

## Тема 1.1. Электрические цепи постоянного тока

### Содержание занятия:

1. Элементы электрических цепей постоянного тока.
2. Законы Ома и Кирхгофа.

### 1. Элементы электрических цепей постоянного тока

#### Основы электричества

##### Содержание темы:

1. Строение вещества или из чего состоит материя
2. Электронное строение атома
3. Проводники и диэлектрики. Виды проводников
4. Электрический ток в проводнике
5. Сопротивление электрическому току

#### 1. Строение вещества или из чего состоит материя

В окружающей нас природе встречаются самые разнообразные вещества: вода, песок, дерево, сталь, камень и т. п. По-другому все вещества часто называют материей. Материя может находиться в одном из трех состояний это твердое, жидкое и газообразное состояние. Хотя имеется и четвертое состояние – плазма (ионизированный газ). Но мы не будем углубляться в теорию.

Но при изучении электротехники, как и многих других наук, возникает вопрос о **строении самого вещества**. Не зная строения вещества, нельзя глубоко уяснить основных явлений электротехники, радиотехники, ядерной физики и др. Исследования строения вещества были начаты тысячи лет назад и продолжаются до сих пор. Ученые все глубже проникают в «тайны» строения вещества, используя их на благо человечества.

В природе встречаются **простые и сложные** вещества.

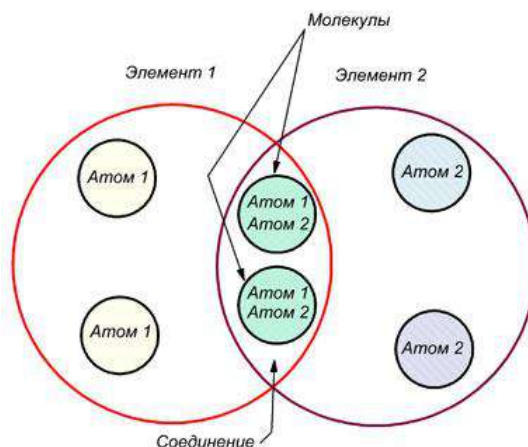


Рис. 1.1. Молекула сложного вещества.

Простые вещества, называемые химическими элементами, является кирпичиком в «постройке» материи. То есть элемент не делится на более простые субстанции химическим путем. На сегодняшний день известно 118 элементов, хотя в природе существует 94 (24 получены искусственным путем). Все эти элементы вы можете наблюдать в Периодической системе Д. И. Менделеева.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ:** *Простым веществом называется такое вещество, которое не может быть химически разложено.*

Сложное вещество или соединение — это комбинация более двух химических элементов, которая может быть разделена химическим способом. Примером здесь можно привести воду, которая состоит из кислорода и водорода.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ:** *Сложное вещество — это такое вещество, которое можно химическим путем разложить на составляющие его простые вещества.*

Когда простые вещества входят в состав сложного, то они теряют свои характерные химические свойства. Вода, например, резко отличается по своим свойствам от газов водорода и кислорода, из которых она состоит.

Все вещества, простые и сложные, состоят из атомов и молекул. Что же значат все эти определения?

**Молекула** — это наименьшая частица вещества, которую можно отделить от тела и которая обладает всеми свойствами, присущими данному телу.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ:** *Молекула – это комбинация двух и более атомов.*

Молекула простого вещества состоит из одинаковых атомов. Примерами простых веществ могут служить: медь, железо, кислород и т. д.

Молекула сложного вещества состоит из нескольких различных по своему строению атомов. Например, молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода.

Молекулы любого вещества находятся в постоянном хаотическом движении. В зависимости от степени связи между молекулами мы различаем твердые, жидкие и газообразные вещества.

Наиболее тесную связь имеют молекулы твердого вещества, а наименее тесную — молекулы газообразного вещества.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ:** *Атом – это наименьшая элементарная частица, сохраняющая свойства элемента, в который она входит.*

В атоме любого вещества количество электронов и протонов одинаковое, а значит, общий отрицательный заряд электронов равен положительному заряду ядра. Эти заряды уравниваются, и сам атом никаких электрических свойств не проявляет, или, как говорят, электрически нейтрален.

Если атом (или молекула) по какой-либо причине потеряет несколько электронов (при столкновении с другими атомами, при нагревании и т. д.), то он окажется положительно заряженным. Такой атом (или молекула) называется положительным ионом.

Наоборот, если у атома (или молекулы) окажется избыток электронов, то он станет отрицательно заряженным. Отрицательно заряженный атом (или молекула) называется отрицательным ионом.

Разноименно заряженные ионы притягиваются друг к другу и образуют электрически нейтральную частицу вещества.

## **2. Электронное строение атома**

Любое вещество состоит из очень маленьких частиц, называемых **атомами**. **Атом** — это наименьшая частица химического элемента, сохраняющая все его характерные свойства. Чтобы представить себе размеры атома, достаточно сказать что если бы их удалось уложить вплотную один к другому, то один миллион атомов занял бы расстояние всего в 0,1 мм.

Дальнейшее развитие науки о строении вещества показало, что атом также имеет сложное строение и состоит из электронов и протонов. Так возникла электронная теория строения вещества.

В глубокой древности было обнаружено, что существуют два рода электричества: положительное и отрицательное. Количество электричества, содержащееся в теле, стали называть зарядом. В зависимости от рода электричества, которым обладает тело, заряд может быть положительным или отрицательным.

Было также установлено опытным путем, что одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются.

Рассмотрим *электронное строение атома*. Атомы состоят из еще более мелких частиц, чем они сами, называемых **электронами**.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ:** *Электрон — это мельчайшая частица вещества, имеющая наименьший отрицательный электрический заряд.*

Электроны вращаются вокруг центрального ядра, состоящего из одного или более **протонов** и **нейтронов**, по концентрическим орбитам. Электроны являются отрицательно заряженными частицами, протоны — положительными, а нейтроны — нейтральными (рисунок 1.2).

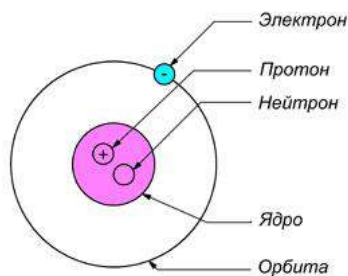


Рис. 1.2. Строение атома.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ:** *Протон — мельчайшая частица вещества, имеющая наименьший положительный электрический заряд.*

Существование электронов и протонов не вызывает никакого сомнения. Ученые не только определили массу, заряд и размеры электронов и протонов, но даже заставили их работать в различных электрических и радиотехнических приборах.

Было также установлено, что масса электрона зависит от скорости его движения и что электрон не только поступательно движется в пространстве, но и вращается вокруг своей оси.

Наиболее простым по своему строению является атом водорода (рис. 1.2). Он состоит из ядра-протона и вращающегося с огромной скоростью вокруг ядра электрона, образующего внешнюю оболочку (орбиту) атома. Более сложные атомы имеют несколько оболочек, по которым вращаются электроны.

Эти оболочки последовательно от ядра заполняются электронами (рисунок 1.3).



Рис. 1.3. Оболочки атома.

Теперь разберем *строение электронных оболочек атомов*. Самая внешняя оболочка называется **валентной**, а число электронов, содержащееся в ней, называется *валентностью*. Чем дальше находится от ядра *валентная оболочка*, следовательно, тем меньшую силу притяжения испытывает каждый валентный электрон со стороны ядра. Тем самым у атома увеличивается возможность присоединять к себе электроны в том случае, если валентная оболочка не заполнена и расположена далеко от ядра, либо терять их.

