования электрической энергии.

Электрическая цепь состоит из отдельных устройств – элементов электрической цепи.

*Источниками* электрической энергии являются электрические генераторы, в которых механическая энергия преобразуется в электрическую, а также первичные элементы и аккумуляторы, в которых происходит преобразование химической, тепловой, световой и других видов энергии в электрическую.

К *потребителям* электрической энергии относятся электродвигатели, различные нагревательные приборы, световые приборы и т. д. Все потребители электрической энергии принято характеризовать некоторыми параметрами.

Параметры определяют свойства элементов поглощать энергию из электрической цепи и преобразовывать ее в другие виды энергии (необратимые процессы), а также создавать собственные электрические или магнитные поля, в которых энергия способна накапливаться и при определенных условиях возвращаться в электрическую цепь. Элементы электрической цепи постоянного тока задаются только одним параметром – сопротивлением. *Сопротивление* определяет свойство элемента поглощать энергию из электрической цепи и преобразовывать ее в другие виды энергии.

*Передающие элементы цепи* связывают источники и приемники. Кроме электрических проводов в это звено могут входить аппараты для включения и отключения цепи, приборы для измерения электрических параметров (амперметры, вольтметры), устройства защиты (предохранителей), преобразующие устройства (трансформаторы) и др.

Любая электрическая цепь характеризуется током, электродвижущей силой и напряжением.

### **Понятие об электрическом токе**

Упорядоченное движение электрических зарядов называется *электрическим током*. Ток, возникающий в проводнике вследствие того, что в нем создается электрическое поле, называется током проводимости.

О наличии тока в цепи можно судить по следующим признакам: 1) нагревание проводников током (*тепловое действие тока*); 2) образование вокруг проводника с током магнитного поля (*магнитное действие тока*); 3) разложение электролита, по которому проходит ток, на составные химические элементы (*химическое действие тока*).

Для появления и существования тока проводимости необходимы *два условия*.

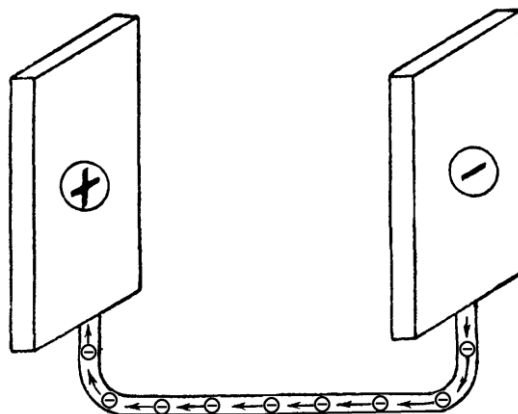
Первое – *наличие* в данной среде *носителей заряда*, т.е. заряженных частиц, которые могли бы в ней перемещаться.

Второе – *наличие* в данной среде *электрического поля*, энергия которого затрачивалась бы на перемещение электрических зарядов.

В проводящих растворах подвижными заряженными частицами являются ионы. В газах могут существовать в подвижном состоянии ионы и электроны.

Электрический ток в металлических проводниках представляет собой движение электронов. Свободные электроны в проводниках находятся все время в состоянии хаотического (беспорядочного) движения. Они движутся в междумолекулярном пространстве проводника в различных направлениях и с различными скоростями, непрерывно сталкиваются с молекулами проводника, выбивают из них новые электроны, занимают сами их место и т. д.

Возьмем две металлические пластины (см. рис.). Зарядим одну из них положительно (недостаток электронов), а другую – отрицательно (избыток электронов). Потенциал первой пластины будет положительным, а потенциал второй пластины – отрицательным, т. е. между пластинами возникает разность потенциалов. Соединим теперь пластины между собой медной проволокой (проводником). Свободные электроны устремятся с правой пластины на левую по соединительному проводнику. К беспорядочному движению электронов прибавится еще упорядоченное движение их в определенном направлении (справа налево).



