

# Ток

Последняя "электрическая" История - про Ток.  
Поговорим о постоянном и переменном токах. Эта тема скорее прикладная - инженерская, электротехническая. Никаких новых физических явлений в ней нет. А есть, в основном, способы расчёта электрических цепей.

В розетках электричества -  
Громадные количества.  
Бежит оно по сёлам,  
Бежит по городам.  
При этом умудряется,  
Представьте - умудряется,  
Как в цирке, умудряется -  
Бежать по проводам!

А. Ерошин

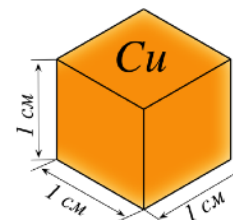
По определению: **ток** - это упорядоченное движение свободных носителей электрического заряда. За направление электрического тока принято направление движения **положительных** свободных зарядов. Для существования электрического тока в проводнике необходимо создать в нем электрическое поле.

Рассмотрим процесс протекания тока в металлах, полупроводниках и электролитах (растворах).

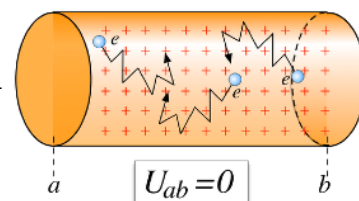
## ➔ Ток в проводниках (металлах)

Металлы характеризуются наличием большого количества свободных электронов<sup>1</sup>. Вот эти свободные электроны и обеспечивают протекание тока в металлах.

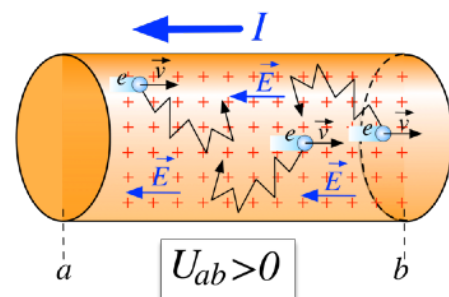
Лучшим проводником электрического тока считается серебро. Медь - на втором месте. Мы используем медные провода потому, что медь много дешевле серебра. В Истории про Электростатику мы посчитали, что в 1 сантиметровом кубике меди  $\approx 8 \times 10^{23}$  свободных электронов с общим зарядом  $\approx -1,3 \times 10^5$  Кл.



В отсутствие электрического поля в металлическом проводнике свободные электроны находятся в состоянии хаотического теплового движения. Молекулярно-кинетическая теория оценивает скорость хаотического теплового движения одного электрона в  $10^5$  м/с (100 км/с).



Но вот мы создали в проводнике электрическое поле  $\vec{E}$  (подали напряжение на его концы). Это поле действует на свободные электроны кулоновской силой и приводит их в состояние упорядоченного движения - в проводнике потек ток. Как поведут себя электроны при этом? С одной стороны, они продолжают своё хаотическое тепловое движение, а с другой стороны, начнут двигаться вдоль силовых линий электрического поля (по законам Электростатики). Причём скорость этого движения (скорость дрейфа)  $\vec{v}$  оказывается много меньше скорости теплового движения и оценивается в диапазоне  $1 - 8$  мм/с.



Малая скорость дрейфа на противоречит опытному факту, что ток во всей цепи устанавливается практически мгновенно. Замыкание цепи вызывает распространение электрического поля со скоростью света  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Через время порядка  $l/c$  ( $l$  - длина цепи) вдоль цепи устанавливается стационарное распределение электрического поля и в ней начинается упорядоченное движение электронов со скоростью дрейфа.

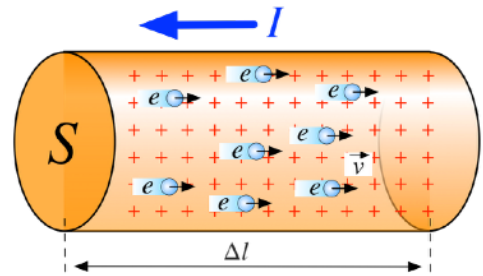
<sup>1</sup> Об этом мы подробно говорили в Истории про Электростатику.



Количественной мерой электрического тока служит **сила тока  $I$**  - скалярная физическая величина, равная отношению заряда  $\Delta q$ , переносимого через поперечное сечение проводника за интервал времени  $\Delta t$ , к этому интервалу:  

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$
 (а в пределе - производная заряда по времени -  $I = \frac{dq}{dt}$  - скорость изменения протекающего через сечение заряда).

Давайте посчитаем ток в проводнике.  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ . Заряд, протекший через сечение  $S$  за время  $\Delta t$ , равен  $\Delta q = e \cdot S \cdot \Delta l \cdot n$ , где  $e$  - заряд электрона,  $n$  - концентрация свободных электронов в проводнике. Тогда  $I = \frac{e \cdot S \cdot \Delta l \cdot n}{\Delta t}$ , но  $\frac{\Delta l}{\Delta t} = v$ , где  $v$  - скорость дрейфа электронов. Откуда  $I = e \cdot S \cdot v \cdot n$ .

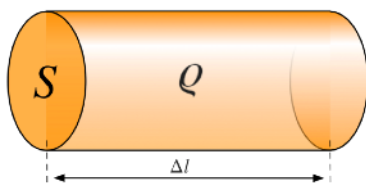


Любой проводник, по которому протекает электрический ток, оказывает ему определенное сопротивление. Свойство материала проводника препятствовать прохождению через него электрического тока называется **электрическим сопротивлением**.

Классическая электронная теория тока так объясняет сущность электрического сопротивления металлических проводников. Свободные электроны при движении по проводнику огромное количество раз взаимодействуют на своем пути с атомами кристаллической решетки и другими электронами и неизбежно теряют часть своей энергии. Электроны испытывают как бы сопротивление своему движению. Сопротивление различных металлов определяется их различным атомным строением. Чем больше сопротивление проводника, тем хуже он проводит электрический ток, и наоборот.

Сопротивление проводника зависит от материала, из которого он сделан, и от своей геометрии (размеров). Сопротивление проводника обозначается  $R$  или  $r^2$  и измеряется в  $\text{Омах}^3$ .

**Удельное электрическое сопротивление** (обозначается греческой буквой  $\rho$  и измеряется в  $\text{Ом}\cdot\text{м}$ ) проводника характеризует электрическое сопротивление именно материала (металла).



Сопротивление круглого цилиндрического проводника (куска провода) можно посчитать по

формуле:  $R = \rho \cdot \frac{\Delta l}{S}$ , где  $\rho$  -

удельное сопротивление материала проводника,  $S$  - площадь его поперечного сечения,  $\Delta l$  - длина проводника.

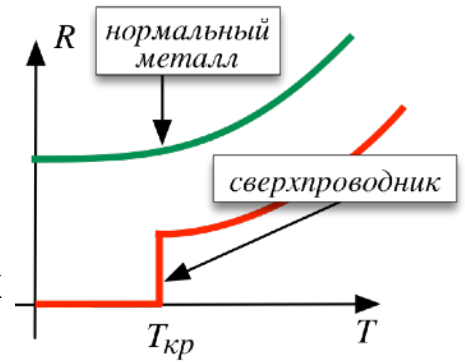
Металл	$\rho \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$
Серебро	1,5
Медь	1,7
Золото	2,4
Алюминий	2,8
Железо	10
Свинец	20

Пользуются также обратными понятиями: электрическая **проводимость**  $G = \frac{1}{R}$  [ $\text{Ом}^{-1}$ ] и **удельная проводимость**  $\sigma = \frac{1}{\rho}$  [ $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ ].

<sup>2</sup> От французско-английского слова "Resistance" - сопротивление.

<sup>3</sup> А также в понятных нам килоомах (1000 Ом) и мегаомах (1 000 000 Ом).

Электрическое сопротивление металлов растёт при увеличении температуры. Но классическая электронная теория тока уже не объясняет количественно этот рост. Объяснения даёт квантовая механика.



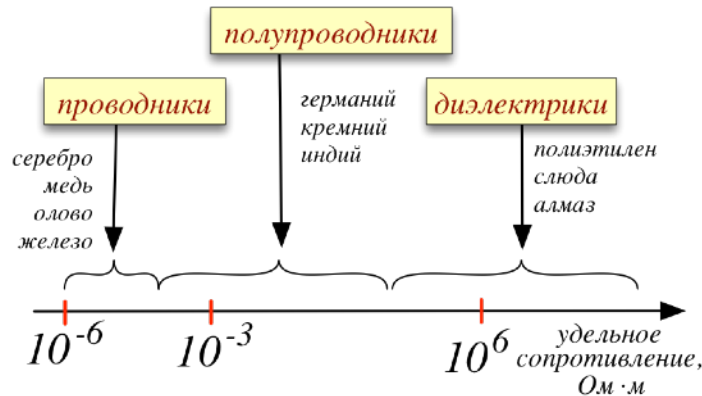
Ещё более удивительным открытием стала

**сверхпроводимость**. В 1911 году голландский физик Камерлинг-Оннес обнаружил, что при температуре около 3К (-269 С°) электрическое сопротивление ртути практически равно нулю. Чуть позже такие же свойства были обнаружены у свинца и олова. Общий вывод был таков: некоторые вещества (назовём их **сверхпроводниками**) при уменьшении их температуры ниже критической  $T_{кр}$  (для каждого сверхпроводника она своя) переходят в состояние сверхпроводимости - их электрическое сопротивление падает до нуля. Но медь и серебро сверхпроводниками не являются - их электрическое сопротивление уменьшается и не обращается в ноль по мере уменьшения температуры. Сверхпроводимость - явление квантовое и объясняется квантовой теорией.

Иметь проводники без электрического сопротивления (а значит - без энергетических потерь) - очень заманчивая перспектива. Единственно, что сдерживает - это очень низкая  $T_{кр}$ , на поддержание которой тратится большая энергия. Давно уже идёт гонка за получение **высокотемпературного сверхпроводника**. В настоящее время достигнутый рекорд составляет 260К (-13 С°). Правда принадлежит он соединению лантана, сжатого давлением в два миллиона атмосфер, что тоже не очень удобно.



Все твердые вещества в смысле их способности проводить электрический ток можно разделить на три группы: **проводники, полупроводники и диэлектрики**. Это деление обусловлено строением их атомов.



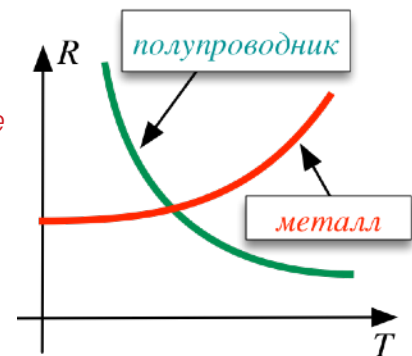
Про ток в проводниках (металлах) мы уже поговорили. Диэлектрики ток практически не проводят - они выступают в роли хороших **изоляторов** тока. Поговорим о полупроводниках.

## ➔ Ток в полупроводниках

Вся современная электроника, включая ваши мобильные телефоны и ноутбуки, основана на полупроводниках. Разберёмся, что это за зверь такой.

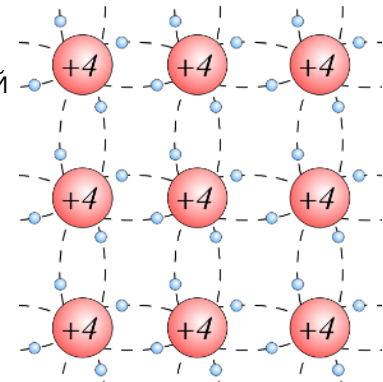
Кремний, германий, теллур - многие элементы периодической таблицы и их соединения относятся к полупроводникам. Очень многие неорганические вещества являются полупроводниками. Шире других в природе распространён кремний, земная кора состоит из него на 30%.

Главное отличие полупроводников от металлов заключается в следующем: *чем выше температура полупроводника, тем лучше он проводит ток - тем ниже его электрическое сопротивление.* У металлов наоборот: чем выше температура, тем выше сопротивление. Если полупроводник охладить до абсолютного нуля, то он станет диэлектриком.



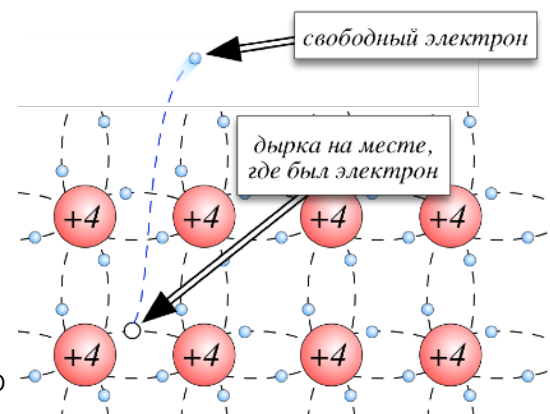
Такая зависимость проводимости полупроводников от температуры говорит о том, что концентрация свободных носителей заряда у полупроводников не постоянна, и увеличивается вместе с температурой. Механизм прохождения электрического тока через полупроводник нельзя свести к модели свободных электронов (как в металлах). Чтобы понять этот механизм, можно рассмотреть его на примере кристалла германия.

В обычном состоянии атомы германия содержат на своей внешней оболочке четыре валентных электрона - четыре электрона, которые слабо связаны с ядром. При этом каждый атом в кристаллической решетке германия окружен четырьмя соседними атомами. И связь здесь ковалентная - она образуется парами валентных электронов.



Получается, что каждый из валентных электронов принадлежит одновременно двум атомам и связи валентных электронов внутри германия с его атомами сильнее нежели в металлах. Большого количества свободных электронов не возникает. Вот почему при комнатной температуре полупроводники на несколько порядков хуже проводят ток по сравнению с металлами. А при абсолютном нуле (или близко к нему) все валентные электроны заняты в связях и свободных электронов для обеспечения тока не остается.

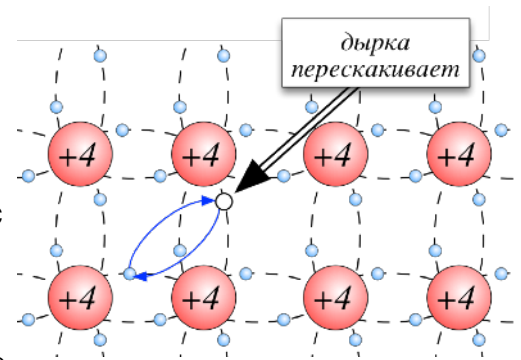
С ростом температуры часть валентных электронов приобретает энергию, которой становится достаточно для нарушения ковалентных связей. Так возникают свободные электроны проводимости. В областях разрыва связей образуются своеобразные вакантные места - дырки, свободные от электронов.



Эту дырку может легко занять валентный электрон из соседней пары, тогда дырка как бы сместится на место у соседнего атома. При определенной температуре в кристалле образуется некоторое количество так называемых электронно-дырочных пар.

*Про дырку.* По определению дырка - незаполненная валентная связь, которая проявляет себя как положительный заряд, численно равный заряду электрона. Дырка - это квазичастица (воображаемая частица). Дырка - это отсутствие электрона. В некотором смысле поведение дырки в полупроводнике похоже на

поведение пузырька воздуха в полной бутылке с водой. Понятие дырки в физике твёрдого тела помогает понять природу прохождения тока в полупроводнике.



Одновременно идет процесс *рекомбинации* электронов с дырками - дырка, встречаясь со свободным электроном, восстанавливает ковалентную связь между атомами в кристалле германия. Такие пары, состоящие из электрона и дырки, могут возникать в полупроводнике не только от температурного действия, но и при освещении полупроводника, то есть за счет энергии падающего на него электромагнитного излучения.