Электроны внешней оболочки могут получать энергию. Если электроны находящиеся в валентной оболочке получают необходимый уровень энергии от внешних сил, они могут оторваться от нее и покинуть атом, то есть стать свободными электронами. Свободные электроны способны произвольно перемещаться от одного атома к атому. Те материалы, в которых содержится большое число свободных электронов, называются **проводниками**.

**Изоляторы**, есть противоположность проводникам. Они препятствуют протеканию электрического тока. Изоляторы стабильны потому, что валентные электроны одних атомов заполняют валентные оболочки других атомов, присоединяясь к ним. Это препятствует образованию свободных электронов.

Промежуточное положение между изоляторами и проводниками занимают **полупроводники**, но о них мы поговорим позже

Рассмотрим **свойства атома**. Атом, который имеет одинаковое число электронов и протонов, электрически нейтрален. Атом, получающий один или более электронов, становится отрицательно заряженным и имеет название отрицательный ион. Если атом теряет один или более электронов, то он становится положительным ионом, то есть заряжается положительно.

### 3. Проводники и диэлектрики. Виды проводников

Наименьшим отрицательным зарядом обладает электрон.

*Для справки: заряд электрона равен  $e_0 = -1,6021766208 \cdot 10^{-19}$  Кулон*

Электрон (если он слабо связан с ядром атома) может покинуть атом, перейти в междуатомное пространство, попасть в пределы другого атома и т. д. Это явление наиболее характерно для металлов. В металлах всегда имеется огромное количество беспорядочно движущихся в междуатомном пространстве электронов, называемых свободными (рисунок 1).

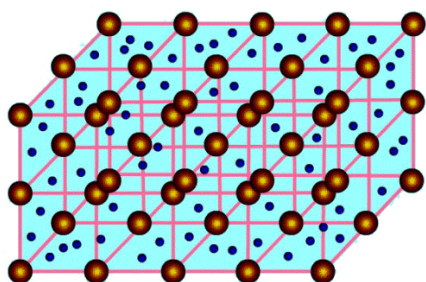


Рисунок 1.4. Хаотическое движение электронов в металле.

Если каким-либо способом упорядочить движение свободных электронов, то есть заставить их двигаться в одном определенном направлении, то мы и получим в металле электрический ток (рисунок 2).



Рисунок 1.5. Возникновение тока в проводнике.

**Определение:** *Тела, обладающие свободными электронами, называются проводниками первого рода.*

В проводниках первого рода прохождение электрического тока не вызывает химических изменений их вещества. К проводникам первого рода относятся металлы и их сплавы. Проводники первого рода нашли самое широкое применение в электротехнике и радиотехнике. Провода, шины, пластины конденсаторов, нити ламп накаливания и другие токопроводящие детали — все это делается из проводников первого рода.

**Определение:** *К проводникам второго рода относятся растворы кислот, щелочей и солей.*

Проводники второго рода часто называют электролитами. В электролите происходит непрерывный процесс образования отрицательно и положительно заряженных молекул (ионов). Электрический ток в электролите представляет собой упорядоченное движение этих ионов (а не электронов, как это было в проводниках первого рода).

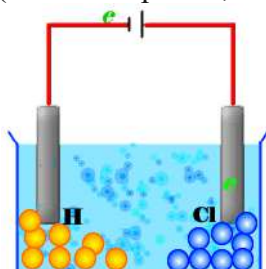


Рисунок 1.6. Ток в проводниках второго рода (электролитах).

Наконец, имеется большая группа веществ, которая не имеет ни свободных электронов, ни ионов. В таких веществах при обычных условиях электрический ток проходить не может, и называются они **диэлектриками** (фарфор, резина, слюда, стекло и т. п.).

**Определение:** *К диэлектрикам относятся вещества, не имеющие свободных электронов.*

Диэлектрики широко используются в современной электротехнике в качестве изоляторов (фарфоровые изоляторы на линиях электропередачи, резиновые покрытия проводов, слюдяные прокладки и т. д.).

#### 4. Электрический ток в проводнике

Если в точке **A** (рис. 1.3) — избыток электронов в сравнении с точкой **B**, то говорят, что между точками **A** и **B** существует **разность потенциалов**, или **напряжение**, а источник создающий этот избыток, характеризуется **потенциалом**. В свою очередь **потенциал** — это величина, которая показывает работу источника по перемещению заряда. Если соединить точки **A** и **B** каким-либо проводником, например простой проволокой, то избыточные электроны из точки **A** начнут перетекать в точку **B**, тем самым возникнет **электрический ток в проводнике**. То есть этот поток электронов и есть электрический ток. **Разность потенциалов** связана с напряжением или электродвижущей силой. То есть напряжение это и есть та самая сила, которая перемещает электроны в цепи.

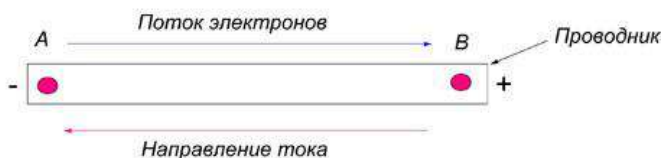


Рис. 1.7. Направление тока в проводнике.

Количественно ток можно выразить как сумму зарядов тех электронов, которые прошли через заданную точку. Но электрон имеет очень маленький заряд, поэтому для оценки заряда ввели единицу измерения – кулон (Кл). Один кулон равен сумме зарядов  $6,25 \cdot 10^{18}$  или 6250000000000000000 электронов.

*Под электрическим зарядом понимают физическую величину, которая характеризует способность тел (объектов) вступать в электрическое взаимодействие.* Электрический заряд обозначается через **q** (иногда для обозначения используют заглавную букву **Q**) и в Международной системе единиц (СИ) измеряется в Кулонах, [Кл]. Электрический заряд – дискретная величина, кратная элементарному электрическому заряду одного электрона (по модулю)  $e = 1,60217 \cdot 10^{-9}$  Кл.

$$q = N \cdot e,$$

где **N** – целое число.

С физической точки зрения **1 кулон** [Кл] соответствует электрическому заряду, проходящему через поперечное сечение проводника при силе тока 1 Ампер за 1 секунду, то это значит, что через эту точку в проводнике течет электрический ток в один **ампер** (А). Таким образом, сила тока, как вы уже догадались, измеряется в **амперах**.

Заряды существуют в двух видах: *положительные (+) и отрицательные (-). Одноименные заряды отталкиваются, а разноименные – притягиваются.*

Сила взаимодействия зарядов направлена вдоль прямой, соединяющей их, пропорциональна величине зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними (рисунок 1.8).

$$\vec{F} = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \vec{l}_r$$

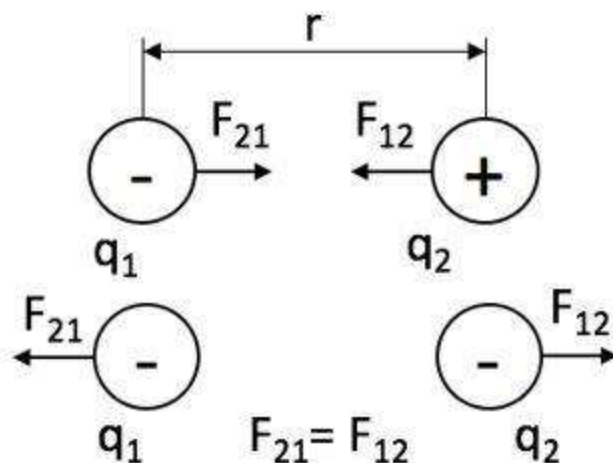


Рис. 1.8. Сила взаимодействия зарядов

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц;

$\vec{l}_r$  – единичный вектор, направленный вдоль прямой, соединяющей заряды  $q_1$  и  $q_2$ .