Движение электронов в проводнике будет походить на движение роя комаров, гонимого ветром. Внутри самого роя комары беспорядочно движутся во всех направлениях, но вместе с тем весь рой, как целое, перемещается по ветру.

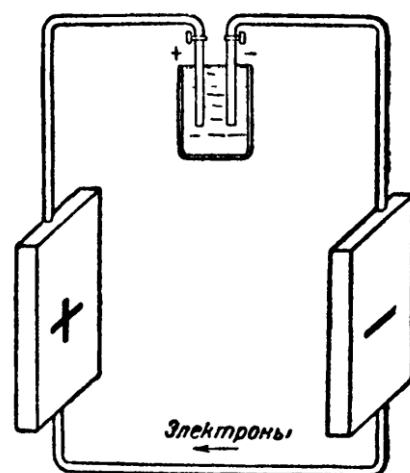
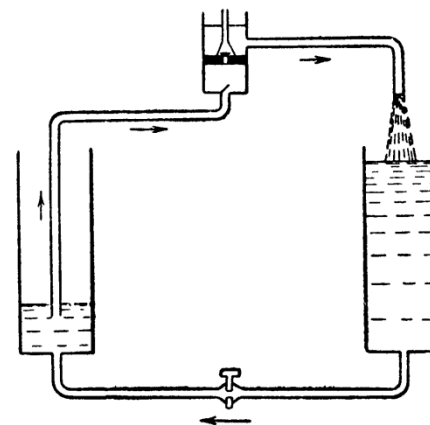
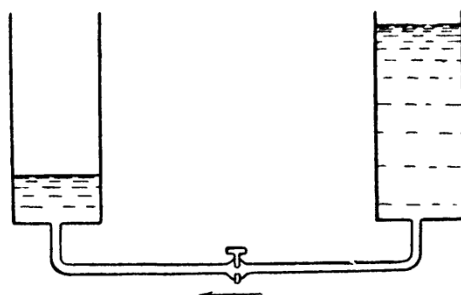
Однако, движение электронов в проводнике, соединяющем две заряженные металлические пластины, не может быть продолжительным. Действительно, число электронов на положительной пластине будет возрастать, а на отрицательной убывать. В конце концов, количество электронов на обеих пластинах уравнивается и пластины приобретут одинаковый потенциал. Тогда и ток в проводнике прекратится.

Итак, необходимым условием для протекания электрического тока по проводнику является наличие разности потенциалов (напряжения) между его началом и концом.

Для пояснения можно привести следующий пример. Представим себе два сосуда, соединенных трубкой и наполненных водой, примем уровни воды в сосудах различны (см. рис.). При открытии крана вода по трубке, соединяющей сосуды, устремится из сосуда с более высоким уровнем (потенциалом) в сосуд с более низким уровнем (потенциалом). Движение (ток) воды прекратится, как только уровень воды в обоих сосудах сделается одинаковым, т. е. исчезнет разность уровней (разность потенциалов). Необходимым условием для движения воды в трубке является наличие разности уровней воды в сосудах или, проще говоря, напора воды (напряжения).

Если мы будем при помощи насоса все время поддерживать разность уровней воды в сосудах (см. рис.), то по трубке, соединяющей сосуды, будет двигаться непрерывающийся поток воды. Вода будет беспрерывно циркулировать по этому замкнутому пути. При этом насос будет совершать работу по подъему воды от точки с низким уровнем к точке с высоким уровнем.

Подобным же образом при помощи какого-нибудь «электрического насоса» мы можем поддерживать разность потенциалов между пластинами, и тогда по проводнику, соединяющему пластины, будет протекать



непрекращающийся (постоянный) поток электронов, т. е. постоянный электрический ток. Таким «электрическим насосом» является, например, обычный гальванический элемент (см. рис.).

Таким образом, для поддержания постоянного электрического тока в проводнике необходимо поддерживать на концах проводника постоянную разность потенциалов. Электрическая цепь тока должна быть при этом замкнутой.