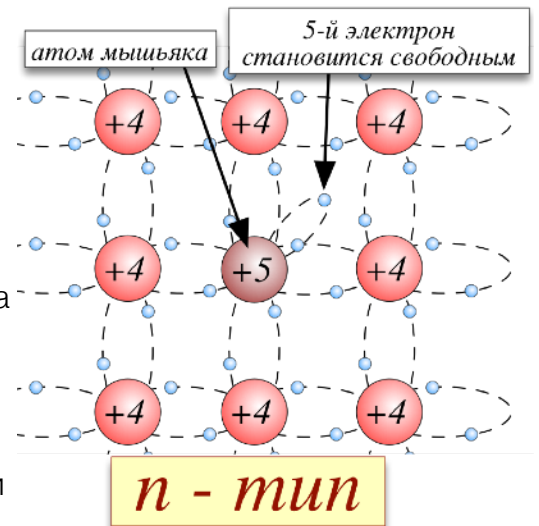
Если внешнее электрическое поле к полупроводнику не приложено, то свободные электроны и дырки участвуют в хаотичном тепловом движении. Но когда полупроводник помещается во внешнее электрическое поле, электроны и дырки начинают двигаться упорядоченно. Так рождается ток в полупроводнике. Он состоит из электронного тока и дырочного тока. В чистом полупроводнике концентрация дырок и электронов проводимости равны. Только в чистых полупроводниках проявляется электронно-дырочный механизм проводимости. Это **собственная электрическая проводимость полупроводника**.

*Чистые полупроводники сами по себе не особенно интересны.*

Самое интересное начинается тогда, когда к чистому полупроводнику добавляются примеси (добавки). Добавление 0,001% примеси мышьяка в кристалл германия увеличит его проводимость более чем в 100 000 раз!

Главное условие роста проводимости от примесей - отличие валентности примеси от валентности основного элемента. Такая проводимость с примесями называется **примесной проводимостью**, и может быть электронной (*n-типа*) и дырочной (*p-типа*)<sup>4</sup>.

Кристалл германия начинает обладать электронной проводимостью, если в него введены пятивалентные атомы, допустим, мышьяка, тогда как валентность атомов самого германия - четыре. Когда пятивалентный атом мышьяка оказывается в узле кристаллической решетки германия, четыре внешних электрона атома мышьяка включаются в ковалентные связи с четырьмя соседними атомами германия. Пятый же электрон атома мышьяка становится свободным, он легко покидает свой атом.

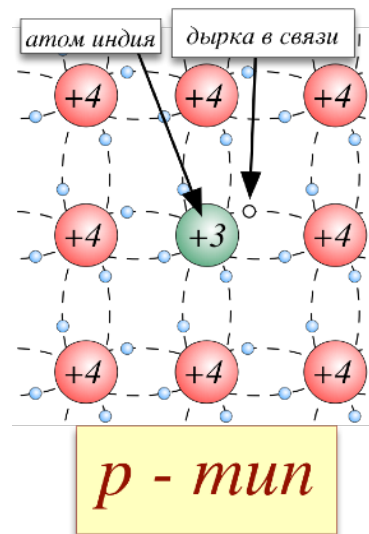


А покинутый электроном атом становится положительным ионом в узле кристаллической решетки полупроводника. Это так называемая **донорная примесь**, когда валентность примеси больше валентности основных атомов. Здесь появляется много свободных электронов, вот почему с введением примеси в тысячи и в миллионы раз падает электрическое сопротивление полупроводника. Полупроводник с большим количеством добавленных примесей по удельной проводимости приближается к металлам.

<sup>4</sup> "n" - negative - электронная, "p" - positive - дырочная.

Хотя за собственную проводимость в кристалле германия с примесью мышьяка отвечают электроны и дырки, основными носителями свободного заряда являются все же электроны, покинувшие атомы мышьяка. В такой ситуации концентрация свободных электронов сильно превосходит концентрацию дырок, и данный вид проводимости называется **электронной проводимостью** полупроводника, а сам полупроводник - полупроводником ***n-типа***.

Если же вместо пятивалентного мышьяка в кристалл германия добавить трехвалентный индий, то он создаст ковалентные связи лишь с тремя атомами германия. Четвертый атом германия останется без связи с атомом индия. Но ковалентный электрон может быть захвачен из соседних атомов германия. Индий будет тогда отрицательным ионом, а соседний атом германия приобретет вакантное место на месте где существовала ковалентная связь.



Примесь такого рода, когда атом примеси захватывает электроны, называется **акцепторной примесью**. При введении акцепторной примеси, в кристалле нарушаются многочисленные ковалентные связи, и образуется много дырок, в которые электроны могут перепрыгивать с ковалентных связей. В отсутствие электрического тока дырки хаотически движутся по кристаллу.

Акцепторная примесь приводит к резкому росту проводимости полупроводника благодаря рождению обилия дырок, и концентрация этих дырок сильно превышает концентрацию электронов собственной электропроводности полупроводника. Это **дырочная проводимость**, а полупроводник называется полупроводником ***p-типа***. Основными носителями заряда в нем выступают дырки.

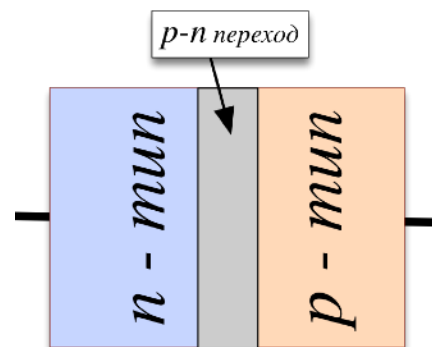


Вдумчивый ученик как всегда готов задать вопрос: "Это всё здорово и почти понятно. Но зачем с помощью примесей пытаться превращать полупроводник в проводник? Вам что, меди не хватает?"

Верно, превратить полупроводник в проводник - не цель. Всё, о чём мы говорили выше - это была подготовка к главному. А главное - это ***p-n переход***.

***p-n переход*** - это область соприкосновения двух полупроводников с разными типами проводимости: электронной (*n-типа*) и дырочной (*p-типа*).

Именно электрические процессы в *p-n-переходах* являются основой работы полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов) и электроники в целом. О них - чуть позже, когда мы будем говорить о полупроводниковых приборах.



## ➔ Ток в электролитах

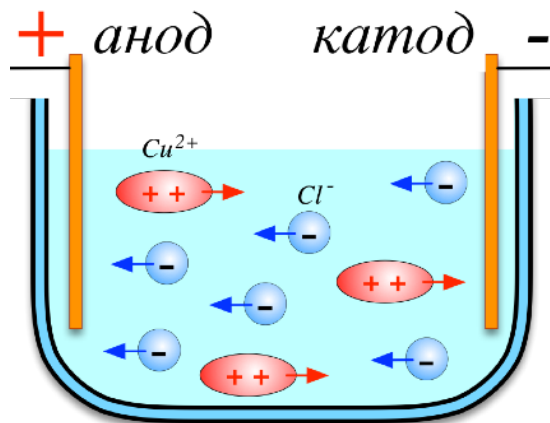
Ой, незнакомое слово "электролит"! Да знакомое оно! Вот слово "драдедамовый" - точно незнакомое<sup>5</sup>.

Электролит - вещество, которое проводит электрический ток *вследствие подвижности своих положительно или отрицательно заряженных ионов*. Процесс распада молекул в растворе или расплаве электролита на ионы называется *электролитической диссоциацией* (это вы проходили в школьной химии). Растворы кислот, солей и оснований - примеры электролитов.

Электрический ток в электролитах представляет собой перемещение ионов обоих знаков в противоположных направлениях. Положительные ионы движутся к отрицательному электроду (катоде), отрицательные ионы - к положительному электроду (аноду).

Вот пример с электролитом - раствором хлорида меди. Хлорид меди  $CuCl_2$  в воде диссоциирует по известной вам формуле:  $CuCl_2 \rightleftharpoons Cu^{2+} + 2Cl^-$  - одна молекула даёт один положительный ион меди  $Cu^{2+}$  (анион) и два отрицательных иона хлора  $Cl^-$  (катионы).

При подключении электродов к источнику тока ионы под действием электрического поля начинают упорядоченное движение: положительные ионы меди движутся к катоду, а отрицательно заряженные ионы хлора - к аноду.



Достигнув катода, ионы меди нейтрализуются избыточными электронами катода и превращаются в нейтральные атомы, оседающие на катоде. Ионы хлора, достигнув анода, отдают по одному электрону. После этого нейтральные атомы хлора соединяются попарно и образуют молекулы хлора  $Cl_2$ . Хлор выделяется на аноде в виде пузырьков. Процесс этот называется *электролизом*. Электролиз широко применяется в промышленном производстве.

На этом примере мы видим, что *прохождение тока через электролит сопровождается переносом вещества*.



**Майкл Фарадей** экспериментально установил закон электролиза:

масса  $m$  вещества, выделившегося на электроде при прохождении тока  $I$ , прямо пропорциональна заряду  $Q$ , прошедшему через электролит:

$$m = k \cdot Q = k \cdot I \cdot t.$$

$k$  - электрохимический эквивалент данного вещества.

Закон Фарадея для электролиза имеет и другой вид:  $m = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n} \cdot I \cdot t$ , где  $n$  - валентность вещества,  $I$  - ток,  $t$  - время,  $F = e \cdot N_A = 96485 \text{ Кл/моль}$  - постоянная Фарадея.

=====

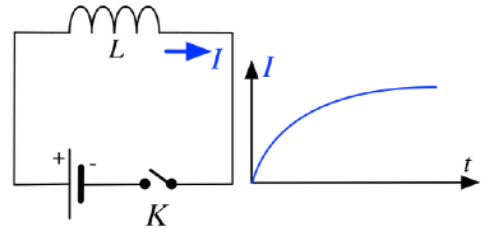
<sup>5</sup> "драдедамовый" - суконный.

## → Постоянный Ток

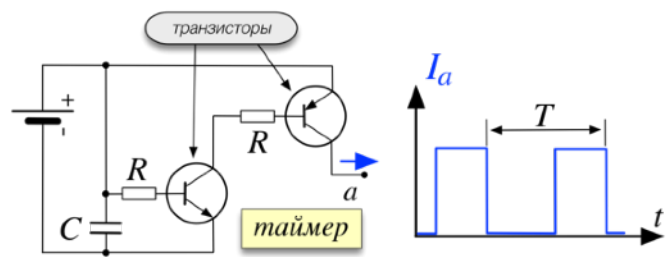
Что такое постоянный ток? Казалось бы само собой напрашивается определение: постоянный ток - электрический ток, не изменяющийся по времени и по направлению. Это - чисто математическое определение постоянной величины. Но в электротехнике всё чуть-чуть иначе.

■ Электротехническое определение постоянного тока: *ПОСТОЯННЫЙ ТОК - электрический ток, не изменяющийся по направлению.*

Поясню. В Истории про Магнетизм мы рассматривали электрическую схему с индуктивностью. В такой схеме после замыкания ключа ток  $I$  из-за явления самоиндукции нарастает постепенно (его величина во времени меняется).



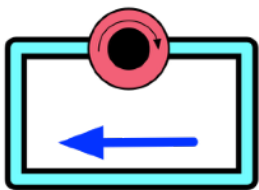
А вот вам схема простейшего таймера на двух транзисторах (о транзисторах мы будем говорить позже). В результате работы этой схемы (в результате заряда-разряда конденсатора и отпираний-запираний транзисторов) на выходе в точке  $a$  мы получаем строго периодические всплески тока (в этом и состоит роль таймера). Период этих всплесков определяется ёмкостью конденсатора  $C$  и сопротивлениями  $R$ .



И обе эти схемы являются *цепями постоянного тока*. В них ток не меняет своего направления (но величина его может меняться - это обусловлено наличием в цепи индуктивностей и ёмкостей). Даже ваш мобильный телефон - это цепь постоянного тока.

Но мы начнём разговор с цепей "самого правильного постоянного тока" - с цепей, в которых ток не меняет ни своей величины, ни своего направления.

## → Электродвижущая сила (ЭДС)

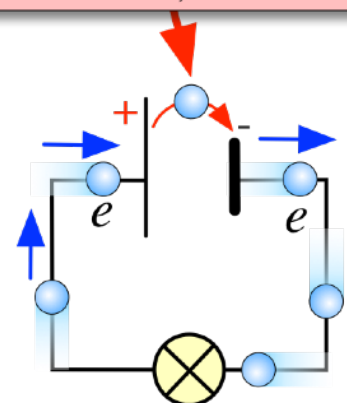


Ток - это движение электронов в определенном направлении. Оно нужно, чтобы в наших устройствах тоже двигались электроны. Электроны движутся по проводникам, проводники сопротивляются движению электронов. Поэтому для поддержания постоянного тока электронов нужен источник постоянной энергии. Ведь нужен же насос в системе циркуляции воды (отопления)? Не будет такого источника - не будет постоянного тока.

Задача источника тока - разделять заряды за счёт совершения работы *сторонними* силами. Что такое сторонние силы? Это силы, преобразующие энергию любого *неэлектрического вида* в электрическую.

А почему нельзя использовать электрические силы? Ну вот посмотрите: есть у нас простенькая цепь - источник тока (батарея), лампочка и провода. Электроны (именно их движение создает ток в металлических проводах) по законам электростатики бегут от отрицательного полюса батареи к положительному - от низкого потенциала к высокому. Чтобы поддерживать постоянным ток в цепи, батарея должна

Вот здесь надо «пересадить» электрон из точки с высоким потенциалом в точку с низким потенциалом





"пересадить" прибежавший к ней электрон со своего положительного полюса на свой отрицательный полюс и запустить его снова в цепь. Но сделать это **с помощью электрических сил невозможно**: электрическое поле потенциально (*работа потенциальной силы по замкнутому контуру равна нулю*) и оно не может "пересадить" электрон в этом направлении - **это работа против сил электрического поля**. Поэтому работа по "пересадке" электронов из точки с высоким потенциалом в точку с низким потенциалом осуществляется *сторонними неэлектрическими силами*.



**Обобщая.** Постоянный электрический ток может быть создан только в замкнутой цепи, в которой свободные носители заряда циркулируют по замкнутым траекториям. Электрическое поле в разных точках такой цепи неизменно во времени. Но при перемещении электрического заряда в электростатическом поле по замкнутой траектории, работа электрических сил равна нулю (электростатическое поле потенциально). Поэтому для существования постоянного тока необходимо наличие в электрической цепи устройства, способного создавать и поддерживать разности потенциалов на участках цепи за счет работы сил неэлектростатического происхождения. Такие устройства называются источниками постоянного тока. Силы неэлектростатического происхождения, действующие на свободные носители заряда со стороны источников тока, называются *сторонними силами*.

Какие сторонние силы могут это сделать? Многие:

- силы химических реакций: в батарейках и аккумуляторах;
- термоэлектрические силы: возникают при разности температур разнородных проводников;
- индукционные силы: в электрогенераторах и контурах, движущихся в магнитном поле;
- фотоэлектрические силы: в солнечных батареях;
- пьезоэлектрические силы: в пьезозажигалках.

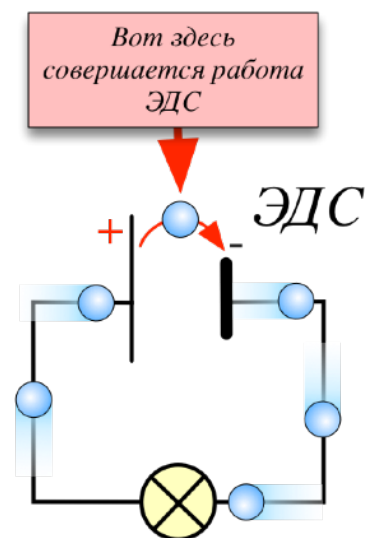
Обобщающим понятием, численно характеризующим деятельность таких сторонних неэлектрических сил является **электродвижущая сила**<sup>6</sup>.

**Электродвижущая сила (ЭДС)** - скалярная физическая величина, равная **работе сторонних сил** по перемещению единичного положительного заряда по замкнутому контуру электрической цепи:  $\mathcal{E} = \frac{A}{q}$  [Вольт].

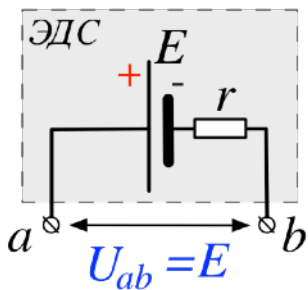
Хоть ЭДС и напряжение измеряются в вольтах, но это разные по своей физической природе величины. *Напомню*: напряжение - это **работа электрического поля** по переносу единичного положительного заряда.