Силу взаимодействия двух зарядов  $\vec{F}$  принято называть **кулоновской силой** в честь ученого-физика Шарля Кулона, обнаружившего ее существование.

Если объект (система) не обменивается зарядами с окружающей средой, его называют электрически **изолированным**. В такой системе сумма электрических зарядов (положительных и отрицательных) **не меняется со временем**, то есть наблюдается **закон сохранения заряда**.

Большинство тел в природе электрически **нейтральны**, так как содержат заряды обоих типов в одинаковом количестве. Положительные и отрицательные заряды попарно нейтрализуют действие друг друга. Для перехода тела в заряженное состояние необходимо пространственно перераспределить в нем заряды, сконцентрировав одноименные заряды в одной области тела. Это возможно сделать, например, при помощи трения или взаимодействия с другим заряженным объектом (рисунок 1.9).



Рис. 1.9. Переход незаряженного объекта в заряженное состояние

Электрический заряд порождает в окружающем его пространстве непрерывную материю, называемую **электрическим полем**. Благодаря электрическому полю заряды имеют возможность взаимодействовать между собой. В электротехнике электрическое поле характеризуется двумя величинами: **напряженностью** (силовая характеристика) и **потенциалом** (энергетическая характеристика).

Точка А по причине избытка электронов имеет отрицательный потенциал, а точка В — положительный.

Поток электронов подобен потоку воды, текущему из бака А в бак В, как показано на рис. 1.10. Труба между баками является эквивалентом электрического проводника, а разность уровней воды — эквивалентом разности потенциалов между точками А и В.

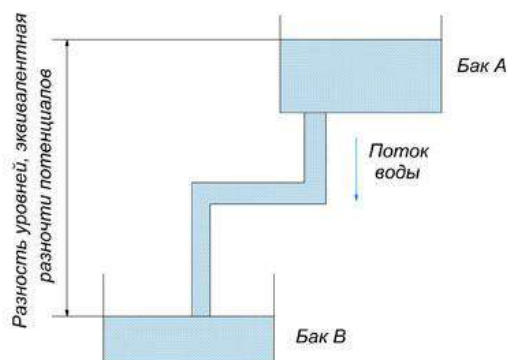


Рис. 1.10. Сравнение электрического тока с потоком воды

Хотя электроны перетекают от отрицательного полюса к положительному, принято говорить, что электрический ток в проводнике течет от положительного полюса к отрицательному. Эта договоренность восходит к тому времени, когда о природе электрического тока было ничего не известно.

Разность потенциалов, или напряжение, измеряется в **вольтах** и обозначается буквой **U**. Величина электрического тока, как уже было сказано, измеряется в **амперах** и обозначается буквой **I**.

### 5. Сопротивление электрическому току

Свободные электроны в проводнике, перемещаясь по цепи, сталкиваются с атомами, которые в свою очередь препятствуют потоку электронов, тем самым уменьшая значение электрического тока. Это препятствие называется **сопротивлением электрическому току**, и обозначается буквой **R**. Любой материал имеет свое *сопротивление электрическому току* или *электрическую проводимость* (величина обратная сопротивлению).

Сопротивление подобно тому, что мы в знакомой нам схеме потока воды движущегося из бака А в бак В, заменим участок трубопровода на более тонкий, что конечно уменьшит общий поток воды приходящий в бак В.



Рис.1.11. Сравнение сопротивления воды с электрическим сопротивлением.

Любой материал обладает сопротивлением, которое зависит от свойств самого материала: температуры, размера, формы и др.

Материалы, имеющие низкое сопротивление электрическому току называются *проводниками*. Мы с вами помним, что проводники имеют много свободных электронов, тем самым оказывают малое сопротивление току. Примером хороших проводников являются: золото, медь, серебро, алюминий, платина.

В свою очередь материалы, имеющие большое сопротивление току, называются *диэлектриками* или *изоляторами*. Диэлектрики имеют малое количество свободных электронов, чем и обусловлено их высокое сопротивление электрическому току. Здесь же примерами хороших изоляторов могут служить: пластмасса, резина, стекло, слюда.

Единица измерения сопротивления является **Ом**. Названа эта единица измерения в честь немецкого ученого-физика Георга Симона Ома.

Один **Ом** – это такое сопротивление материала, которое при приложенном напряжении в один вольт, позволяет протекать току равному один ампер. Обычно для обозначения символа Ом используют греческую букву *omega*.

Основа всей электротехники — постоянный ток. Усвоив основные понятия и законы постоянного тока, методы расчета электрических и магнитных цепей, несложно понять все остальное в области электротехники.

Ток, величина которого не меняется с течением времени, называется постоянным.

Для некоторых приемников постоянный ток является единственно возможным родом тока, а иногда его применение позволяет существенно улучшить технические и эксплуатационные свойства установок.

Электрическая энергия постоянного тока используется, например, для питания электролитических ванн, двигателей постоянного тока многих производственных механизмов и механизмов, различных устройств промышленной электроники, автоматики и т. д.

Электрическую энергию постоянного тока получают в настоящее время чаще всего из электрической энергии переменного тока с помощью полупроводниковых преобразовательных устройств - выпрямителей. Реже для этой цели используют генераторы, приводимые во вращение электрическими и неэлектрическими двигателями, аккумуляторы, гальванические элементы и термогенераторы.

Электрической цепью постоянного тока называют совокупность устройств и объектов: источников электрической энергии, преобразователей, потребителей, коммутационной, защитной и измерительной аппаратуры, соединительных проводов или линии электропередачи.

Электрические и электромагнитные процессы в этих объектах описываются с помощью понятий об электродвижущей силе (ЭДС  $-E$ ), токе ( $I$ ) и напряжении ( $U$ ).

Элементы цепи можно разделить на три группы:

1) элементы, предназначенные для генерирования электроэнергии (источники энергии, источники ЭДС);

2) элементы, преобразующие электроэнергию в другие виды энергии: механическую, тепловую, световую, химическую и т.д. (эти элементы называются приемниками электрической энергии или потребителями);

3) элементы, предназначенные для передачи электрической энергии от источника к приемникам (линии электропередачи, соединительные провода); элементы, обеспечивающие уровень и качество напряжения и т.д.

Источники питания цепи постоянного тока – это гальванические элементы, электрические аккумуляторы, электромеханические генераторы, термо- и фотоэлементы и др.

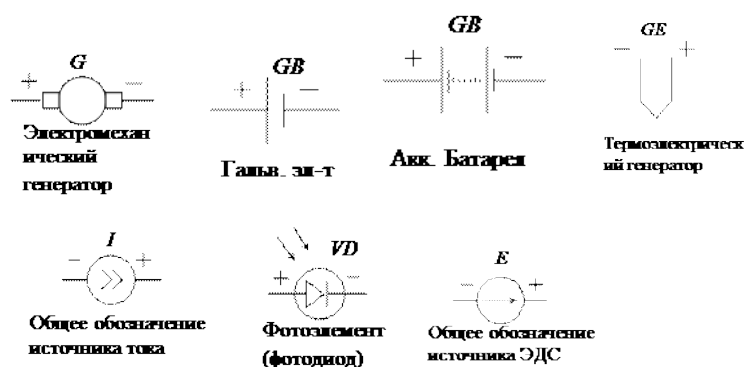


Рис. 1.12. Источники питания цепи постоянного тока.