Работа, совершаемая «электрическим насосом» по поднятию одного единичного заряда от низшего потенциала к высшему, называется электродвижущей силой (сокращенно ЭДС). Таким образом, ЭДС является причиной, поддерживающей разность потенциалов или напряжение.

Электродвижущая сила так же, как и напряжение, измеряется в вольтах, киловольтах, милливольтках и микровольтах в зависимости от ее величины.

Электродвижущую силу в формулах обозначают буквой  $E$ .

### **Направление и сила тока**

Свободные электроны в проводнике всегда движутся от низкого потенциала в сторону более высокого потенциала. Но еще до открытия электронов, когда природа электрического тока была недостаточно ясной, *направлением тока* условились считать *направление движения положительных частиц*, которые движутся от большего потенциала к меньшему, т. е. в направлении, противоположном действительному движению электронов в проводнике.

Чтобы не изменять установившихся положений, решили сохранить эту условность и после открытие электронов.

Иногда электрический ток создается не движением электронов, а движением положительно заряженных частиц – ионов (например, в газовых трубках). В этом случае направление действительного движения электрических зарядов (ионов) совпадает с условным направлением электрического тока.

Число упорядоченно движущихся по проводнику электронов и средняя скорость их упорядоченного движения определяют величину заряда, проходящего за единицу времени через сечение проводника, т. е. *силу тока* в проводнике.

Таким образом, силой электрического тока  $I$  в проводнике называется физическая величина, численно равная полному заряду  $q$ , проходящему через сечение проводника в единицу времени  $t$

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

Основной единицей в СИ является единица силы тока – *ампер (А)*. При силе тока 1 А через сечение проводника в 1 с проходит заряд, равный 1 Кл, следовательно,  $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$ .

### **Закон Ома для однородного участка цепи**

При токе заряды движутся, так как внутри проводника существует электрическое поле, которое вызывает и поддерживает упорядоченное движение зарядов. Поэтому между концами проводника с током существует разность потенциалов  $U$  (ее часто называют напряжением или падением напряжения на соответствующем участке). Сила тока является функцией этой разности потенциалов:

$$I = f(U).$$

Вид этой функции обычно довольно сложен. Но есть простой частный случай, очень важный практически (токи в металлах и жидкостях), когда при данных внешних условиях (в частности, температуре) сила тока  $I$  оказывается пропорциональной разности потенциалов  $U$ :

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

где величина  $R$  называется сопротивлением проводника и выражается в *омах (Ом)*.

Это известный *закон Ома для участка цепи*: сила тока, протекающего по участку цепи, прямо пропорциональна напряжению, приложенному к концам участка, и обратно пропорциональна его сопротивлению.

### **Сопротивление и проводимость**

Электроны, двигаясь по проводнику, сталкиваются с его молекулами. Как часто происходят эти столкновения, зависит в значительной мере от строения вещества проводника, т. е. от того, насколько «тесно» расположены молекулы в проводнике, от размеров молекул, от количества свободных электронов и т. п. При каждом столкновении с молекулой электрон теряет свою скорость, приобретенную под действием разности потенциалов. Следовательно, чем больше таких столкновений будут испытывать электроны на своем пути, тем меньше будет средняя скорость их движения вдоль проводника.

Столкновения электронов с молекулами проводника препятствуют продвижению электронов и служат причиной сопротивления, оказываемого проводником электрическому току. Электрическое сопротивление аналогично трению, затрудняющему механическое движение. Например, трение воды о стенки трубы замедляет течение воды в ней.

В СИ за единицу электрического сопротивления принят Ом. Более крупными единицами электрического сопротивления являются килоом (кОм) и мегаом (МОм):  $1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом}$ ;  $1 \text{ МОм} = 10^6 \text{ Ом}$ .

Устройства, имеющие сопротивления и включаемые в электрическую цепь для ограничения или регулирования тока, называются *резисторами*.