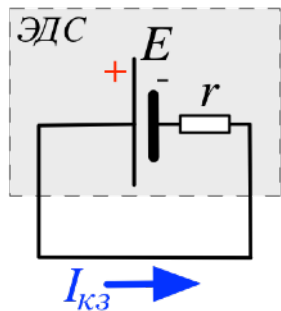
**Любой реальный источник ЭДС обладает своим внутренним сопротивлением  $r$ . Оно обычно много меньше сопротивления внешней нагрузки, но его также надо учитывать при расчете цепей.**



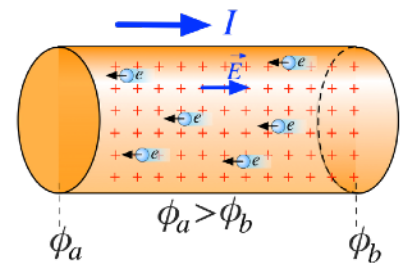
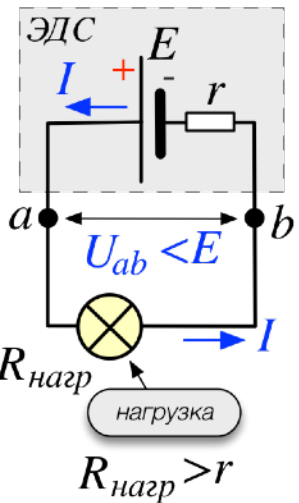
<sup>6</sup> На мой вкус - довольно громоздкое и не совсем точное название. Ведь ЭДС - это работа, а не сила. Ну уж так сложилось исторически.



Если цепь разомкнута (ток по ней не течет), то напряжение на клеммах источника тока равно ЭДС, если цепь замкнута (по ней течет ток), то напряжение на клеммах источника тока меньше ЭДС.



Если же клеммы источника ЭДС замкнуть (закоротить), то возникнет **короткое замыкание (КЗ)**. Ток короткого замыкания  $I_{КЗ}$  может быть очень большим и источник тока может просто сгореть.

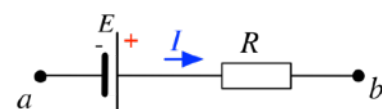
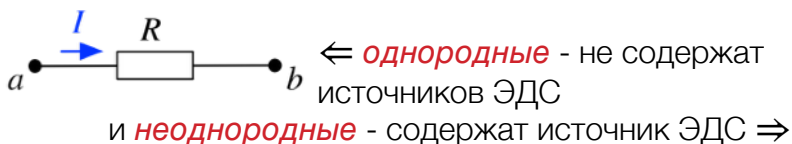


## ➔ Цепи постоянного тока

Как мы договорились выше, в рассматриваемых цепях постоянный ток не меняет ни своей величины, ни своего направления. Конденсаторы такой постоянный ток не проводят, индуктивности (если не учитывать их электрического сопротивления и не рассматривать моменты включения-выключения тока) для такого постоянного тока "прозрачны". Поэтому в таких цепях присутствуют только источники ЭДС и электрические сопротивления (в виде сопротивлений нагрузок, сопротивлений источников ЭДС и (когда это оговаривается) сопротивлений проводов).

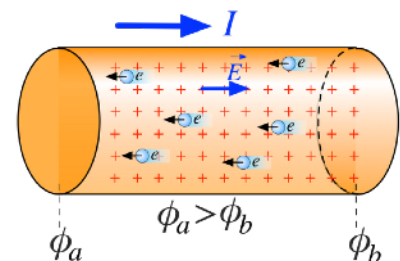
*Что значит рассчитать цепь постоянного тока? Это значит вычислить с помощью известных величин и правил/законов цепей постоянного тока величины токов/напряжений/сопротивлений в любой точке цепи.*

Цепи постоянного тока можно рассматривать как в целом, так и разбивать их на отдельные участки. Можно выделить два типа таких участков:



## ➔ Однородные цепи постоянного тока

В таких цепях нет источников ЭДС - то есть нет сторонних сил, совершающих работу над зарядами тока. Работу по перемещению зарядов совершают только кулоновские силы электрического поля.



Электрический ток в проводниках течёт только тогда, когда в проводнике существует электрическое поле. Если электрическое поле в проводнике существует, то и существует разность потенциалов на концах проводника.

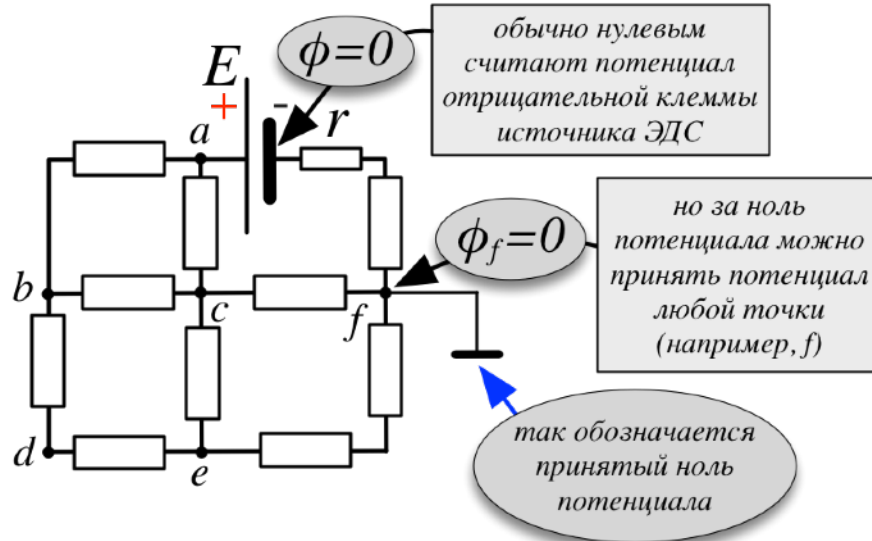
**Если разность потенциалов между точками проводника однородной цепи равна нулю, то ток по проводнику не течёт<sup>7</sup>.**

<sup>7</sup> Нам это простое утверждение очень пригодится в дальнейшем.

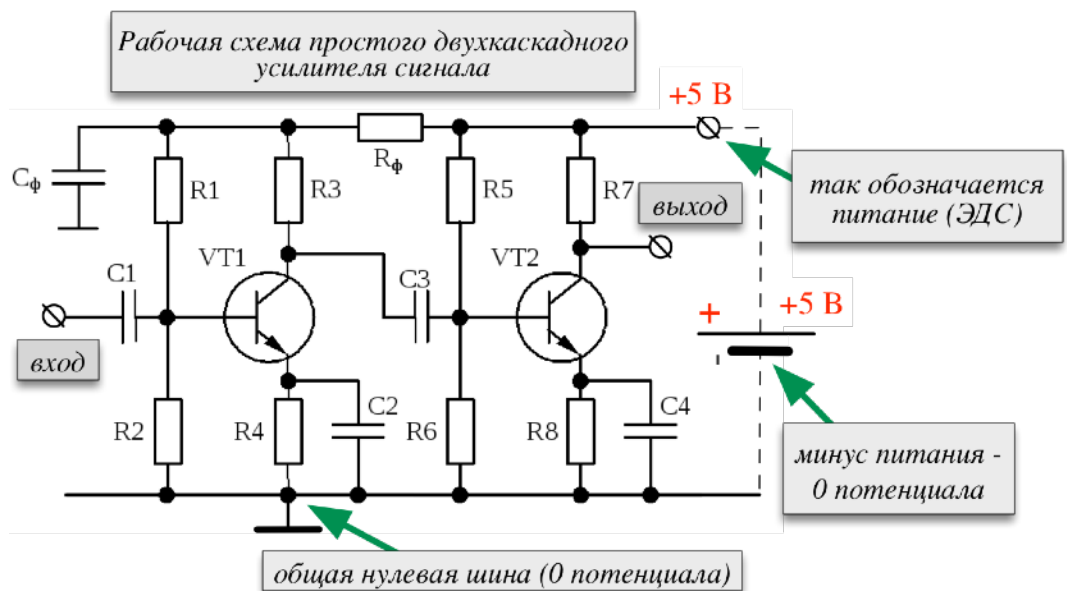
## ➔ Потенциал, напряжение

**Потенциал** (как и потенциальная энергия) - *понятие относительное*<sup>8</sup>, то есть требует задания нуля отсчёта. Разность потенциалов, *понятие абсолютное*.

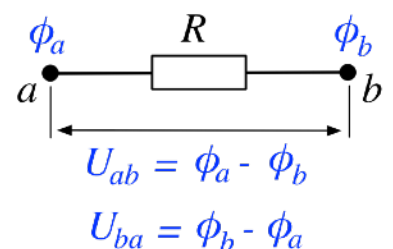
Обычно в задачах по расчёту цепей постоянного тока ищутся напряжения (разности потенциалов). Но как быть, если в схеме, приведенной на рисунке, просят найти напряжение между точками *a* и *d*? Выход простой: выбирают ноль потенциала (как - пояснено на рисунке), обозначают потенциалы каждой точки цепи, составляют уравнения для разности потенциалов для простых участков цепи (об этом чуть позже) и, решая их, определяют абсолютную величину  $\varphi_a - \varphi_d$ .



Вот вам пример реальной электрической схемы (хоть это и не цепь постоянного тока) с обозначением уровня отсчета потенциала.



**Напряжение для однородного участка цепи** - это разность потенциалов между двумя точками. И мы имеем право считать как  $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ , так и  $U_{ba} = \varphi_b - \varphi_a$ .



<sup>8</sup> Смотри Историю про Электростатику.

## ➔ Куда течёт ток?

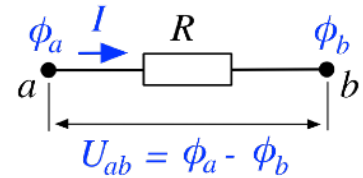
Мы привыкли повторять, что направление тока определяется направлением движения положительных зарядов. Но в электротехнике, в теории электрических цепей рассуждают категориями напряжение-потенциал, ток, сопротивление, ЭДС. Про электроны и положительные заряды не говорят (хотя и помнят про них). Так как же в цепях постоянного тока определить направление тока?

Общее утверждение таково:

*В однородных цепях ток течёт от более высокого к более низкому потенциалу<sup>9</sup>!*

Поскольку ток течёт в сторону уменьшения потенциала, то напряжение  $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$  будет положительным, а напряжение  $U_{ba} = \varphi_b - \varphi_a$  будет отрицательным.

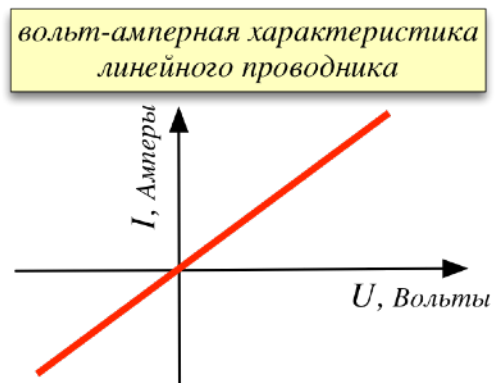
*Знак посчитанного (или измеряемого) напряжения тоже говорит куда течёт ток.*



## ➔ Закон Ома для однородного участка цепи

Немецкий физик Георг Ом в 1826 году экспериментально установил, что сила тока  $I$ , текущего по металлическому проводнику в однородной цепи (не содержащей источников ЭДС), пропорциональна напряжению  $U_{ab}$  на концах проводника:  $I = \frac{1}{R} U_{ab}$  или  $U_{ab} = R \cdot I$ , где  $R$  - электрическое сопротивление проводника.

Закон Ома для однородной цепи - **экспериментальный закон**<sup>10</sup>, он справедлив в широких пределах для металлов и иных проводников. График зависимости тока от напряжения *называется вольт-амперной характеристикой (ВАХ)*. Для проводников, подчиняющихся закону Ома, это - линейный график, проходящий через начало координат. И такие проводники называются **линейными** (а цепи, их содержащие - **линейными**). Линейная вольт-амперная характеристика для отрицательных значений тока и напряжения имеет такой же вид, что и для положительных значений. Это говорит о том, что ток в линейной цепи проходит одинаково в обоих направлениях. И электрическое сопротивление является коэффициентом пропорциональности между током и напряжением. Само же электрическое сопротивление зависит от материала проводника и его геометрии.



*Во всех задачах про электрические цепи мы будем иметь дело (если иное специально не оговаривается) с линейными проводниками и будем применять закон Ома.*

<sup>9</sup> Это вытекает из законов Электростатики: ведь направление тока - это направление движения положительных зарядов, а положительные заряды в электростатическом поле движутся в направлении уменьшения потенциала.

<sup>10</sup> Это значит, что его не вывести из теории. Он описывает частный случай - линейные проводники.

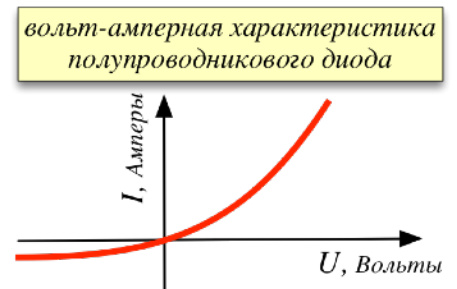


Вдумчивый ученик: "А когда закон Ома не выполняется?"

Для металлов закон Ома не работает:

- при больших токах (проводник нагревается, его электрическое сопротивление растёт и вольт-амперная характеристика перестает быть линейной);
- при низких температурах в области сверхпроводимости;
- при высоких частотах изменения напряжения (когда скорость изменения электрического поля настолько велика, что нельзя пренебрегать инерционностью носителей заряда).

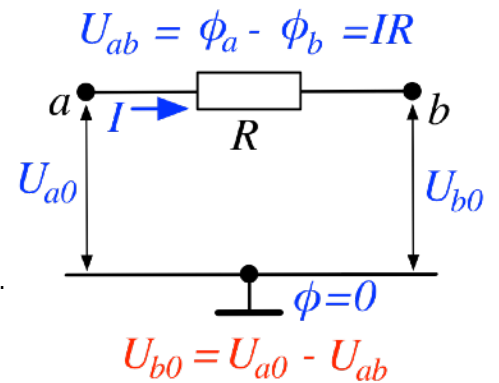
Он не выполняется также в вакуумных и газоразрядных лампах, при пробое диэлектрика, в полупроводниках с *p-n* переходом. Вот вам вольт-амперная характеристика обычного полупроводникового диода. Она явно нелинейна (о диоде мы будем говорить позже).



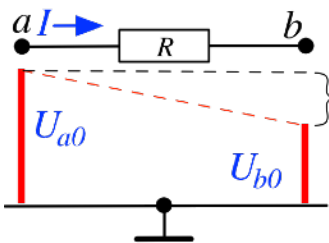
Итак, дальше имеем дело с **ЛИНЕЙНЫМИ ПРОВОДНИКАМИ**.

Часто говорят, что "при протекании тока через сопротивление на нём **падает напряжение**". Это как понять? Где падает, куда падает?

Объясняю. Я вам уже говорил, что обычно за ноль потенциала в электрических схемах принимается потенциал отрицательной клеммы источника питания. И провод, к ней подсоединённый, называется *нулевой шиной*. На практике важны и измеряются напряжения между нужной точкой в схеме и нулевой шиной (хотя никто не может вам запретить измерить напряжение между двумя любыми точками). Глядя на схему на рисунке, давайте измерим напряжения между точкой *a* и нулевой шиной и между точкой *b* и нулевой шиной.



Тогда  $U_{a0} - U_{b0} = (\phi_a - 0) - (\phi_b - 0) = \phi_a - \phi_b = U_{ab}$  или  $U_{b0} = U_{a0} - U_{ab} = U_{a0} - I \cdot R$ .



Значит напряжение в точке *b* (относительно нулевой шины) **упало** относительно напряжения в точке *a* (относительно нулевой шины) на величину  $U_{ab} = I \cdot R$ .

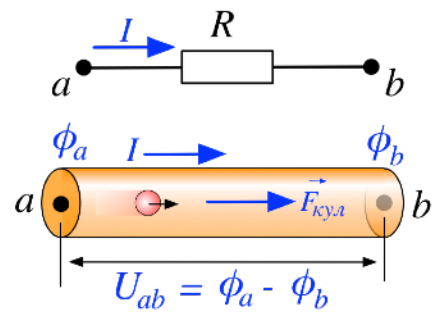


В этом и заключается главная функция резисторов в цепях: на них падает напряжение.