Электрическими приемниками или потребителями постоянного тока являются электродвигатели, преобразующие электрическую энергию в механическую, нагревательные и осветительные приборы, электролизные установки и др. Все электроприемники характеризуются электрическими параметрами, среди которых основные – напряжение и мощность. Для нормальной работы электроприемника на его зажимах необходимо поддерживать номинальное напряжение. По ГОСТ 721-77 напряжение равно 27, 110, 220, 440 В, так же 6, 12, 24, 36 В.





Рис. 1.13. Приёмники питания цепи постоянного тока.

Коммутационная аппаратура служит для подключения потребителей к источникам, то есть для замыкания и размыкания источников электроцепи.

Защитная аппаратура предназначена для размыкания цепи в аварийных ситуациях.

Измерительная аппаратура предназначена для замера тока, напряжения и других электрических величин.

Линии электропередачи используются, когда источники и потребители удалены друг от друга на большие расстояния. Соединительные провода предназначены для соединения между собой зажимов или электродов элементов электрической цепи.

### Активные и пассивные элементы

Элемент называется пассивным, если он не может вызывать протекание тока, то есть если он не создает тока или ЭДС. Если собрать несколько пассивных элементов (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности) в электрическую цепь, то ток в цепи не потечет.

Элемент, который создает ЭДС и вызывает протекание тока, называется активным (источники электроэнергии).

### Элементы электрической цепи постоянного тока

Для обеспечения постоянного источника энергии в системе применяются конденсаторы. Они способны накапливать запасы электрических зарядов. Чем они больше, тем больший заряд может накопить этот элемент электрической цепи постоянного тока. Электрическую емкость измеряют в таких единицах, как фарада (Ф). На схеме этот элемент выглядит следующим образом.

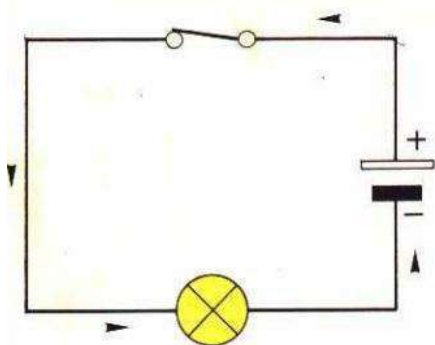


Рис. 1.14. Электрическая цепь постоянного тока.

Вместе с источниками и приемниками тока эти элементы образуют электрические цепи постоянного тока.

### Последовательное соединение в цепи

Большое количество электрических цепей состоят из нескольких приемников тока. Если эти элементы соединены друг с другом последовательно, то конец одного приемника присоединен к началу другого. Это последовательное соединение системы.

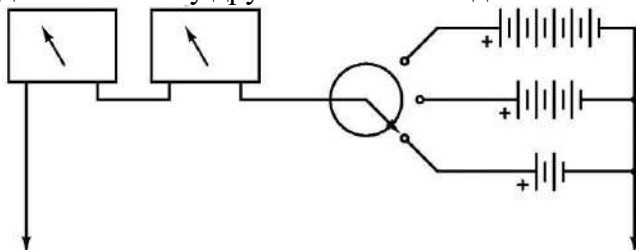


Рис. 1.15. Последовательное соединение цепи, состоящая из нескольких приёмников.

Сопротивление в этой электрической цепи приравнивается к сумме сопротивлений всех проводников системы. Они удлиняют пути прохождения тока, который будет одинаковым на отдельных участках системы.

Схема электрической цепи в классическом варианте содержит последовательно присоединенные проводники и нагляднее всего описывается таким прибором, как электрогирлянда.

Недостатком такой системы является тот факт, что в случае выхода из строя одного проводника, система не будет работать вся целиком.

### **Параллельное соединение цепи**

Схема электрической цепи параллельного типа соединения элементов является системой, в которой начало содержащихся в ней проводников соединяются в одной точке, а концы их — в другой. Электрический ток в такой электрической системе имеет несколько вариантов пути прохождения. Он распределяется обратнопропорционально сопротивлению приемников энергии.

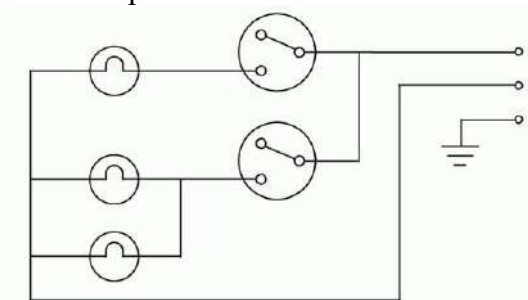


Рис. 1.16. Параллельное соединение цепи.

Если у потребителей величина сопротивления одинаковая, то через них будет проходить одинаковый ток. В случае когда у одного приемника энергии сопротивление меньше, через него может пройти больше тока, чем через другие элементы системы.

Электрическая цепь и электрический ток, протекающий по ней, характеризуют электромагнитные процессы при помощи напряжения и силы тока. Сумма отдельно взятых элементов системы будет равна току в точке их соединения.

Присоединяя к такой цепи новые элементы, сопротивление системы будет уменьшаться. Это связано с увеличением общего сечения проводников при соединении нового потребителя электроэнергии. Позитивной характеристикой такого способа соединения цепи является автономность каждого элемента.

При отключении одного потребителя совокупное сечение проводников уменьшается, а сопротивление электрической цепи становится большим.

### **Смешанное соединение в цепи**

Смешанный вариант соединения довольно распространен в сфере производства электротехники.

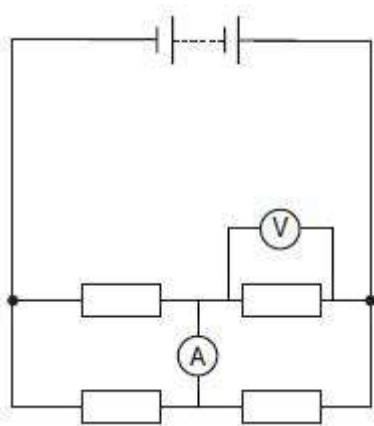


Рис. 1.17. Смешанное соединение цепи.

Эта цепь содержит в себе одновременно принцип последовательного и параллельного присоединения проводников.



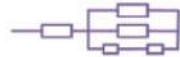
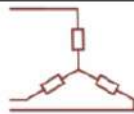
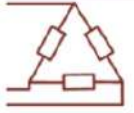

Чтобы определить сопротивление нескольких потребителей такой схемы, находят отдельно сопротивление всех параллельно и последовательно присоединенных проводников. Их приравнивают к единому проводнику, что в итоге упрощает всю схему.

### Способы соединения источников и потребителей электрической энергии

В электрических цепях существует множество способов соединения источников и приемников энергии. Каждый способ отличается своими преимуществами и недостатками, свойствами и областью применения, имеют свои формулы для преобразования или расчета. К простейшим способам относятся последовательное и параллельное соединение, которые применяются практически в любой области электротехники.

Ниже, в таблице 1 проиллюстрированы способы соединения и области их применения

Таблица 1 – Способы соединения в электрических цепях

Вид соединения	Название	Область применения
	Последовательное соединение	В любых цепях
	Параллельное соединение	В любых цепях
	Смешанное (последовательное и смешанное) соединение	В любых цепях
	Соединение «звезда»	Обычно в цепях трёхфазного тока
	Соединение «треугольник»	Обычно в цепях трёхфазного тока
	Соединение «мост»	Выпрямительные, измерительные цепи и цепи сигнализации

### Линейные и нелинейные цепи

Электрическая цепь называется *линейной*, если электрическое сопротивление или другие параметры участков, не зависят от значений и направлений токов и напряжений. Электрические процессы линейной цепи описываются линейными алгебраическими и дифференциальными уравнениями.