Опыты показали, что электрическое сопротивление зависит от материала, размеров (длины, поперечного сечения) и температуры проводников. Для сравнения сопротивлений различных материалов введено понятие об удельном электрическом сопротивлении.

Сопротивление, которым обладает изготовленный из данного материала провод длиной 1 м с поперечным сечением  $1 \text{ мм}^2$  при температуре  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , называют *удельным электрическим сопротивлением*. Удельное сопротивление обозначают  $\rho$  и выражают в  $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ .

Выясним влияние длины металлического проводника  $l$  и его сечения  $S$  на электрическое сопротивление. Известно, что сопротивление проводника вызвано столкновением движущихся электронов с атомами и молекулами проводника. Количество таких столкновений, а значит, и электрическое сопротивление возрастает при удлинении проводника и уменьшаются с увеличением ее поперечного сечения. Поэтому сопротивление проводника определяют по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

где  $l$  – длина проводника, м,  $S$  – площадь поперечного сечения,  $\text{мм}^2$ .

Величина, обратная сопротивлению ( $1/R$ ) называется проводимостью и обозначается буквой  $G$ . Единицей измерения проводимости служит Сименс – величина, обратная Ом. Если, например, сопротивление какого-либо проводника равно  $10 \text{ Ом}$ , то его проводимость равна  $0,1 \text{ Сименса}$ .

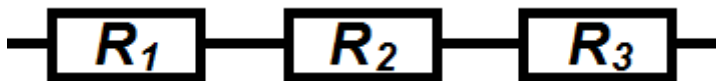
### **Последовательное, параллельное и смешанное соединения**

Сопротивления, входящие в электрическую цепь, могут быть соединены между собой различными способами.

Если сопротивления включены в цепь таким образом, что конец первого сопротивления соединен с началом второго, конец второго – с началом третьего и т. д. (см. рис.), то такое соединение называется последовательным. При последовательном соединении сопротивлений общее сопротивление цепи увеличивается, потому что увеличивается путь электронов. Общее сопротивление группы, составленной из ряда сопротивлений, соединенных последовательно, равно сумме всех этих сопротивлений. Иными словами, несколько сопротивлений, соединенных последовательно, равноценны одному

сопротивлению, величина которого равна сумме величин всех этих сопротивлений:

$$R = R_1 + R_2 + R_3.$$



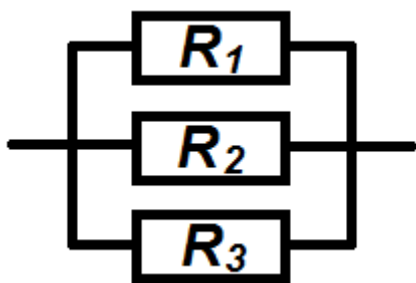
При последовательном соединении ток, протекающий по всем сопротивлениям имеет одно и то же значение

$$I = I_1 = I_2 = I_3,$$

а полное напряжение равняется сумме напряжений на каждом сопротивлении

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Другим видом соединения сопротивлений является соединение называемое параллельным (см. рис.). Параллельным соединением сопротивлений называется такое соединение, при котором начала всех сопротивлений соединены в одной общей точке, а их концы – в другой общей точке.



При таком способе соединения сопротивлений электроны, дойдя до общей точки, разделятся на отдельные потоки и будут двигаться дальше по всем сопротивлениям такой цепи. При этом по той из параллельных ветвей, где путь для электронов будет самым легким (ветвь с самым малым сопротивлением), пойдет наибольшее количество электронов, т. е. потечет наибольший ток, и, наоборот, по ветви с наибольшим сопротивлением потечет наименьший ток.