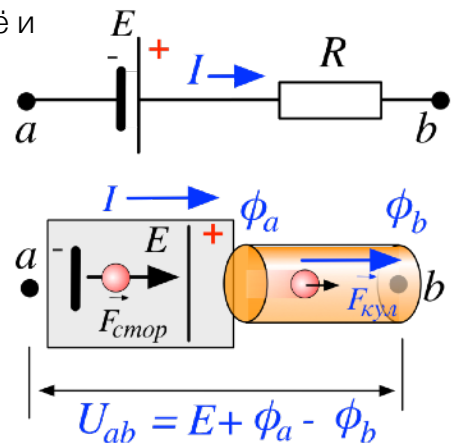
## ➔ Неоднородные цепи постоянного тока

В неоднородных участках цепей присутствует ЭДС - то есть есть сторонние силы, совершающие работу над зарядами тока.

Вернёмся на секундочку к однородным цепям. В них работу по перемещению зарядов тока совершают **только кулоновские силы**. И напряжение на участке  $ab$  (а напряжение - это полная работа по перемещению единичного положительного заряда) равно разности потенциалов (работе кулоновских сил по перемещению единичного положительного заряда):  $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ .

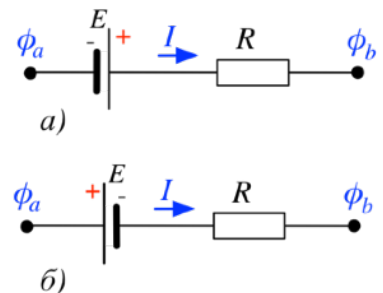


В неоднородной же цепи помимо кулоновских действуют ещё и сторонние силы. И над единичным положительным зарядом совершают работу обе эти силы. Сначала (если смотреть по направлению тока на нашем рисунке) сторонние силы "пересаживают" единичный положительный заряд с отрицательного полюса источника ЭДС на положительный, совершая работу, равную  $E$ , а затем работу совершают кулоновские силы. И их работа над единичным положительным зарядом равна  $\varphi_a - \varphi_b$ . В итоге напряжение на участке  $ab$  (напряжение - полная работа по перемещению единичного положительного заряда) равно сумме совершенных работ:  $U_{ab} = E + \varphi_a - \varphi_b$ .

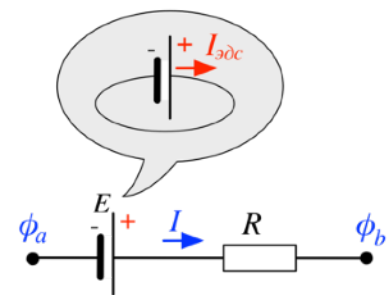


Давайте вот над чем ещё подумаем. А какая разница между неоднородными участками цепей на рисунках а) и б)?

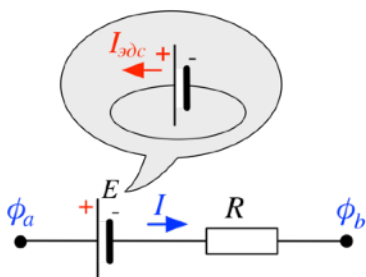
Направление тока одинаково - слева направо. Ага, вот оно отличие! Источники ЭДС включены в разные стороны! В электротехнике говорят, что источник ЭДС на рисунке а) включён **по току**, а на рисунке б) - **против тока**.



Поясняю. Смотрим на участок цепи а). Если этот источник ЭДС мысленно вырвать из цепи и замкнуть (соединить проводком его полюса), то куда потечёт по проводку ток  $I_{\text{ЭДС}}$ ? Он потечёт от положительного полюса источника ЭДС к отрицательному и его направление будет совпадать с выбранным направлением тока  $I$  в участке цепи. Поэтому и говорят, что **источник ЭДС включён по току**.



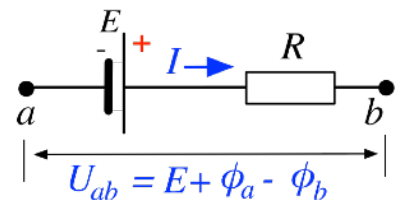
источник ЭДС включён по току



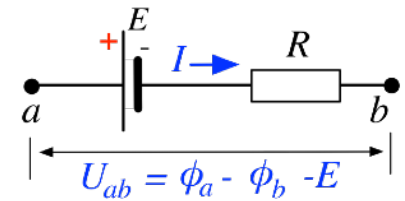
источник ЭДС включён против тока

А теперь смотрим на участок цепи б). Выполняем аналогичные действия и видим, что ток  $I_{\text{ЭДС}}$  течёт **против** выбранного направления тока  $I$ . Поэтому говорят, что **источник ЭДС включён против тока**.

Тогда для неоднородной цепи с источником ЭДС, включённым по току, напряжение на концах считается как  $U_{ab} = E + \varphi_a - \varphi_b$  (мы это уже обсуждали), а для неоднородной цепи с источником ЭДС, включённым против тока, напряжение на концах считается как  $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b - E$ .



*Напряжение на неоднородном участке цепи равно разности потенциалов на этом участке плюс ЭДС (если источник ЭДС включен по току) или минус ЭДС (если источник ЭДС включен против тока).*

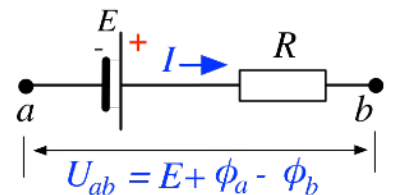


### ➔ Закон Ома для неоднородного участка цепи (обобщённый закон Ома)

Для неоднородного участка цепи закон Ома выглядит так:

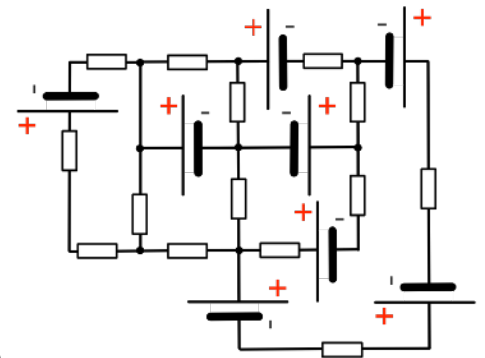
$$U_{ab} = I \cdot R = E + (\varphi_a - \varphi_b)$$

А если в цепи нет источника ЭДС ( $E = 0$ ), то эта формула превращается в закон Ома для однородной цепи.



### ➔ Закон Ома для полной цепи

Вот я какую "развесёлую" цепь постоянного тока нарисовал! А если ещё полчаса посидеть, то можно нарисовать в сто раз сложнее! Можно, конечно. Но не надо забывать главного - электрические цепи создаются для того, чтобы выполнять какую-либо полезную функцию (усиливать сигнал, хранить информацию, выполнять программу и т.д.) Сложность - отнюдь не самоцель. А даже наоборот - чем цепь сложнее, тем больше энергии она потребляет, тем дороже она в производстве, тем меньше её надёжность, тем сложнее в ней разбираться.



И тем не менее - даже такую "развесёлую" цепь можно рассчитать с помощью уже обсуждённых нами законов Ома.



Вдумчивый ученик: "А часто в электрических цепях встречается куча источников ЭДС?"

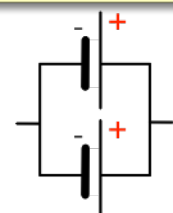
- Нет. И я даже не могу привести пример с "кучей источников ЭДС" из тех схем, что знаю. Это - экзотика. И она встречается в школьно-институтских задачах для того, чтобы напрячь вам мозги. Такие схемы имеют право на существование и вы должны уметь их считать.

Источники ЭДС иногда объединяют в батареи для увеличения общей ЭДС или тока. Вот примеры ➔

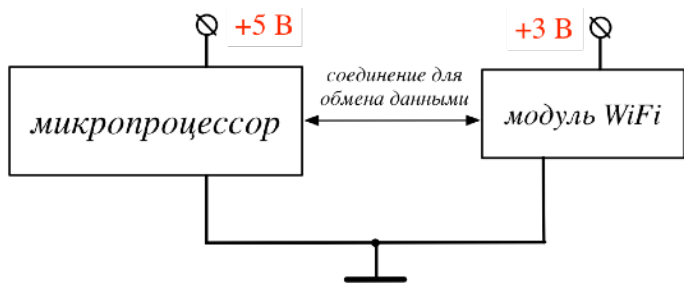
увеличиваем общую ЭДС



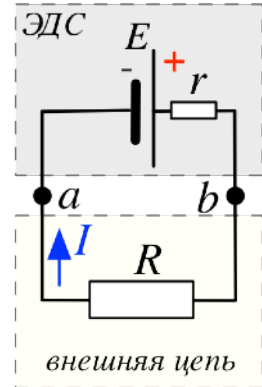
увеличиваем ток источника



Бывают случаи, когда в одном **устройстве** (в устройстве могут быть несколько электрических цепей) используются разные источники питания. Например, источник питания 5 Вольт питает



микропроцессор, а источник питания 3 Вольта питает модуль передачи-приёма Wi-Fi-сигнала. Но электрически это *разные* цепи.

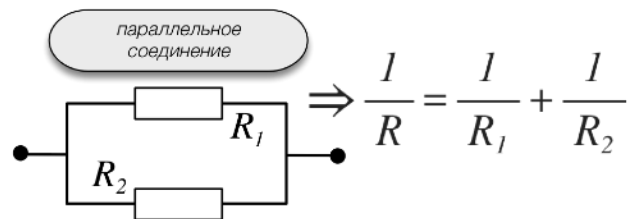
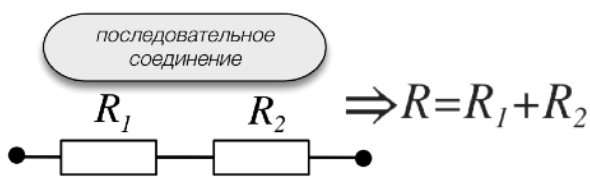


**Подавляющее большинство реальных электрических схем** можно представить в виде соединения источника ЭДС (со своим внутренним сопротивлением) с внешней цепью-нагрузкой<sup>11</sup> вот такой эквивалентной схемой.

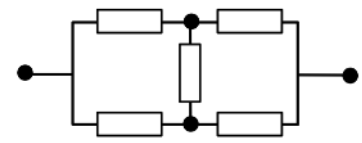
А для такой схемы справедливы формулы:  $I = \frac{E}{R + r}$  (закон Ома для *полной цепи*) и  $U_{ab} = I \cdot R$ . И ток в такой схеме течёт от плюса к минусу источника ЭДС.

### ➔ Последовательное и параллельное соединение проводников

Расписав токи-напряжения и воспользовавшись законом Ома для однородного участка цепи, очень легко вывести формулы для последовательного и параллельного соединения проводников. Эти формулы справедливы для любого количества последовательно и параллельно соединённых проводников.



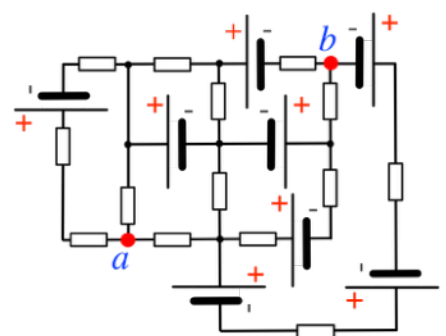
Но не все сложные цепи могут быть разложены на комбинации последовательного и параллельного соединений проводников. Вот пример такой цепи. Такие цепи рассчитываются с помощью правил Кирхгофа (об этом чуть ниже).



### ➔ Измерения и вычисления

А давайте снова вернёмся к нашей "развесёлой" цепи. Нас просят определить разность потенциалов между точками *a* и *b*. Величины всех сопротивлений и ЭДС нам заданы.

*У нас есть два пути: вычисления и измерения.*



**Вычисления.** Для вычислений реальной электрической схемы не нужно. С помощью законов Ома (или правил Кирхгофа, о которых будем говорить чуть позже) можно рассчитать любую цепь и получить математически точный результат. Но! *Этот рассчитанный результат математически точен лишь в той модели, в которой мы действуем.* Что я понимаю под моделью? Я понимаю под моделью список принятых допущений. Например, таких: все сопротивления в нашей цепи - линейные, в цепи нет утечек тока во внешний мир, в цепи нет паразитных емкостей, величины сопротивлений и ЭДС не изменяются во времени и т.д. Да и сами заданные величины сопротивлений и ЭДС - насколько они точны? Если все принятые допущения верны, то полученный в итоге

<sup>11</sup> А вот "развесёлую" схему так представить нельзя - источники ЭДС не объединяются в один.



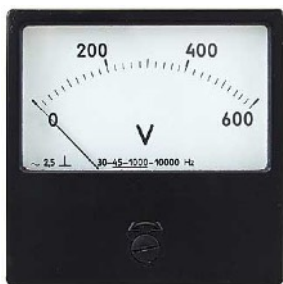
вычислений результат должен точно отражать действительное значение напряжения между точками  $a$  и  $b$ . Но в реале всегда есть маленькие, но нелинейности в цепях, паразитные ёмкости, утечки. Поэтому говорят, что в результатах вычислений присутствует *модельная погрешность*.

**Измерения.** Для измерений нужна настоящая электрическая схема. А дальше - чего уж проще: взяли вольтметр, ткнули куда надо проводочками и замерили напряжение между точками  $a$  и  $b$ . Получили циферку, например 3,5 Вольт. Насколько она точна? Ни о каких моделях-допущениях тут речи не идёт - мы измерили реальную физическую величину (все существующие нелинейности-утечки-паразитные ёмкости и пр. внесли свой вклад в результат измерения). Но возникают два вопроса: **1)** а не повлиял ли сам процесс измерения на результат (через вольтметр, например, потёк ток, который исказил всю картину)? и **2)** а как точно вольтметр определил циферку (если для него, например, напряжения 3,56 вольт и 3,53 вольт "кажутся" одинаковыми)? Оба эти вопроса обращены к инструменту измерения. Конечно, производители измерительных приборов стараются минимизировать влияние измерительного прибора на результат измерений. И на каждом измерительном приборе указана точность его измерений. Но всегда в результатах измерений присутствует *инструментальная погрешность*.

*Поэтому все физики делятся на два лагеря - теоретики и экспериментаторы. Первые любят вычислять, а вторые - измерять<sup>12</sup>.*

### ■ Вольтметры и амперметры

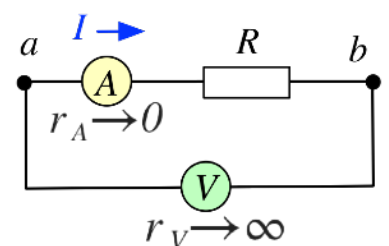
Вольтметры измеряют напряжение между двумя точками цепи. Амперметры измеряют ток в линии цепи.



И вольтметры и амперметры бывают аналоговыми (стрелочными) и цифровыми. Очень удобны для лабораторных измерений мультиметры - комбинированные цифровые измерительные приборы, которые умеют работать и как вольтметры, и как амперметры (а также умеют измерять ещё кучу электрических параметров цепи). Знак " $\sim$ " на лицевой панели вольтметров и амперметров означает, что они измеряют переменный ток, а знак " $\text{—}$ " - постоянный. Вольтметры и амперметры постоянного тока полярны - они показывают знак напряжения/тока.

Точность измерений вольтметров и амперметров определяется просто. Для стрелочных приборов - это половина минимального деления шкалы (точность стрелочного вольтметра на фото - 10 вольт). Для цифровых приборов - это величина младшего отображаемого разряда (точность цифрового вольтметра на фото - 0,01 вольт).

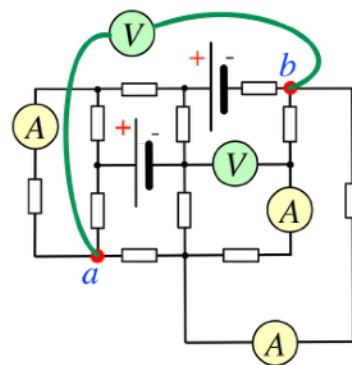
Вольтметры включаются в параллель тем точкам, напряжение на которых надо измерить. Чтобы включение вольтметра не влияло на результат измерений надо, чтобы через вольтметр не тёк ток. А для этого его электрическое сопротивление в идеале должно быть бесконечным ( $r_V \rightarrow \infty$ ).