### Положительные направления тока, напряжения и ЭДС.

Чтобы правильно записать уравнения, описывающие процессы в электрических цепях, и произвести анализ этих процессов, необходимо задать условные положительные направления ЭДС источников питания, *тока* в элементах или ветвях цепи и *напряжения* на зажимах элементов цепи или между узлами цепи.

Внутри источника ЭДС постоянного тока положительным является направление ЭДС от отрицательного полюса к положительному полюсу. Это соответствует определению ЭДС как величины, характеризующей способность сторонних сил вызывать электрический ток.

По отношению к источнику ЭДС все элементы цепи составляют *внешний участок цепи*.

За положительное направление тока в цепи принимают направление, совпадающее с направлением ЭДС. Во внешней цепи положительным является направление от положительного полюса источника к отрицательному полюсу. В электронной теории – направление совпадает с направлением положительно заряженных частиц.

Условным положительным направлением падения напряжения (или просто напряжения) на элементах цепи или между двумя узлами цепи принимают направление, совпадающее с условно положительным направлением тока в этом элементе или в этой ветви. Положительное направление напряжения на зажимах источника ЭДС всегда противоположно положительному направлению ЭДС.

Действительные направления электрических величин, определяемые расчетом, могут совпадать или не совпадать с условными направлениями. При расчетах если определено, что ток, ЭДС и напряжения положительны, то их действительные направления совпадают с условно принятыми положительными направлениями, если отрицательны, то не совпадают.

Условное обозначение параметров в цепях постоянного тока.

$I$  – постоянный ток;

$U$  – постоянное напряжение;

$E$  – постоянная ЭДС.

Силой тока  $I$  называют количество электричества протекающего через поперечное сечение проводника за одну секунду:

$$I=Q/t, \text{ A}$$

Плотностью тока  $\delta$  называют отношение силы тока  $I$  к площади поперечного сечения проводника  $S$ :

$$\delta = I/S, \text{ A/мм}^2$$

Электродвижущая сила (Э.Д.С.)  $E$  источника численно равна работе совершаемой электрическим полем при перемещении положительного заряда вдоль всей цепи:

$$E= A/Q, \text{ B}$$

Электрическое сопротивление  $R$ - это величина противодействия, которое оказывает проводник при прохождении по нему электрического тока:

$$R_{20^{\circ}\text{C}} = \rho \cdot l/S, \text{ Ом}$$

Удельное сопротивление  $\rho$ - это сопротивление проводника длиной в один метр при площади поперечного сечения  $1\text{мм}^2$ . Единица удельного сопротивления:

$$[\rho]= \text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м} = \text{Ом м}$$

Зависимость электрического сопротивления (удельного сопротивления) от температуры:

$$R_2=R_1[1+ \alpha ( t_2 -t_1)]$$

$$\rho_2=\rho_1[1+ \alpha ( t_2 -t_1)],$$

где  $R_1(\rho_1)$  – электрическое сопротивление (удельное сопротивление) проводника при начальной температуре  $t_1$ .

$R_2(\rho_2)$  – электрическое сопротивление (удельное сопротивление) проводника при конечной температуре  $t_2$ .

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления, который показывает изменение сопротивления проводника при изменении температуры на  $1^{\circ}\text{C}$ :

$$[\alpha] = 1/^\circ\text{C}$$

Проводимость g – это величина обратная сопротивлению:

$$g = 1/R, \text{ Ом}^{-1} = \text{См (Сименс)}$$

Удельная проводимость  $\gamma$  – это величина обратная удельному сопротивлению:

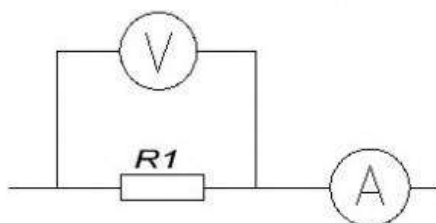
$$\gamma = 1/\rho, \text{ м/Ом}\cdot\text{мм}^2$$

## 2. Законы Ома и Кирхгофа

Чтобы рассчитать параметры сложных электрических схем важно знать, как ток и напряжение зависят друг от друга. Несмотря на разнообразие возможных ситуаций, эти величины можно вычислить, используя законы, названные именами Ома и Кирхгофа, но необходимо знать, как их правильно применять.

### Закон Ома для участка цепи

Он существует в двух формулировках. Для участка электрической цепи этот закон записывается следующим образом:



Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению данного участка.

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

Рис.2.1

где **I** - ток, протекающий на участке цепи;

**R** – сопротивление участка цепи;

**U** – напряжение на участке цепи.

### Закон Ома для всей цепи

Закон для полной цепи учитывает параметры источника тока. После того как заряды в виде электронов проходят всю цепь, они попадают на вторую клемму источника тока, которая имеет положительный потенциал относительно первой. Внутри аккумулятора под действием электродвижущей силы электроны перемещаются к отрицательной клемме аккумулятора, а затем вновь проходят через всю электрическую цепь.

Поэтому можно говорить о сопротивлении аккумулятора, отличающемся от того, которое имеется у цепи. С учётом сказанного формула полного закона Ома выглядит следующим образом:

Сила тока на всей цепи прямо пропорциональна Э.Д.С. и обратно пропорциональна сумме внешнего и внутреннего сопротивлений.

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

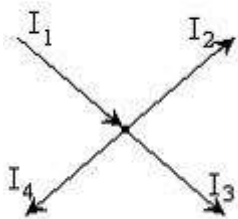
Закон Ома устанавливает связь между основными характеристиками электрических цепей, позволяя по одним из них вычислять другие.

### Закон Кирхгофа

Если используются разветвлённые электрические цепи, то возникает задача определить ток и напряжение на каждом участке. Несмотря на то, что эта задача на первый взгляд может показаться сложной, ее можно решить, используя законы Кирхгофа. Чтобы

воспользоваться ими, следует уточнить понятия узла, ветви и контура цепи. Применяя первый закон Кирхгофа, нужно помнить, что закон сохранения заряда должен соблюдаться в каждой точке схемы. В частности, это означает, что заряд не может вдруг возникнуть ниоткуда или исчезнуть.

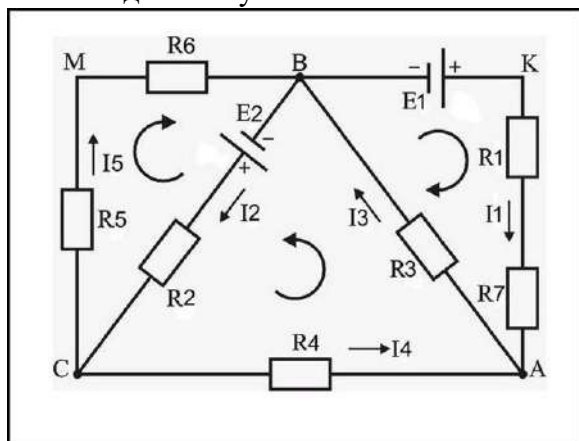
**Алгебраическая сумма токов в одном узле, равна нулю, или сумма входящих в узел токов равно сумме исходящих из него.**



$$\sum I = 0 \text{ или } I_1 = I_2 + I_3 + I_4$$

Рис. 2.2.