При параллельном соединении сопротивлений путь для электронов становится более свободным, что равноценно уменьшению сопротивления. Действительно, общее сопротивление группы, составленной из нескольких сопротивлений, соединенных параллельно, всегда меньше самого малого из сопротивлений группы; его можно найти по формуле

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

Общее сопротивление двух параллельно соединенных резисторов дается частной формулой

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Если вместо понятия сопротивления воспользоваться понятием проводимости, то общая проводимость между точками разветвления будет равна сумме проводимостей отдельных параллельных ветвей, т. е.

$$G = G_1 + G_2 + G_3.$$

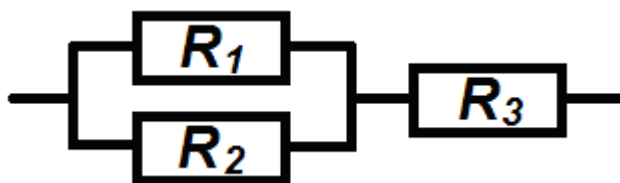
Полный ток, протекающий по группе параллельно соединенных резисторов, равен сумме токов протекающих по каждому резистору

$$I = I_1 + I_2 + I_3,$$

а полное напряжение равняется напряжению на каждом сопротивлении

$$U = U_1 = U_2 = U_3.$$

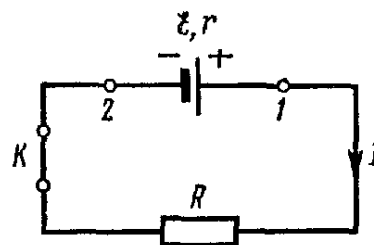
Соединение сопротивлений, показанное на рисунке, называется смешанным, так как здесь мы имеем и параллельное и последовательное соединения.



Подсчет общего сопротивления в этом случае производится в такой последовательности. Вначале вычисляют сопротивление параллельно подключенных резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , а затем полученное сопротивление складывают с сопротивлением  $R_3$ , соединенным последовательно с первыми двумя.

### Закон Ома для замкнутой цепи

Пусть замкнутая цепь состоит из источника электрической энергии с ЭДС  $E$  и проводника сопротивлением  $R$  (см. рис.). Ток, проходящий через резистор  $R$ , проходит также и через источник ЭДС. Следовательно, проходя по цепи, ток кроме сопротивления проводника встретит еще и то сопротивление, которое ему будет оказывать сам источник ЭДС (например, сопротивление электролита между пластинами гальванических элементов и сопротивление пограничных слоев электролита и пластин).



Следовательно, общее сопротивление замкнутой цепи будет складываться из сопротивления лампочки и сопротивления источника ЭДС.

Сопротивление нагрузки, присоединенной к источнику тока, принято называть внешним сопротивлением, а сопротивление самого источника тока –



внутренним сопротивлением. Внутреннее сопротивление обозначается буквой  $r$ .

Ток протекающий по цепи, изображенной на рисунке, подчиняется *закону Ома для замкнутой цепи*: сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС в цепи и обратно пропорциональна общему сопротивлению цепи, под которым подразумевается сумма внешнего и внутреннего сопротивлений:

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

Разность потенциалов на электродах источника равна напряжению на внешней части цепи:

$$U = IR = E - Ir.$$

Если с помощью ключа  $K$  цепь разомкнуть, то ток в ней прекратится и, как видно из последней формулы, разность потенциалов на клеммах источника будет равна его ЭДС.

#### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Дайте определение электрической цепи. Перечислите основные ее части.
2. Что называется электрическим током и каковы условия возникновения тока проводимости?
3. Что называют электродвижущей силой? В чем ее измеряют?
4. Что называют силой тока? В чем ее измеряют?
5. Сформулируйте закон Ома для однородного участка цепи.
6. Что называется электрическим сопротивлением и в каких единицах оно измеряется?
7. Как зависит сопротивление проводника от его длины, площади поперечного сечения и материала?
8. Что называется электрической проводимостью?
9. Как осуществляется последовательное соединение проводников?
10. Как осуществляется параллельное соединение проводников?
11. Из чего складывается полное сопротивление цепи?
12. В чем состоит закон Ома для полной цепи?