<sup>12</sup> Шутка.

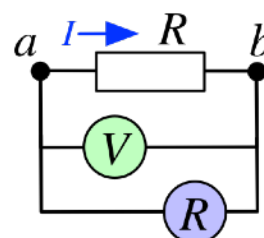
В лабораторных условиях, когда перед нами на столе лежит электрическая схема, которую надо исследовать, измерять напряжение между любыми двумя точками очень просто - "ткнул" два провода вольтметра в нужные точки и получил результат. Исследуемая схема при этом не меняется.

Амперметры надо "врезать" в ту линию, в которой измеряется ток. Чтобы включение амперметра не влияло на результат измерений надо, чтобы амперметр был "прозрачен" для тока - на нём не должно падать напряжение. А для этого его электрическое сопротивление в идеале должно быть равным нулю ( $r_A \rightarrow 0$ ).



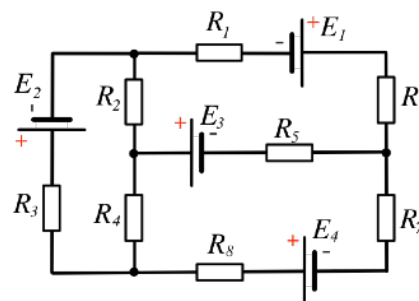
При измерении тока надо разомкнуть линию, в которой ток измеряется, и в разрыв включить амперметр. Это не всегда возможно. Например, перед нами готовое устройство с уже разведенными на плате соединениями. Разомкнуть соединение - это значит "подпортить" устройство. А не хотелось бы! Как быть?

Берём мультиметр, включаем его в режим вольтметра - измеряем напряжение между точками *a* и *b*. Затем переводим мультиметр в режим омметра (измерителя сопротивления) и измеряем сопротивление между точками *a* и *b* (омметр, как и вольтметр, включается "в параллель"). А затем делим напряжение на сопротивление и получаем ток. И не надо портить устройство!



## ➔ Правила Кирхгофа для разветвлённых цепей

Представьте, нам дана схема. Надо её рассчитать. Сначала надо найти токи<sup>13</sup>, текущие по всем однородным и неоднородным участкам цепи, а, зная токи, легко найдутся и любые напряжения. Схема эта - разветвлённая - она не сводится к простой. Известные нам законы Ома для однородных и неоднородных цепей позволяют рассчитать любую схему. Но для таких разветвлённых цепей гораздо удобнее применять правила Кирхгофа. Будем их рассматривать на примере данной нам схемы.

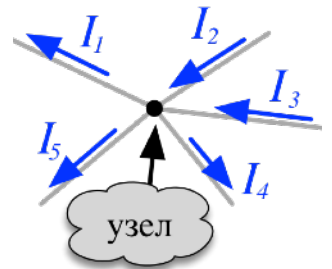


**Правила Кирхгофа** (их два) - это обобщение законов Ома. В них нет ничего нового в смысле физики. Они дают понятный и строгий алгоритм составления системы линейных алгебраических уравнений для определения токов в электрических цепях любой сложности. С их помощью можно составлять уравнения и для простых цепей, но это уже "из пушки по воробьям".

<sup>13</sup> Конечно, я имею в виду силу тока.

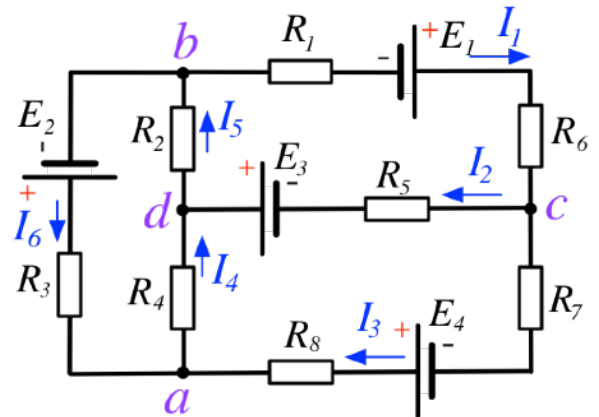
## Первое правило Кирхгофа (правило узлов)

В схемах разветвлённых электрических цепей обязательно присутствует такое понятие, как **узел**. **Узел** - это точка электрической цепи, в которую сходится не менее трёх проводников. **Токи, втекающие в узел, принято считать положительными, вытекающие из узла - отрицательными**<sup>14</sup>.



И первое правило Кирхгофа гласит: **Алгебраическая сумма сил токов для каждого узла в разветвленной цепи равна нулю**. Для узла на рисунке:  $I_2 + I_3 - I_1 - I_4 - I_5 = 0$ . Или можно по-другому: **сумма токов, втекающих в узел, равна сумме токов, из узла вытекающих**. "Сколько втекло, столько и вытекло". Первое правило Кирхгофа является следствием закона сохранения электрического заряда.

Взглянем на нашу схему. В ней можно выделить четыре узла: *a, b, c, d*. Для каждого из узлов можно записать первое правило Кирхгофа. Но перед тем, как это сделать, надо обозначить все токи, текущие по "прямым" участкам схемы. Обозначить-то мы обозначим, но какое направление токов указывать? Откуда мы знаем на этом этапе куда они текут? А вам и не надо знать точно куда текут токи. **Обозначим для каждого тока любое направление - предполагаемое направление**. Но уж коль вы выбрали определённое направление тока, то этого выбранного направления надо придерживаться на всем пути решения задачи. Пишем первое правило Кирхгофа для четырёх узлов:



$$\begin{aligned} \text{узел } a: I_3 + I_6 - I_4 &= 0 \\ \text{узел } b: I_5 - I_6 - I_1 &= 0 \\ \text{узел } c: I_1 - I_2 - I_3 &= 0 \\ \text{узел } d: I_4 + I_2 - I_5 &= 0 \end{aligned}$$

Ура! Мы молодцы? Не совсем. А сложите-ка алгебраически первые три уравнения. И что вы получите? Вы получите четвёртое уравнение. То есть четвёртое уравнение не несёт дополнительной информации о токах - оно является следствием первых трёх. На алгебраическом языке говорят, что *четвёртое уравнение линейно зависимо от первых трёх*. А если сложить все четыре уравнения, то мы вообще получим *тавтологию*:  $0 = 0$ . И это понятно. Для одного узла ток является вытекающим, а для другого - втекающим. Поэтому если в уравнении для одного узла он входит со знаком минус, то в уравнении для другого узла - со знаком плюс. И, суммируя уравнения для всех узлов, мы и получим  $0 = 0$ .

Ой, а так казалось всё хорошо! Что же делать? А всё просто: **если в вашей схеме есть *n* узлов, то выбирайте любые (*n* - 1) узлов и записывайте для них первое правило Кирхгофа**.

Тогда для нашей схемы выбираем первые три уравнения:

$$\begin{aligned} \text{узел } a: I_3 + I_6 - I_4 &= 0 \\ \text{узел } b: I_5 - I_6 - I_1 &= 0 \\ \text{узел } c: I_1 - I_2 - I_3 &= 0 \end{aligned}$$

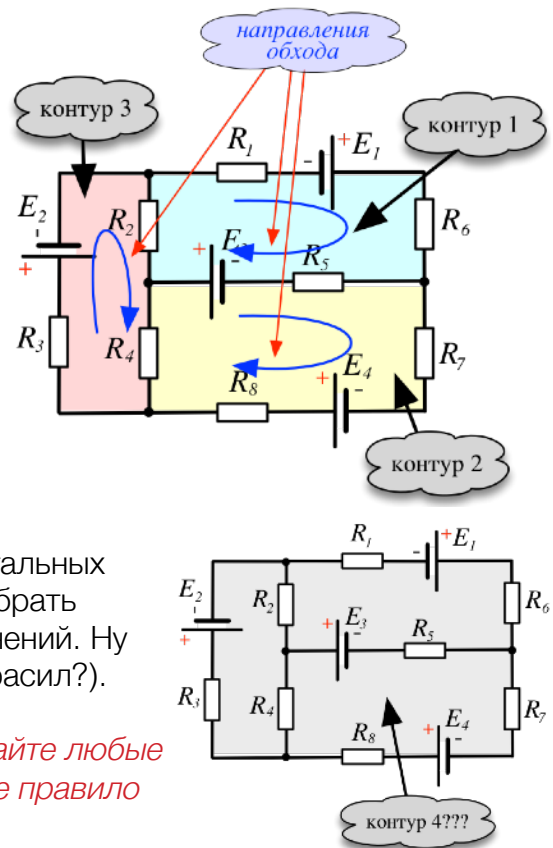
<sup>14</sup> Хотя можно и наоборот.

## Второе правило Кирхгофа (правило контуров)

В разветвленной цепи всегда можно выделить некоторое количество замкнутых путей, состоящих из однородных и неоднородных участков. Такие замкнутые пути называются **контурами**. На разных участках выделенного контура могут протекать различные токи.

Смотрим на нашу схему. Сразу видны три контура, состоящих из однородных и неоднородных участков - я их покрасил в разные цвета. "Ой, а я ещё и четвёртый нашёл!" - радостно кричит вдумчивый ученик (и показывает серенький контур). А здесь та же история, что и с четвёртым узлом выше. Этот четвёртый контур не является независимым - он не содержит никаких новых цепей по сравнению с тремя "цветными" контурами. Он является "зависимым" от остальных трёх контуров, избыточным. В принципе вы можете выбрать любые три из четырёх контуров для составления уравнений. Ну уж мы выберем три "цветных" контура (зря, что ли, я красил?).

*Если в вашей схеме есть  $m$  контуров, то выбирайте любые  $(m - 1)$  контуров и записывайте для них второе правило Кирхгофа.*



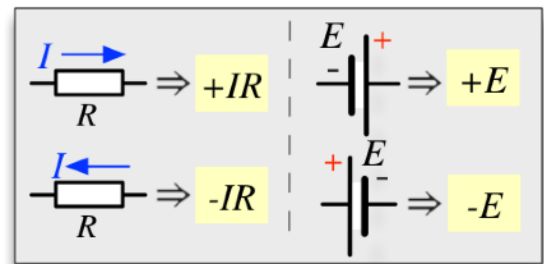
Теперь нужно выбрать **направление обхода** для каждого контура. Его можно выбрать любым для каждого контура, но давайте для единообразия для всех трёх контуров выберем направления обхода по часовой стрелке (показаны синенькими стрелочками).

Мы готовы сформулировать второе правило Кирхгофа: **суммы произведений алгебраических величин сил тока на сопротивления всех участков замкнутого контура равны алгебраической сумме ЭДС, которые входят в рассматриваемый контур:**

$$\sum I_i \cdot R_i = \sum E_j.$$

Требуются пояснения. Что такое **алгебраическая величина силы тока**? Это значение силы тока со знаком. Что за знак? А знак определяется по следующему правилу: если изначально выбранное (еще на этапе составления уравнений для токов по первому правилу Кирхгофа) направление тока совпадает с направлением обхода контура, то знак - "+", если нет, то знак - "-". То же со знаком ЭДС: если направление включения ЭДС совпадает с направлением обхода контура, то знак - "+", если нет, то знак - "-".

направление обхода →

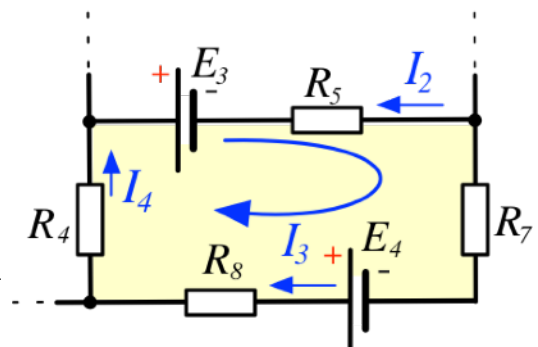


*правила выбора знаков тока и ЭДС при обходе контура*

Распишем аккуратно "желтый" контур нашей схемы по второму правилу Кирхгофа:

$$-I_2 \cdot R_5 + I_3 \cdot (R_5 + R_8) + I_4 \cdot R_4 = -E_3 + E_4$$

$-I_2 \cdot R_5$ : "-" потому, что направление тока  $I_2$  противоположно направлению обхода контура;  
 $+I_3 \cdot (R_5 + R_8)$ : "+" потому, что направление тока  $I_3$  совпадает с направлением обхода контура;



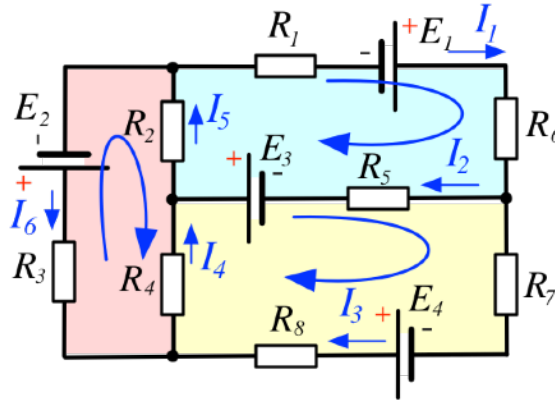
- $+I_4 \cdot R_4$ : "+" потому, что направление тока  $I_4$  совпадает с направлением обхода контура;
- $-E_3$ :  $E_3$  включена против направления обхода контура;
- $E_4$ :  $E_4$  включена по направлению обхода контура.

Распишем три уравнения для трёх контуров.

"жёлтый":  $-I_2 \cdot R_5 + I_3 \cdot (R_5 + R_8) + I_4 \cdot R_4 = -E_3 + E_4$

"голубой":  $I_1 \cdot (R_1 + R_6) + I_2 \cdot R_5 + I_5 \cdot R_2 = E_1 + E_3$

"розовый":  $-I_6 \cdot R_3 - I_4 \cdot R_4 - I_5 \cdot R_2 = -E_2$



В итоге имеем шесть уравнений (три уравнения по первому правилу Кирхгофа и три уравнения по второму правилу Кирхгофа):

$$\begin{cases} I_3 + I_6 - I_4 = 0 \\ I_5 - I_6 - I_1 = 0 \\ I_1 - I_2 - I_3 = 0 \\ -I_2 \cdot R_5 + I_3 \cdot (R_5 + R_8) + I_4 \cdot R_4 = -E_3 + E_4 \\ I_1 \cdot (R_1 + R_6) + I_2 \cdot R_5 + I_5 \cdot R_2 = E_1 + E_3 \\ -I_6 \cdot R_3 - I_4 \cdot R_4 - I_5 \cdot R_2 = -E_2 \end{cases}$$

Шесть уравнений - шесть неизвестных (шесть токов): можно решить. А найдя все токи, вы сможете найти и любые напряжения в схеме.



Если в результате численного решения этой системы уравнений вы получите, например, значение  $I_5 = -5A$ , то "-" означает, что ток  $I_5$  течёт в другую сторону, нежели вы изначально предположили. А "+" в числовом результате означает, что с направлением тока вы угадали.

Правила Кирхгофа просты и логичны: вы решите с их помощью пару задач и поймёте их "прелесть". Более того - они *алгоритмичны*: уравнения по ним составляются и решаются алгебраическими матричными методами, существуют компьютерные программы для обчёта цепей любой сложности.

## ➔ Закон Джоуля-Ленца

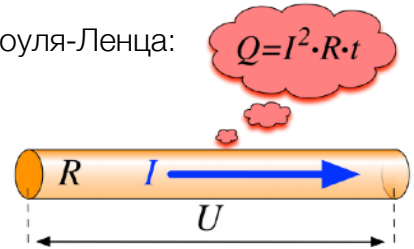
Электрический ток - это направленное движение заряженных частиц. В металлах этими частицами являются электроны. Электроны при движении по проводнику много раз взаимодействуют на своем пути с атомами кристаллической решётки и отдают им часть своей энергии. Эта энергия переходит в тепловую энергию кристаллической решётки. И это приводит к нагреванию проводника. То есть прохождение электрического тока по проводнику сопровождается выделением тепла в проводнике.