Физически первый закон Кирхгофа означает, что движение зарядов в цепи происходит так, что ни в одном из узлов они не скапливаются.



Рассматривая приведённую схему, можно увидеть, что на ней есть точки, в которых сходится несколько линий. Такие точки называют узлами. Участки от одного узла до другого — это ветви. Если рассматривать несколько ветвей, идущих подряд, и составляющих замкнутую фигуру, то речь идёт о контуре.

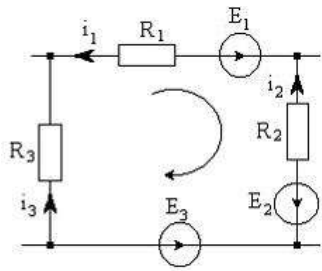
Важно отметить следующее: в одной ветви в каждой точке имеется одно и то же значение силы электрического тока. На показанной здесь схеме округлыми стрелками обозначены рассматриваемые контуры. Использование законов Кирхгофа позволяет написать несколько относительно простых соотношений, дающих возможность определить значение искомым электрических величин.

Во время расчётов также нужно помнить, как определяется знак каждого слагаемого. Если рассматривается направление к узлу, то речь идёт о положительной величине, если в противоположном направлении, то отрицательной. Как известно, ток направлен от плюса к минусу.

### **II закон Кирхгофа**

Теперь можно составить уравнения для всех токов в каждом узле схемы. Однако для определения нужных величин этого недостаточно. Чтобы получить необходимые уравнения, следует применить второй закон Кирхгофа, утверждающий, что сумма электродвижущих сил в каждом контуре имеет величину, равную сумме падений напряжений.

Второй закон Кирхгофа устанавливает связь между ЭДС, токами и сопротивлениями в любом замкнутом контуре, который можно выделить в рассматриваемой цепи.



**Алгебраическая сумма ЭДС**, действующих в любом контуре разветвленной электрической цепи, равна алгебраической сумме падений напряжений на всех сопротивлениях контура.

$$\sum E = \sum (U \cdot R)$$

Рассмотрим электрическую цепь, изображенную на рис.3. Обозначим стрелкой направление обхода контура.

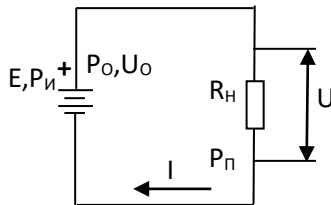
Рис. 2.3.

При составлении уравнений будем брать со знаком “плюс” те ЭДС и падения напряжений, направления которых совпадают с направлением обхода контура и со знаком “минус” те, которые направлены против обхода. Для цепи, изображенной на рис.3 второй закон Кирхгофа запишется в следующем виде:

$$E_1 + E_2 - E_3 = -R_1 \cdot I_2 - R_2 \cdot I_2 + R_3 \cdot I_3$$

В тех контурах, где не имеется источников тока, ЭДС будет равна нулю. Это означает, что сумма падений напряжений будет нулевой. При подсчёте надо выбрать направление обхода. При этом падение напряжений, соответствующее выбранному направлению, будет положительным.

### 1.3 Энергия и мощность электрической цепи



#### Энергия и мощность источника энергии

$$\text{Т.к. } E = A_{\text{и}} / Q \Rightarrow A_{\text{и}} = E \cdot Q, \quad (1)$$

где  $A_{\text{и}}$  - работа, производимая источником, Дж;

$E$  - ЭДС источника, В;

$Q$  - заряд, переносимый в цепи, Кл.

Рис. 2.4.

$$\text{Т.к. } I = Q / t \Rightarrow Q = I \cdot t$$

Подставим значение  $Q$  в формулу (1):

$$A_{\text{и}} = E \cdot I \cdot t, \text{ Дж}$$

Это соотношение количественно характеризует **работу**, совершаемую источником.

**Мощность источника  $P_{\text{и}}$**  — это работа, совершаемая источником в единицу времени, или величина, численно равная скорости, с которой происходит преобразование энергии (любого вида энергии в электрическую), т.е.

$$P_{\text{и}} = A_{\text{и}} / t = W_{\text{и}} / t = E \cdot I, \text{ Вт}$$

где  $W_{\text{и}}$  – количество электроэнергии, вырабатываемой источником за время  $t$ , Вт·ч.

#### Энергия и мощность потребителя энергии

$$\text{т.к. } U = A_{\text{п}} / Q \Rightarrow A_{\text{п}} = U \cdot Q = U \cdot I \cdot t,$$

$$\text{т.о., } A_{\text{п}} = W_{\text{п}} = U \cdot I \cdot t, \text{ Дж}$$

Это соотношение количественно характеризует **работу**, совершаемую потребителем

**Мощность потребителя  $P_{\text{п}}$**  — это работа, совершаемая потребителем в единицу времени, или величина, численно равная скорости, с которой происходит преобразование энергии (электрической энергии в любой другой вид), т.е.

$$P_{\text{п}} = A_{\text{п}} / t = W_{\text{п}} / t = U \cdot I, \text{ Вт}$$

где  $W_{\text{п}}$  – количество электроэнергии, потребляемой нагрузкой за время  $t$ , Вт·ч.

### 1.4 Баланс мощностей

**Мощность источника  $P_{\text{и}}$**  должна быть равна сумме мощностей, потребляемой приемником  $P_{\text{п}}$ , и мощности потерь внутри источника  $P_0$ :

$$P_{и} = P_{п} + P_0$$

$$E \cdot I = U \cdot I + U_0 \cdot I,$$

где  $P_0 = U_0 \cdot I = I^2 \cdot R_0$ ,  $P_{т}$  – мощность потерь внутри источника.  
Разделив обе части уравнения на  $I$ , получим:

$$E = U + U_0,$$

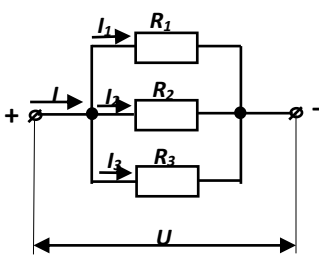
т.е. ЭДС генератора (источника)  $E$  равна сумме внутреннего падения напряжения в нем  $U_0$  и напряжения на его зажимах  $U$ .

### 1.5 Способы соединения сопротивлений

**Последовательное соединение сопротивлений** – это такое соединение, при котором между сопротивлениями не существует узловых точек и через все участки проходит один и тот же ток.

Схема	Формулы	Определения
	<ol style="list-style-type: none"> <li><math>I = I_1 = I_2 = I_3</math></li> <li><math>U = U_1 + U_2 + U_3</math></li> <li><math>R = R_1 + R_2 + R_3</math></li> <li><math>P = P_1 + P_2 + P_3</math></li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Сила тока на всех участках одинакова.</li> <li>- Напряжение на зажимах цепи равно сумме напряжений на её отдельных участках.</li> <li>- Полное сопротивление цепи равно сумме сопротивлений отдельных резисторов.</li> <li>- Полная мощность цепи равна сумме мощностей, выделенных на каждом резисторе.</li> </ul>

**Параллельное соединение сопротивлений** — это такое соединение, при котором все сопротивления присоединяются к одной паре узлов, т.е. находятся под действием одного и того же напряжения.

Схема	Формулы	Определения
	<ol style="list-style-type: none"> <li><math>I = I_1 + I_2 + I_3</math></li> <li><math>U = U_1 = U_2 = U_3</math></li> <li><math>g = g_1 + g_2 + g_3</math> или <math>1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3</math></li> <li><math>P = P_1 + P_2 + P_3</math></li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ток в неразветвленной части цепи равен сумме токов в её разветвленной части.</li> <li>- Напряжения на всех ветвях одинаковы.</li> <li>- Полная проводимость цепи равна сумме проводимостей отдельных ветвей.</li> <li>- Полная мощность цепи равна сумме мощностей, выделенных на каждом резисторе.</li> </ul>



**ЗАДАНИЕ.** Решить задачи и оформить в документе Word в соответствии с стандартами.

В данной теме рассмотрим решение задач на закон Ома для полной цепи.

**Задача 1.** К источнику с ЭДС 6 В подключают лампочку с сопротивлением 10 Ом. Когда к лампочке подключили вольтметр, оказалось, что напряжение на ней равно 5 В. Найдите внутреннее сопротивление источника.

**Задача 2.** ЭДС источника равна 12 В. Каково напряжение на полюсах источника, если внутреннее сопротивление источника равно половине внешнего сопротивления цепи?

**Задача 3.** К источнику ЭДС подключили электрический элемент, вольт-амперная характеристика которого задана уравнением  $I=3U^2$ , причём  $U>0$ . Если ЭДС источника равна 10 В, а внутреннее сопротивление составляет 1 Ом, каково напряжение на подключенном элементе?

**Задача 4.** Источник тока с ЭДС 25 В и внутренним сопротивлением 2,5 Ом замкнут на элементе с сопротивлением  $R$ . Постройте графики зависимости напряжения на элементе и силы тока в цепи от сопротивления  $R$ .

**Задача 5.** На схеме указана цепь с двумя источниками, внутреннее сопротивление каждого из которых равно 1 Ом. Сопротивления резисторов и ЭДС источников указаны на схеме. Найдите ток в каждом резисторе.

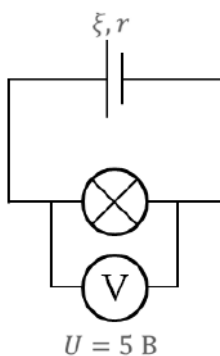






**Задача 1.** К источнику с ЭДС 6 В подключают лампочку с сопротивлением 10 Ом. Когда к лампочке подключили вольтметр, оказалось, что напряжение на ней равно 5 В. Найдите внутреннее сопротивление источника.

**РЕШЕНИЕ**



Запишем закон Ома для участка цепи

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

И закон Ома для полной цепи

$$I = \frac{\xi}{R + r}$$

Преобразуем эти два выражения, используя основное свойство пропорции.

$$\xi = IR + Ir;$$

$$U = IR$$

Теперь ясно видно, что разность между ЭДС и напряжением на лампочке равна произведению силы тока и внутреннего сопротивления источника

$$\xi - U = Ir;$$

$$\xi - U = \frac{U}{R}r \Rightarrow r = \frac{(\xi - U)R}{U}$$

$$r = \frac{(6 \text{ В} - 5 \text{ В}) \cdot 10 \text{ Ом}}{5 \text{ В}} = 2 \text{ Ом}$$

**ДАНО:**

$$\xi = 6 \text{ В}$$

$$R = 10 \text{ Ом}$$

$$U = 5 \text{ В}$$

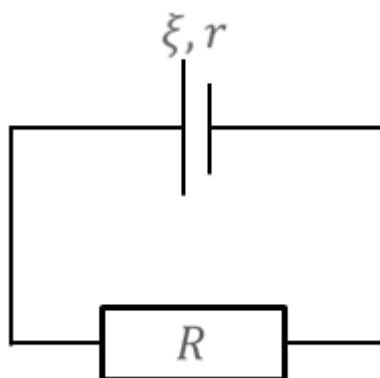
---

$$r = ?$$

**Ответ:** 2 Ом.

**Задача 2.** ЭДС источника равна 12 В. Каково напряжение на полюсах источника, если внутреннее сопротивление источника равно половине внешнего сопротивления цепи?

**РЕШЕНИЕ**



**ДАНО:**

$$\xi = 12 \text{ В}$$

$$R = 2r$$

Запишем закона Ома для полной цепи

$$I = \frac{\xi}{R + r}$$

Напряжение на полюсах источника равно разности между ЭДС и суммой падений напряжений в цепи

$$U = \xi - IR = Ir$$

$$U = \frac{\xi r}{R + r} = \frac{\xi r}{2r + r} = \frac{\xi}{3}$$

$$U = \frac{12 \text{ В}}{3} = 4 \text{ В}$$

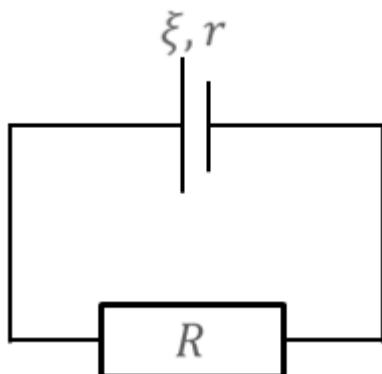
---

$$U = ?$$

**Ответ:** 4 В.

**Задача 3.** К источнику ЭДС подключили электрический элемент, вольт-амперная характеристика которого задана уравнением  $I=3U^2$ , причём  $U>0$ . Если ЭДС источника равна 10 В, а внутреннее сопротивление составляет 1 Ом, каково напряжение на подключенном элементе?

**РЕШЕНИЕ**



Запишем закона Ома для полной цепи

$$I = \frac{\xi}{R + r}$$

Запишем закон Ома для участка цепи

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

Преобразуем закон Ома для полной цепи

$$\xi = IR + Ir \Rightarrow \xi = U + Ir$$

Согласно условию задачи вольт-амперная характеристика имеет вид

$$I = 3U^2$$

Тогда получаем

$$\xi = U + 3U^2r$$

$$10 = U + 3U^2 \cdot 1$$

$$3U^2 + U - 10 = 0$$

Получили стандартное квадратное уравнение. Найдем дискриминант

$$D = 1 - 4 \cdot 3 \cdot (-10) = 121$$

Тогда корни квадратного уравнения равны

$$U_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{121}}{2 \cdot 3} = \frac{-1 \pm 11}{6}$$

$$U_1 = -2 \text{ В}; U_2 = \frac{5}{3} \text{ В}$$

По условию задачи  $U>0$ .

**ДАНО:**

$$I = 3U^2$$

$$U > 0$$

$$\xi = 10 \text{ В}$$

$$r = 1 \text{ Ом}$$

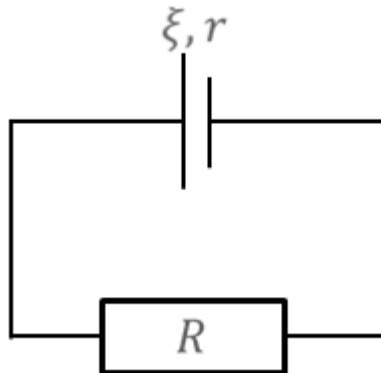
$$U = ?$$

$$\frac{5}{3} \text{ В.}$$

Ответ:

**Задача 4.** Источник тока с ЭДС 25 В и внутренним сопротивлением 2,5 Ом замкнут на элементе с сопротивлением  $R$ . Постройте графики зависимости напряжения на элементе и силы тока в цепи от сопротивления  $R$ .

### РЕШЕНИЕ



Запишем закона Ома для полной цепи

$$I = \frac{\xi}{R + r}$$

Подставив числовые данные, получим функцию зависимости и от  $R$

$$I(R) = \frac{25}{R + 2,5};$$

ДАНО:

$$\xi = 25 \text{ В}$$

$$r = 2,5 \text{ Ом}$$

Как видно из этой функции, сила тока в цепи обратно пропорциональна сопротивлению элемента (то есть, график будет гиперболический).