Количественную оценку теплового действия тока даёт закон Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t = U \cdot I \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t, \text{ где } Q \text{ [Дж]-}$$

количество теплоты, выделившееся в проводнике за время  $t$ .

Такая запись предполагает ток  $I$  постоянным за время  $t$ .



При изменяющемся токе можно записать мгновенное значение:  $dQ = I^2 \cdot R \cdot dt$ , а если

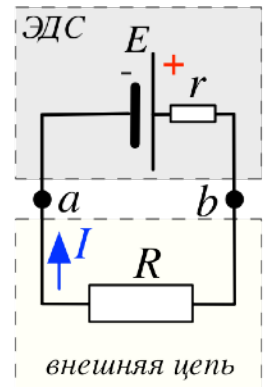
учесть, что  $\frac{dQ}{dt}$  - это тепловая мощность (количество теплоты в единицу времени), то закон

Джоуля-Ленца можно переписать в виде:  $P = \frac{dQ}{dt} = I^2 \cdot R = U \cdot I = \frac{U^2}{R}$  [Ватты].

Тепло всегда выделяется в проводнике, по которому проходит ток. Тепловое действие тока используется во всевозможных нагревательных приборах: от кипятильника-чайника до сварочных аппаратов и плавильных печей. С другой стороны, выделение тепла в проводниках ведёт к потерям энергии.

Итак, мощность электрического тока в проводнике:  $P = I^2 \cdot R$

Давайте вернёмся к общему виду электрической цепи.



Для неё можно записать следующие мощностные соотношения:

Полная мощность цепи (мощность источника ЭДС)	$P_{comm} = E \cdot I = \frac{E^2}{r + R}$
Мощность, выделяемая на нагрузке (полезная мощность)	$P_{user} = I^2 \cdot R = \frac{E^2 \cdot R}{(r + R)^2}$
Мощность, теряемая при передаче (мощность потерь)	$P_{lost} = I^2 \cdot r = \frac{E^2 \cdot r}{(r + R)^2}$
КПД источника ЭДС	$\eta = \frac{P_{user}}{P_{comm}} = \frac{R}{r + R}$

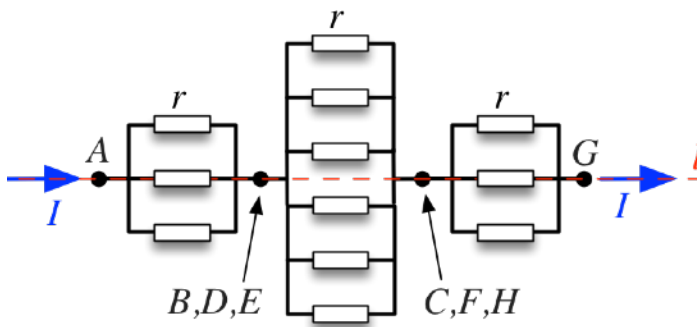
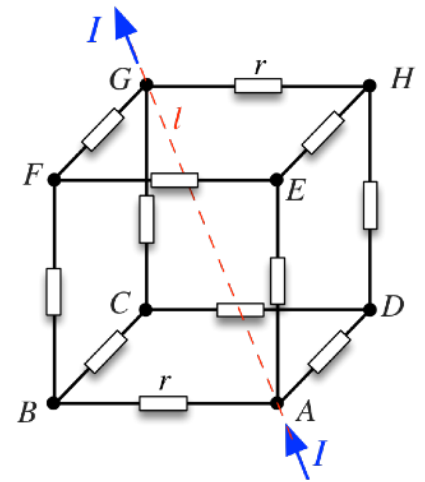
-----  
А теперь - задачи!

> **Задача - Соединение проводников:** Из проволоки сделан каркас в форме куба, каждое ребро которого имеет сопротивление  $r$ . Найти сопротивление этого каркаса, если ток в общей цепи идет от вершины  $A$  к вершине  $G$ .

**Решение:** Напомню то, что мы обсуждали ранее.



- Если разность потенциалов между точками проводника однородной цепи равна нулю, то ток по проводнику не течёт.
- Точки с одинаковым потенциалом всегда есть в схемах, обладающих осью симметрии относительно точек подключения источника питания.
- Точки с одинаковым потенциалом можно соединять и разъединять - поведение токов не изменится.



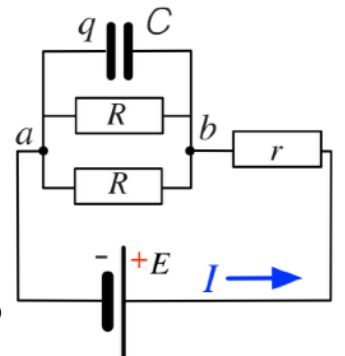
Куб подключен через свою большую диагональ  $AG$  (диагональ  $l$ ). Точки  $E, B, D$  симметричны относительно  $l$  и имеют равные потенциалы. Точки  $C, F, H$  симметричны относительно  $l$  и имеют равные потенциалы. Соединив точки с равными потенциалами, получим эквивалентную схему. Сопротивление её

считается очень легко:  $R = \frac{5}{6}r$ .

> **Задача - Закон Ома для полной цепи:** Два резистора с одинаковым сопротивлением  $R$  и резистор с сопротивлением  $r$  подключены к источнику тока по схеме на рисунке. К участку  $ab$  подключен конденсатор емкости  $C$ . Найти ЭДС источника тока, если заряд на конденсаторе  $q$ .

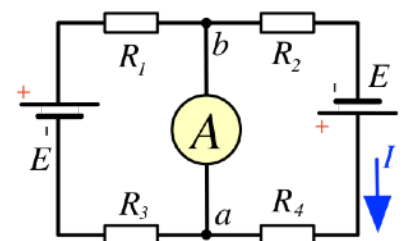
**Решение:** Поскольку ничего не сказано о внутреннем сопротивлении источника тока, то считаем его равным 0 - обычная практика в такого рода задачах.

Через конденсатор постоянный ток не идёт. На конденсаторе есть напряжение - это то же напряжение, что и напряжение на резисторах  $R$  -  $U_{ab}$ . Из электростатики:  $U_{ab} = \frac{q}{C}$ . По закону Ома для участка цепи:  $U_{ab} = I \cdot \frac{R}{2}$ . По закону Ома для полной цепи:  $E = I \cdot (\frac{R}{2} + r)$ . В итоге:  $E = \frac{q}{C} \cdot \frac{R + 2r}{R}$ .

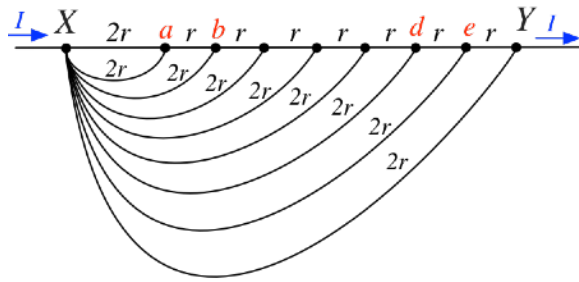


> **Задача - Закон Ома для полной цепи:** В цепи, показанной на рисунке,  $R_2 > R_1$ . При каком сопротивлении  $R_3$  можно подобрать такое сопротивление  $R_4$ , чтобы ток через амперметр был равен нулю? ЭДС батарей одинаковы, внутренним сопротивлением батарей пренебречь.

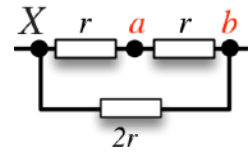
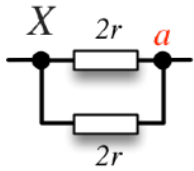
**Решение:** Поскольку ток через амперметр равен нулю, то можно записать:  $2E = I \cdot (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$ . Ток через амперметр не пойдёт, если потенциалы точек  $a$  и  $b$  равны. Имеем:  $U_{ab} = E - I \cdot (R_2 + R_4) = 0$ . Решая совместно, получаем:  $R_4 = R_3 - R_2 + R_1$ . Поскольку  $R_2 > R_1$ , а  $R_4$  не может быть отрицательной величиной, то  $R_3 > R_2 - R_1$ .



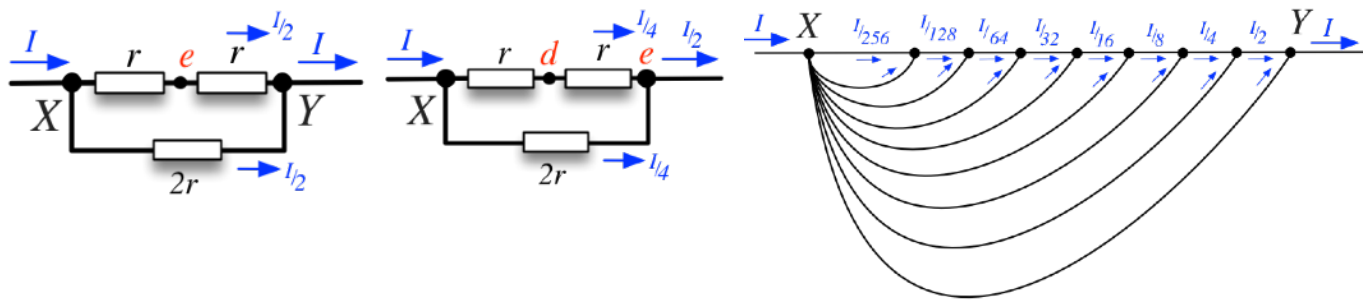
> **Задача - Соединение проводников:** Определите сопротивление между точками  $X$  и  $Y$ . Найти силу тока во всех участках цепи.



**Решение:** Нестандартное соединение. Будем рассматривать эту схему по частям. Давайте определим сопротивление между точками  $X$  и  $a$ . Этот кусочек схемы эквивалентно будет выглядеть вот так. Очевидно, что сопротивление между точками  $X$  и  $a$  равно  $r$ . Теперь найдём сопротивление между точками  $X$  и  $b$ . Этот кусочек схемы эквивалентно будет выглядеть вот так. Очевидно, что сопротивление между точками  $X$  и  $b$  тоже равно  $r$ . Легко видеть, что **сопротивления между точкой  $X$  и любой другой точкой (в том числе и  $Y$ ) равны  $r$** . В этом и состоит хитрость такого включения.

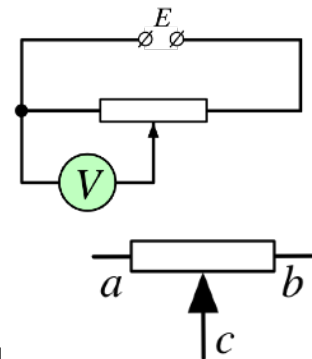


Теперь токи. Будем рассматривать токи, начиная от точки  $Y$ . Поскольку сопротивление между точками  $X$  и  $e$  равно  $r$ , заменим всю схему вот на такую эквивалентную. Очевидно,



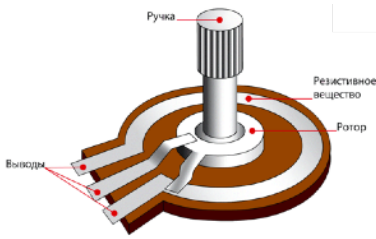
что по параллельным ветвям из-за равенства их сопротивлений текут одинаковые токи, равные  $I/2$ . Теперь отступим в нашей схеме на шаг влево. Поскольку сопротивление между точками  $X$  и  $d$  равно  $r$ , получим вот такую эквивалентную. Очевидно, что по параллельным ветвям из-за равенства их сопротивлений текут одинаковые токи, равные  $I/4$ . Рассуждая аналогично, легко убедиться, что токи в остальных ветвях будут удовлетворять подобной закономерности:  $\frac{I}{2}, \frac{I}{4}, \frac{I}{8}, \frac{I}{16}, \frac{I}{32}, \frac{I}{64}, \frac{I}{128}, \frac{I}{256}$ .

> **Задача - Закон Ома для полной цепи:** В цепи, изображённой на рисунке, вольтметр показывает напряжение  $U$ . Напряжение на входе цепи  $E$ . Найти отношение силы тока, идущего через вольтметр, к силе тока, идущую через правую часть потенциометра, если отношение сопротивлений, на которые движок делит потенциометр,  $n = 2/3$ , причём большее сопротивление справа от движка.

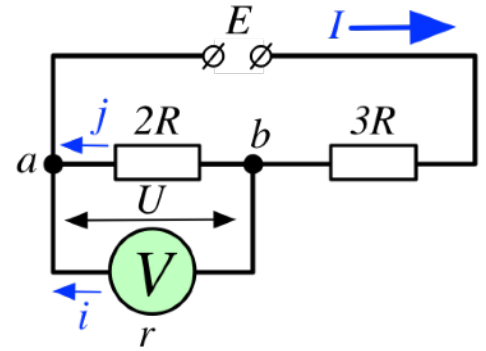


**Решение:** Потенциометр - это переменное сопротивление. Перемещая движок потенциометра (или вращая его ручку), можно менять сопротивление цепи  $ac$  и  $bc$  (но суммарное сопротивление цепи  $ab$  не меняется). Вот так он выглядит (ниже). Мы ещё говорили, что по идеальному вольтметру ток не идёт, поскольку у него бесконечно большое сопротивление. Но у реальных вольтметров сопротивление хоть и большое, но конечное. Поэтому по ним ток идёт.





Давайте изобразим эквивалентную схему в соответствии с условиями задачи. Сопротивления  $2R$  и  $3R$  соответствуют положению движка потенциометра. Вольтметр показывает напряжение между точками  $a$  и  $b$ .  $r$  - сопротивление вольтметра,  $i$  - ток, протекающий через него,  $j$  - ток, протекающий через левую часть потенциометра.



По закону Ома для неоднородной цепи:  $E = U + I \cdot 3R \Rightarrow I = \frac{E - U}{3R}$

По закону Ома для участка цепи:  $U = j \cdot 2R \Rightarrow j = \frac{U}{2R}$

Для узла  $a$ :  $I = i + j \Rightarrow i = I - j$

Искомое соотношение:  $\frac{i}{I} = \frac{I - j}{I} = 1 - \frac{j}{I} = 1 - \frac{U}{2R} \cdot \frac{3R}{E - U} = 1 - \frac{3U}{2(E - U)}$

**> Задача - Закон Ома для полной цепи:** Определите разность потенциалов между любыми точками цепи, изображенной на рисунке. ЭДС каждой батареи  $E$ , внутреннее сопротивление  $r$ . Сопротивлением проводов пренебречь.

**Решение:** Страшно? Ну это только с первого взгляда.

В нашей цепи восемь батарей (хотя могло бы быть и 108 - ответ не изменился бы).

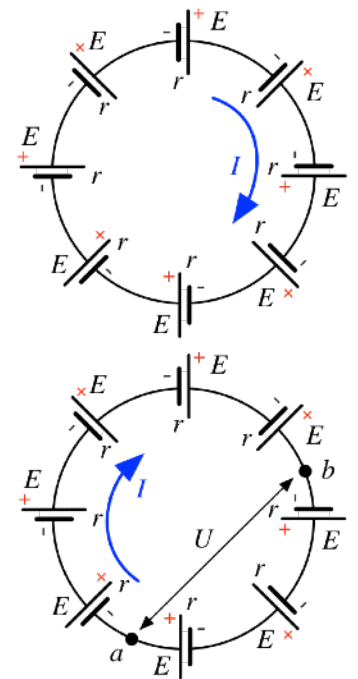
По закону Ома для полной цепи сила тока в цепи  $I = \frac{8E}{8r} = \frac{E}{r} \Rightarrow$

$E = I \cdot r.$

Давайте вычислим напряжение между точками  $a$  и  $b$ .

По закону Ома для неоднородной цепи  $U + 5I \cdot r = 5E \Rightarrow U = 5E - 5I \cdot r$ , но  $E = I \cdot r \Rightarrow U = 0.$

И это справедливо для любой пары точек в цепи для любого количества батарей.

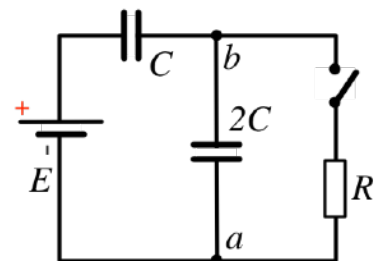


**> Задача - Работа тока:** Какое количество теплоты выделится на резисторе с сопротивлением  $R$  после замыкания ключа. Внутренним сопротивлением батареи пренебречь.

**Решение:** До замыкания ключа мы имеем два последовательно соединённых конденсатора общей ёмкостью  $\frac{2C}{3}$ . Общий заряд на

них равен  $q_1 = \frac{2C \cdot E}{3}$ , а энергия  $W_1 = \frac{C \cdot E^2}{3}$ . После замыкания ключа по цепи пройдёт ток, но после перезарядки конденсаторов он прекратится (конденсатор  $C$  не даст ему постоянно течь).

Поэтому потенциалы точек  $a$  и  $b$  будут одинаковы и на конденсаторе  $2C$



заряда не будет. Конденсатор  $C$  зарядится до напряжения  $E$ , заряд его станет равным

$$q_2 = C \cdot E, \text{ а энергия } W_2 = \frac{C \cdot E^2}{2}.$$

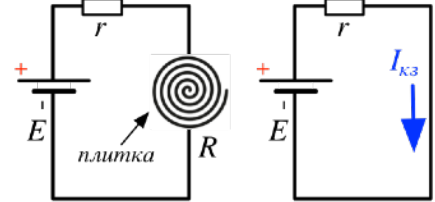
Работа батареи по перемещению зарядов равна  $A = E \cdot (q_2 - q_1) = \frac{C \cdot E^2}{3}$ . Эта работа

пошла как на изменение энергии, запасённой в конденсаторах, так и на выделение

теплоты:  $A = \Delta W + Q$ . Поэтому

$$Q = A - (W_2 - W_1) = \frac{C \cdot E^2}{3} - \left( \frac{C \cdot E^2}{2} - \frac{C \cdot E^2}{3} \right) = \frac{C \cdot E^2}{6}.$$

**> Задача - Мощность тока:** Какой ток пойдёт по подводящим проводам при коротком замыкании, если на двух плитках с сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  выделяется при поочередном включении одинаковая мощность  $P$ ?



**Решение:** Пусть  $E$  - ЭДС источника, а  $r$  - суммарное сопротивление источника и проводов. Мощность, выделяемая на плитке (нагрузке), равна

$$P = I^2 \cdot R = \frac{E^2 \cdot R}{(r + R)^2}, \text{ где } R - \text{сопротивление плитки. Приравняв эти мощности для двух}$$

плиток (по условию задачи), имеем  $\frac{R_1}{(r + R_1)^2} = \frac{R_2}{(r + R_2)^2} \Rightarrow r = \sqrt{R_1 \cdot R_2}$ .

Возвращаемся к выражению для мощности:  $P = \frac{E^2 \cdot R_1}{(\sqrt{R_1 \cdot R_2} + R_1)^2} = \frac{E^2}{(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})^2} \Rightarrow$

$$E = \frac{\sqrt{P}}{(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})}. \text{ Ток короткого замыкания: } I_k = \frac{E}{r} = \frac{\sqrt{P}}{(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2}) \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2}}.$$

**> Задача - Мощность тока:** Линия имеет сопротивление  $r$ . Какое напряжение должен иметь генератор, чтобы при передаче по этой линии потребителю мощности  $P$  потери в линии не превышали  $\beta$  процентов передаваемой мощности?



**Решение:** Пусть искомое напряжение генератора равно  $E$  - ЭДС источника,  $I$  - ток в цепи.

Тогда:  $P_{gen} = E \cdot I = \frac{E^2}{r + R}$  - мощность генератора,  $P = I^2 \cdot R = \frac{E^2 \cdot R}{(r + R)^2}$  - мощность на

потребителе [1],  $P_{lost} = I^2 \cdot r = \frac{E^2 \cdot r}{(r + R)^2}$  - мощность потерь в линии. По условию

$$\frac{P_{lost}}{P_{gen}} = \beta. \text{ Откуда } \beta = \frac{r}{r + R} \Rightarrow r + R = \frac{r}{\beta} \text{ и } R = \frac{1 - \beta}{\beta} \cdot r. \text{ Подставляем в [1]:}$$

$$E = \sqrt{\frac{P \cdot r}{(1 - \beta) \cdot \beta}}.$$

=====

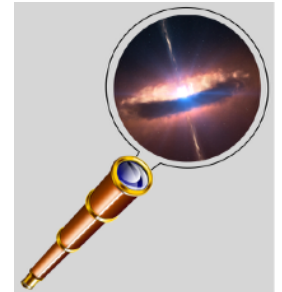
## ➔ Усиление и Управление

Человеческие возможности ограничены. Собственные силы человека невелики - слон сильнее в десятки раз. Зрение и слух у человека много хуже зрения и слуха тех же кошек-собак. И этот список "человеческих слабостей" можно продолжать. Единственное, в чём человек "звезда эстрады" - это мозг, интеллект. И с помощью этого, пожалуй, единственного преимущества всю свою историю Человек пытался усилить свои слабые возможности.



Рычаг и прочие механические приспособления позволили построить Египетские пирамиды и Парижский Нотр-Дам.

Изобретенный Галлилеем телескоп позволил взглянуть на далёкие звёзды, а микроскоп - разглядеть клетки растений.



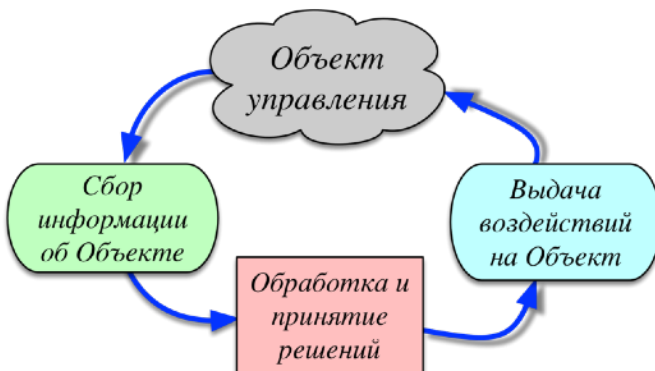
Когда в старости слух у человека становился совсем плох, он пользовался всевозможными слуховыми трубками.

И так далее. Всё это примеры **Усиления** в широком смысле.

Вторую задачу, которую решал Человек, используя свои мыслительные способности и изобретательность, было **Управление**. Вот представьте, в середине 19-го века улицы городов стали освещаться масляными и газовыми фонарями. И получила широкое распространение профессия фонарщик. Что входило в его обязанности? Вечером, когда солнце садилось, надо было фонари зажечь, а утром - наоборот - погасить. Если формализовать задачу фонарщика, то можно сказать так: фонарщик весь день наблюдает за естественной освещенностью доверенной ему улицы. Когда он понимает, что стало темно, то он зажигает фонари. И дальше продолжает наблюдать, чтобы утром фонари погасить. Типичная задача управления. И таких задач управления Человек решал множество.



В общем случае схему управления можно представить так:



Но человек-фонарщик не очень надёжен: он хочет есть, он болеет, его надо менять и т.п. А нельзя ли вместо человека придумать какой-нибудь механизм? Вооот, мы уже задумываемся как нам автоматизировать работу фонарщика. Автоматизировать - это значит убрать человека из схемы управления.

А ещё мой любимый пример из области примитивного управления: водопроводный кран - простейшая вещь в нашем быту. Когда мы видим, что ванна наполнилась, мы закрываем кран. То есть мы малой силой руки перекрываем напор воды водопровода давлением в 2 атмосферы. Но водопроводный кран "умеет" не только перекрывать воду, он "умеет" ещё делать струю воды сильнее или послабее. В этом реализуется один из принципов управления: малым воздействием управлять большим.

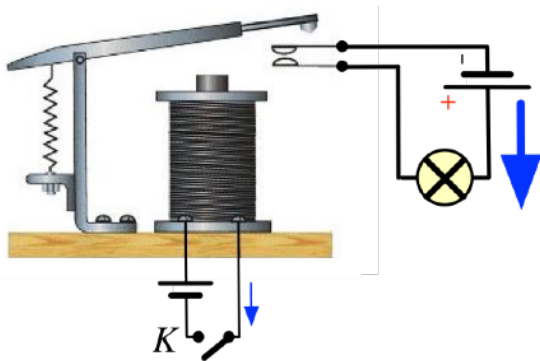


С развитием электротехники произошла революция в Усилении и Управлении в широком смысле. Поговорим об этом.

## ➔ Приборы для Усиления и Управления

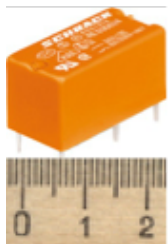
Про электродвигатели и электромагниты, резко усилившие физические возможности Человека, я здесь говорить не буду. Будем говорить об электронике.

### ■ Электромагнитное реле



Идея электромагнитного реле заключается в следующем: когда на схеме замыкается ключ **K**, то по виткам катушки течёт ток, и катушка превращается в электромагнит. Электромагнит притягивает подпружиненный рычаг, который, притягиваясь, замыкает контакты другой цепи. В другой цепи идёт ток. Ключом **K** может быть как обычный ключ, так и появляющееся в цепи ключа напряжение, приводящее к срабатыванию электромагнита. То есть поведением одной цепи мы можем управлять включением/отключением другой цепи. При этом небольшие токи в цепи ключа приводят к переключению больших токов во внешней цепи.

Электромагнитные реле много применялись во всевозможных схемах автоматики в 20-м веке. Основной их недостаток - короткий срок службы. Общий принцип приборостроения таков: приборы, в которых есть подвижные механические части, долговечными быть не могут. Количество циклов включения-выключения у современных реле составляет порядка 100.000 циклов. Зачастую это очень мало. Да и время срабатывания (порядка 5 миллисекунд) во многих случаях слишком велико. Сегодня реле применяются в системах для включения/выключения больших токов.



Современное  
миниатюрное реле

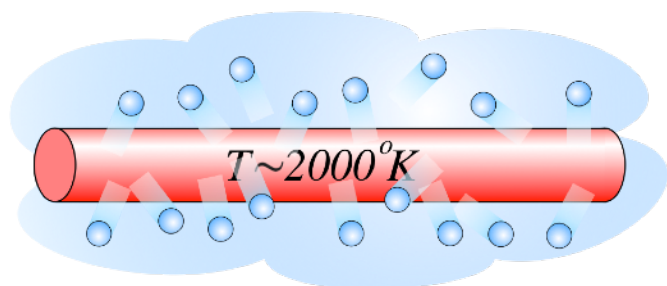
С появлением полупроводниковых транзисторов электромагнитные реле были вытеснены из автоматики.

### ■ Электровакуумные лампы

Появление электровакуумных ламп в первой половине 20-го века позволило решать задачи Усиления и Управления на новом качественном уровне. В основе действия всех электровакуумных приборов лежит *эффект термоэлектронной эмиссии*.

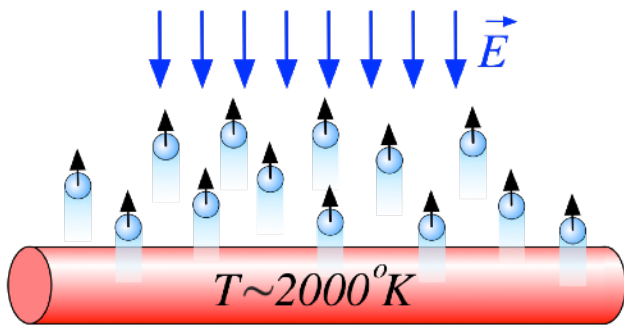
В Истории про Магнетизм мы говорили о том, что электроны в проводнике хоть и называются свободными, но их свобода ограничивается перемещением **внутри** проводника. Чтобы вырвать электрон из проводника, ему нужно сообщить определенную энергию, называемую **работа выхода**. Энергию электрону можно сообщить, например, нагрев проводник.

*Термоэлектронная эмиссия - это испускание электронов нагретым проводником.*



При комнатной температуре тепловой энергии электронов не хватает для того, чтобы покинуть тело проводника. Термоэлектронная эмиссия ощутимо проявляется при температуре проводника выше  $2000^{\circ}K$ . А это значит, что на роль такого проводника подходят металлы с высокой температурой плавления. Медь (температура плавления

$\sim 1350^{\circ}K$ ) не подходит, а вольфрам (самый тугоплавкий из металлов - температура плавления  $\sim 3695^{\circ}K$ ) подходит.



Электроны эмиссии образуют электронное облако вокруг проводника.

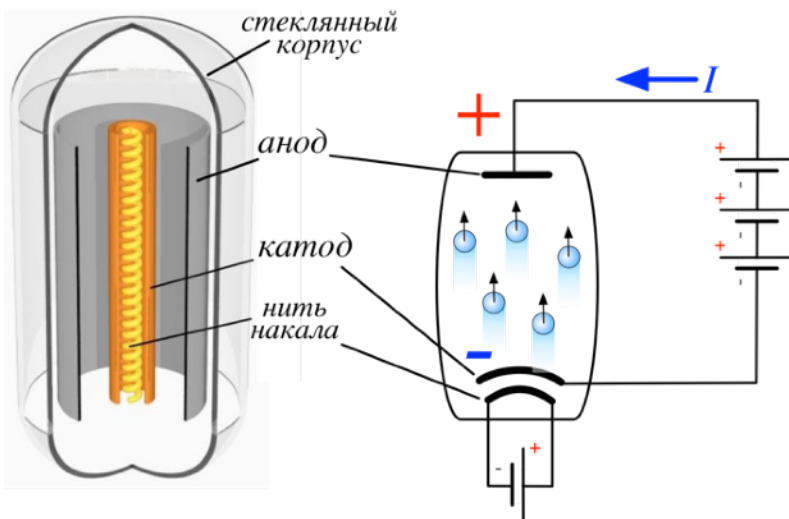
А если нагретый проводник поместить во внешнее электростатическое поле, то электроны эмиссии помчатся по силовым линиям поля.

Электривакуумные лампы заключены в стеклянный или керамический корпус, из которого откачивается воздух (остаточное давление составляет порядка одной миллионной атмосферы). Воздух откачивают по двум причинам: чтобы его молекулы не мешали свободному пролёту электронов, для устранения окисления металлических элементов лампы.

Вот на этих принципах и действуют все электривакуумные лампы. Рассмотрим два вида таких ламп: диод и триод.

### ■ Вакуумный диод<sup>15</sup>

Вакуумный диод - это простейшая электривакуумная лампа. У диода два электрода<sup>16</sup> (электроды - это электрические контакты, включающиеся в цепь): *катод - отрицательный электрод* и *анод - положительный электрод*. Вот вид диода и схема его включения.



Катод - это тот самый нагретый проводник (обычно - вольфрамовый), который эмиттирует (испускает) электроны. Катод надо нагревать. Для этого используется отдельная цепь накала. Нить накала - это нагревательный элемент этой цепи. На анод подаётся положительный (относительно катода) потенциал. В результате внутри диода создаётся электростатическое поле. Это поле направляет электроны, вылетевшие с катода, на анод. Между катодом и анодом течёт ток. Этот ток

называется *анодным током*.

Если поменять полярность включения (на анод подавать минус относительно катода), то создаваемое электростатическое поле будет "запирать" электроны катода и ток между катодом и анодом не пойдёт. То есть *диод проводит ток только в одном направлении*.