Для того чтобы построить график, необходимо рассмотреть крайние случаи. Например, когда элемент замыкается накоротко, сопротивление  $R = 0$ , и в цепи течёт ток короткого замыкания, равный

$$I_{\text{к}} = \frac{25}{2,5} = 10 \text{ А}$$

Это максимальное возможное значение силы тока для данной цепи.

Если же представить, что сопротивление

$$R \rightarrow \infty \Rightarrow I \rightarrow 0$$

Запишем закон Ома для участка цепи

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

Используя закон Ома для полной цепи, преобразуем полученное выражение



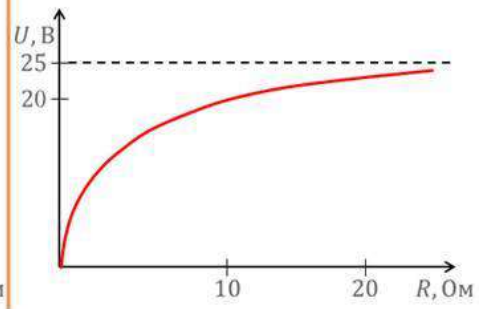
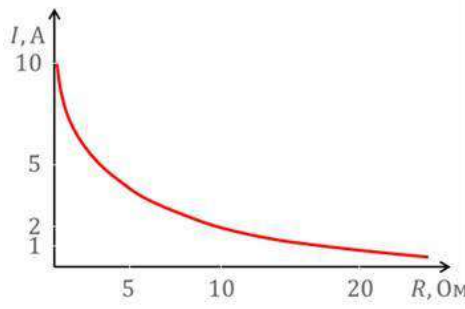
$$U(R) = IR \Rightarrow U(R) = \frac{\xi R}{R + r}$$

При нулевом сопротивлении напряжение на элементе будет равно нулю. А при бесконечно большом сопротивлении

$$U(0) = 0; R \rightarrow \infty \Rightarrow U \rightarrow \xi$$

Тогда графики зависимостей будут иметь вид

$$I(R) = \frac{25}{R + 2,5}; I_k = 10 \text{ A}; R \rightarrow \infty \Rightarrow I \rightarrow 0 \quad U(R) = \frac{25R}{R + 2,5}; U(0) = 0; R \rightarrow \infty \Rightarrow U \rightarrow \xi$$

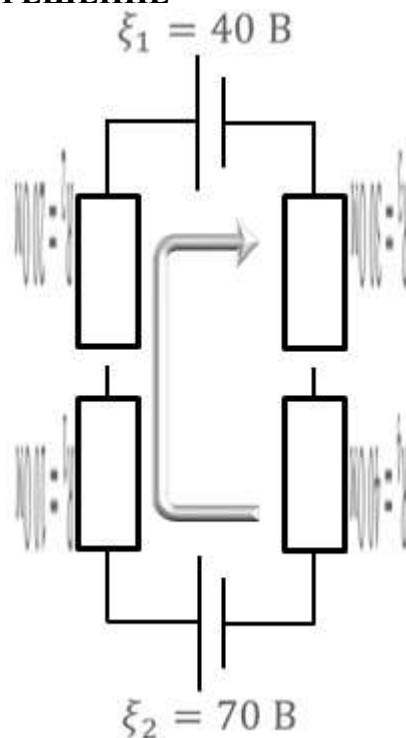


$$U(R) = ?$$

$$I(R) = ?$$

**Задача 5.** На схеме указана цепь с двумя источниками, внутреннее сопротивление каждого из которых равно 1 Ом. Сопротивления резисторов и ЭДС источников указаны на схеме. Найдите ток в каждом резисторе.

**РЕШЕНИЕ**



**ДАНО:**

$$r_1 = 1 \text{ Ом}$$

$$r_2 = 1 \text{ Ом}$$

Полная ЭДС цепи

$$\xi = \xi_1 + \dots + \xi_n$$

Для того чтобы определить, является ли ЭДС положительной или

отрицательной, необходимо обозначить направление обхода тока. Известно, что условно принято считать, что ток течёт от положительного полюса к отрицательному. Исходя из этого, направление тока от совпадает с направлением обхода, а направление тока от противоположно направлению обхода. Тогда

$$\xi = \xi_2 - \xi_1 = 70 \text{ В} - 40 \text{ В} = 30 \text{ В}$$

При последовательном соединении

$$R_{\text{общ}} = R_1 + \dots + R_n \Rightarrow R_{1,2} = 30 \text{ Ом}; R_{3,4} = 70 \text{ Ом}$$

При параллельном соединении

$$\frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_n} \Rightarrow R = \frac{R_{1,2}R_{3,4}}{R_{1,2} + R_{3,4}} = 21 \text{ Ом}$$

Запишем закон Ома для полной цепи

$$I = \frac{\xi}{R + r \cdot n}$$

$$I = \frac{\xi}{R + 2r} = \frac{30 \text{ В}}{21 \text{ Ом} + 2 \cdot 1 \text{ Ом}} = \frac{30}{23} \text{ А}$$

При параллельном соединении

$$U = U_1 = \dots = U_n$$

$$I = I_1 + \dots + I_n$$

Запишем закон Ома для участка цепи

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

Тогда

$$I_1 R_{1,2} = I_3 R_{3,4} \Rightarrow \frac{I_1}{I_3} = \frac{R_{3,4}}{R_{1,2}} = \frac{70 \text{ Ом}}{30 \text{ Ом}} = \frac{7}{3}$$

$$I = I_1 + I_3 \Rightarrow I_1 + I_3 = \frac{30}{23} \text{ А}$$

$$\frac{I_1}{I_3} = \frac{7}{3} \Rightarrow I_1 = \frac{7}{3} I_3$$

$$I_1 + I_3 = \frac{30}{23}$$

$$\frac{7}{3} I_3 + I_3 = \frac{30}{23}$$

$$I_3 = \frac{30}{23} \div \frac{10}{3} = \frac{30}{23} \cdot \frac{3}{10} = \frac{9}{23} \text{ A}$$

$$I_1 = \frac{30}{23} - I_3$$

$$I_1 = \frac{30}{23} - \frac{9}{23} = \frac{21}{23} \text{ A}$$

$$I_1, I_2 = ?$$

$$I_3, I_4 = ?$$

**Ответ:**  $I_1 = I_2 = \frac{21}{23} \text{ A}; I_3 = I_4 = \frac{9}{23} \text{ A}.$

Используемые источники:

1. [Лекция "Цепи постоянного тока" \(infourok.ru\)](http://infourok.ru)
2. [Электрические цепи постоянного тока. Электрические цепи и ее элементы \(helpiks.org\)](http://helpiks.org)
3. [II Лекции Цепи постоянного тока \(1\).pdf - Яндекс. Документы \(yandex.ru\)](http://yandex.ru)
4. <https://lemzspb.ru/elementy-elektricheskikh-tsepey-postoyannogo-toka-kratko/>
5. [4D6963726F736F667420576F7264202D20DDEBE5EAF2F0EEF2E5F5EDE8EAE020F7E0F1F2FC31 \(t.me\)](https://t.me/4D6963726F736F667420576F7264202D20DDEBE5EAF2F0EEF2E5F5EDE8EAE020F7E0F1F2FC31)
6. [Элементы электрических цепей постоянного тока кратко \(lemzspb.ru\)](http://lemzspb.ru)