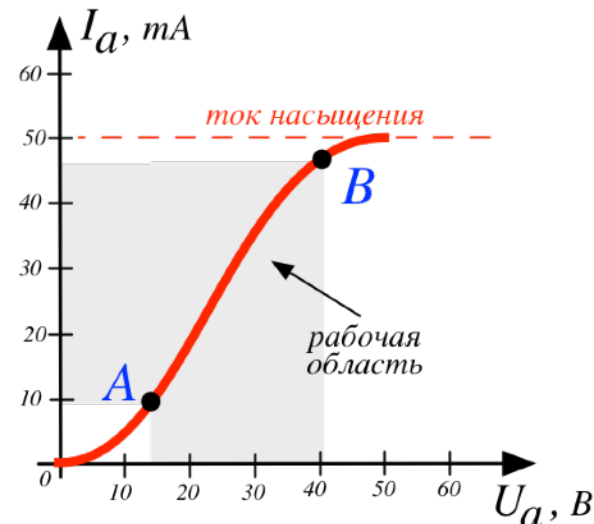
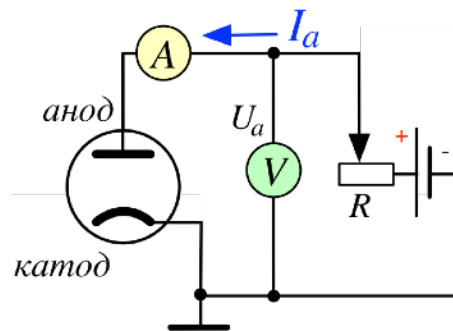
Давайте подробно рассмотрим схему электрического включения диода. Условились принимать потенциал катода за нулевой, так как от катода электроны начинают свое движение. Потенциал любого электрода определяют относительно катода. Цепь накала катода, являющуюся независимой цепью, на схеме рисовать не будем.

<sup>15</sup> Диод - от греческого "ди" - два.

<sup>16</sup> Если не считать ещё один для нагрева катода.

Потенциометром  $R$  будем менять напряжение между анодом и катодом  $U_a$ . Вольтметром это напряжение будем мерять. Амперметром будем мерять анодный ток (ток эмиттированных электронов с катода на анод)  $I_a$ .

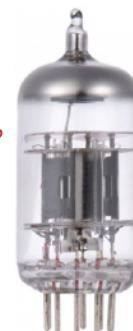
Будем составлять вольт-амперную характеристику (ВАХ) диода. Вот перед вами ВАХ типового вакуумного диода. С первого взгляда видно, что она нелинейна.



По мере роста анодного напряжения всё больше электронов эмиссии будет отрываться от катодного электронного облака и притягиваться анодом. При достаточно большом анодном напряжении все электроны, окружающие катод, будут притянуты, электронное облако "рассосется". Этот момент соответствует точке  $B$  на ВАХ. При таком анодном напряжении все вылетающие из катода электроны будут немедленно притягиваться анодом. Дальнейшее увеличение анодного тока невозможно. Для этого потребовались бы дополнительные электроны, а их взять негде. Вся эмиссия катода, соответствующая данной его температуре, исчерпана. Анодный ток такой величины называется **ТОКОМ НАСЫЩЕНИЯ**. Увеличить

этот ток можно только одним способом - повысить накал катода, но этот способ не применяется, потому что он сокращает срок службы катода. ВАХ вакуумного диода между точками  $A$  и  $B$  - практически линейная - является **рабочей областью** вакуумного диода.

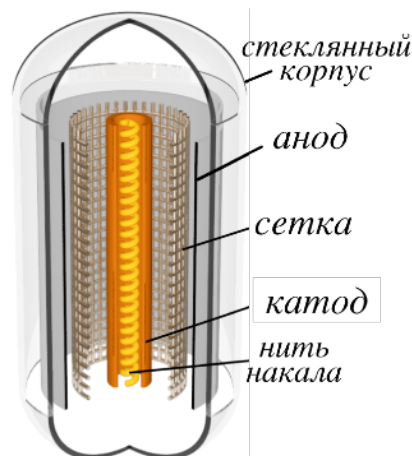
*ВАХ вакуумных ламп нелинейны в целом, но на них всегда можно выделить линейные участки зависимости токов от напряжений. Вот эти диапазоны токов-напряжений, на которых ВАХ линейны, и называют рабочими областями.*



Это всё очень здорово, но как это использовать? Главное достоинство диода - способность проводить ток лишь в одном направлении. И эта способность используется во всевозможных выпрямительных схемах - схемах, преобразующих переменный ток в ток одной полярности. Конкретные схемы мы обсудим в разделе про полупроводниковый диод. Полупроводниковый и вакуумный диоды функционально эквивалентны.

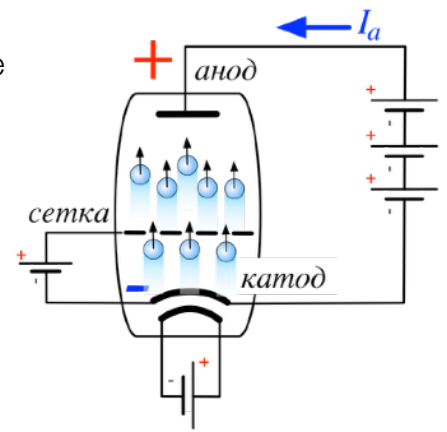
### ■ Вакуумный триод<sup>17</sup>

А давайте в знакомую уже нам конструкцию вакуумного диода добавим одну маленькую штучку - поместим между катодом и анодом (ближе к катоду - это существенно!) металлическую сетку и её электрический контакт выведем наружу (вот он - триод - три электрода). Так эти электроды в триоде и называются: анод, катод и сетка. Включим триод в уже знакомую нам схему, а на сетку подадим небольшой положительный (относительно катода) потенциал.

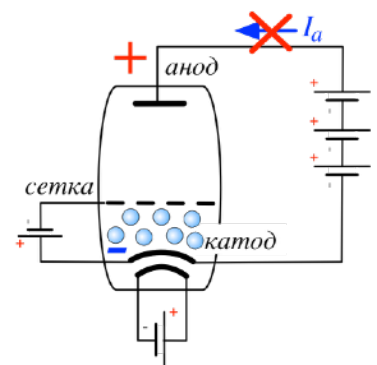


<sup>17</sup> От очень древнегреческого "три" - "три".

Мы помним, что анод (на котором большой положительный потенциал), создаёт внутри электростатическое поле, которое направляет электроны из эмиссионного электронного облака катода на анод, тем самым обеспечивая протекание анодного тока. Сетка с небольшим положительным потенциалом тоже создаёт сонаправленное анодному электростатическое поле, которое помогает вырывать электроны из эмиссионного катодного облака и направлять их на анод. Это понятно. А давайте немного увеличим положительный потенциал сетки (потенциал анода остаётся неизменным). Электростатическое поле сетки увеличится соответственно и станет ещё сильнее "помогать" аноду получать электроны от катода. Анодный ток возрастет. *Анодный ток возрос не от увеличения потенциала на аноде (который мы сохранили неизменным), а от небольшого увеличения потенциала сетки.* Это очень важно! Но потенциал сетки нельзя увеличивать сильно: как только он станет большим, сетка начнет перехватывать у анода электроны и направлять их в свою цепь (пойдёт *сеточный ток*). А до тех пор, пока потенциал сетки небольшой (в определённом рабочем диапазоне), сетка лишь помогает аноду получать электроны.

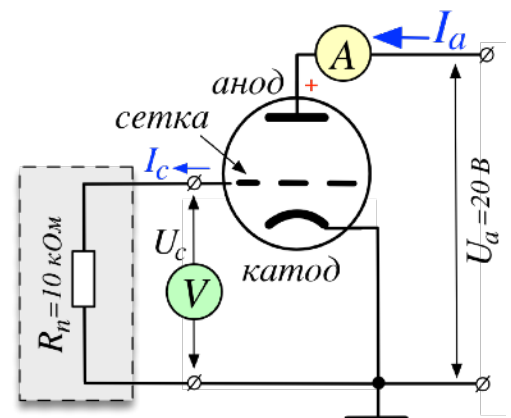


Так, а теперь давайте подадим на сетку отрицательный (относительно катода) потенциал. Сетка, расположенная к катоду близко, создаст встречное анодному электростатическое поле и "запрёт" электроны между собой и катодом. Анодный ток прекратится. При этом мы можем пытаться увеличивать анодное напряжение - анодного тока не будет: сетка держит электроны запертыми. То есть небольшим отрицательным напряжением на сетке мы выключили анодный ток.

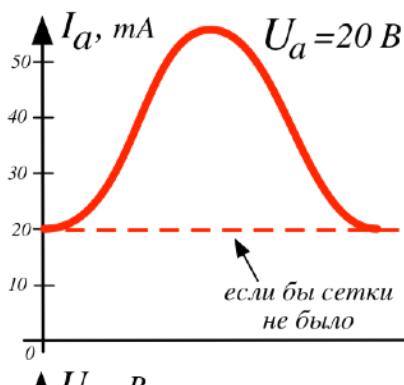


- Как водопроводный кран! - воскликнул вдумчивый ученик. Точно. Прекрасная аналогия. Это - так называемый *режим ключа* триода - включать-выключать токи во внешней цепи. Это и есть основа Управления.

А теперь, понимая как действует сетка, давайте рассмотрим такой опыт. Пусть у нас есть некий электронный блок, который выдает на выходе *сигнал в виде небольшого меняющегося напряжения в диапазоне 0-10 вольт*. Внутреннее сопротивление такого блока  $R_n = 10 \text{ кОм}$  (вполне себе обычное *выходное сопротивление* для электронного блока). На картинке этот блок обозначен серым прямоугольником. Этот выходной сигнал заведен на сетку нашего триода.

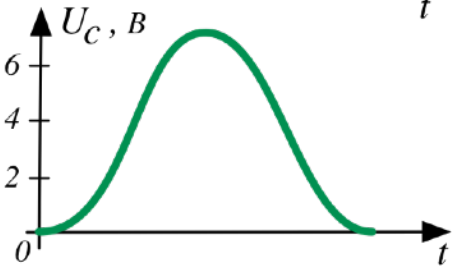


Напомним: работаем в рабочей (линейной) области триода. На аноде триода - постоянное напряжение 20 вольт. Амперметром будем мерять анодный ток  $I_a$ . А на сетке вольтметром будем мерять напряжение входного сигнала нашего электронного блока -  $U_c$ . Поскольку нам известно внутреннее сопротивление блока  $R_n$ , то по закону Ома легко определить и сигнальный ток  $I_c$ .

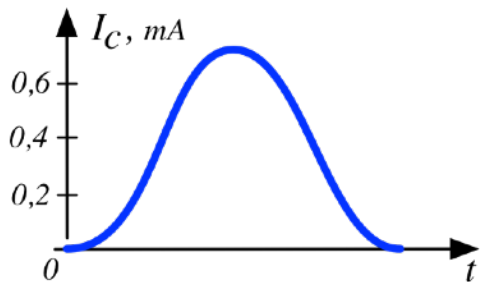


Построим графики. Это не ВАХ. Это графики синхронного изменения во времени  $I_a$  и  $U_c$ . По большому счёту, такие характеристики надо получать с помощью 2-х-канального осциллографа.

Итак, на аноде у нас постоянное напряжение 20 вольт (до анодного тока насыщения ещё далеко). Напряжение на сетке меняется в диапазоне 0-10 вольт. Если бы сетки не было (или на ней был бы нулевой потенциал), то анодный ток был бы постоянен на уровне 20 миллиампер.



Вот напряжение  $U_c$  сигнала с блока начинает расти. Анодный ток  $I_a$  начнёт возрастать тоже, а поскольку все зависимости у нас - линейные, то кривой своего изменения анодный ток  $I_a$  будет повторять кривую изменения  $U_c$ . Обратите внимание: мы не изменяем анодного напряжения. Рост (убывание) анодного тока происходит за счет роста (убывания) напряжения на сетке. Кривая сигнального тока  $I_c$  в точности соответствует кривой напряжения сигнала  $U_c$  (они связаны законом Ома).



Сравним кривые сигнального тока  $I_c$  и анодного тока  $I_a$  (сравнивать надо токи с токами, а напряжения с напряжениями). Формой они совпадают. Максимум,

достигаемый сигнальным током  $I_c$ , равен около 0,8 миллиампер. Максимум, достигаемый анодным током  $I_a$ , равен около 55 миллиампер. Но кривая  $I_a$  на 20 миллиампер поднята за счет постоянного анодного напряжения 20 вольт. Поэтому эффективным максимумом анодного тока  $I_a$  надо считать  $55-20=35$  миллиампер. Из всего этого следует один

замечательный вывод: *триод усилил входной сигнал по току в  $\frac{35}{0,8} \approx 40$  раз!*

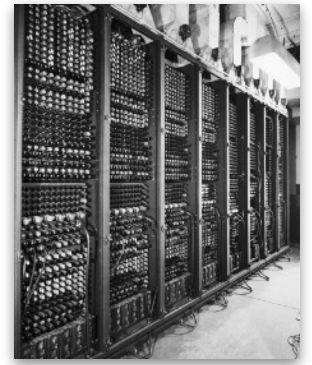
*Итак, триод умеет усиливать сигнал.* Это - его основное замечательное свойство. Как он умеет это делать? Небольшим напряжением, подаваемым на сетку, он управляет большим током в цепи анода. Вот оно: Усиление и Управление в одном лице. А кто сказал, что Управление - это лишь включить/выключить ток в цепи? А если надо сделать свет поярче (дать больший ток в цепь лампочки), когда на небо набежала тучка? Усиление и Управление - братья, которые зачастую работают вместе. И триод - их материальное воплощение.

После того, как в 1906 году был изобретен триод и стали понятны его возможности, настало время бурного развития ламповой электроники. Появились новые виды ламп (тетрод, пентод и пр.). Все они использовали те же принципы, о которых мы говорили выше. Расширился диапазон рабочих токов-напряжений. Совершенствовались электрические схемы применения радиоламп в самых разнообразных устройствах: приемники-передатчики-усилители радиосигналов, устройства самого разнообразного управления.





Да что там говорить, первая электронно-вычислительная машина, созданная в 1945 году в США (называлась ENIAC), была построена на вакуумных лампах. В ней использовалось 17500 ламп шестнадцати различных типов, 1500 реле. Весил ENIAC 30 тонн и потреблял 175 кВт мощности. Его тактовая частота - 100 кГц. Если грубо сравнивать, то топовый микропроцессор Intel Core i9 (весит 26 грамм, размер 4x4x0,5 см, потребляемая мощность около 100 Вт) в 700 000 раз производительней ENIAC.



В настоящее время вакуумные триоды практически полностью вытеснены полупроводниковыми транзисторами. Исключение составляют области, где требуется преобразование сигналов с частотой порядка сотен МГц - десятков ГГц большой мощности, а габариты и масса не столь критичны, например, в выходных цепях мощных радиопередатчиков. Мощные радиолампы имеют сравнимый с мощными транзисторами КПД, надёжность их также сравнима, но срок службы значительно меньше. Также на базе ламп все еще делается некоторая часть высококачественной акустической усилительной аппаратуры.



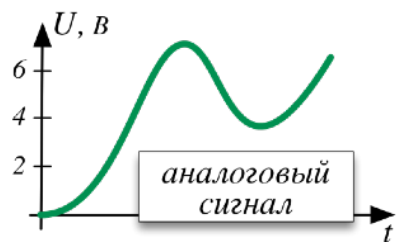
## ➔ Полупроводниковые приборы

Полупроводниковые приборы - это всё то, чем набиты ваши мобильные телефоны, планшеты, ноутбуки и пр. (не в смысле рэпа, блюз-рока, а в смысле электроники). Можно сказать, что вся современная электроника на 99% - полупроводниковая (оставшийся процент принадлежит вакуумным лампам). И эти 99% объясняются преимуществами полупроводниковых приборов: малые габариты и вес, долговечность, высокая механическая прочность, малое потребление энергии. Основным полупроводниковым материалом в настоящее время является кремний. Попытаюсь дать классификацию полупроводниковых приборов по выполняемым ими функциям.

Но сначала - маленькое отступление. В электронике различают два вида сигналов (величин): *аналоговые* и *цифровые (дискретные)*.

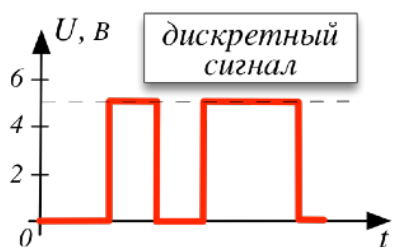


Вот горит у нас в комнате лампочка. А на стене - регулятор её яркости. Если плавно покрутить регулятор, то плавно же изменится яркость лампочки. Крутя регулятор, мы меняем ток, идущий через лампочку. С помощью регулятора нам доступны "все яркости" лампочки. А вот - изменение во времени некоторого напряжения  $U$ . Говорят, что и ток в лампочке, и напряжение  $U$  являются аналоговыми сигналами (величинами) - они могут принимать любые значения из определенного диапазона.

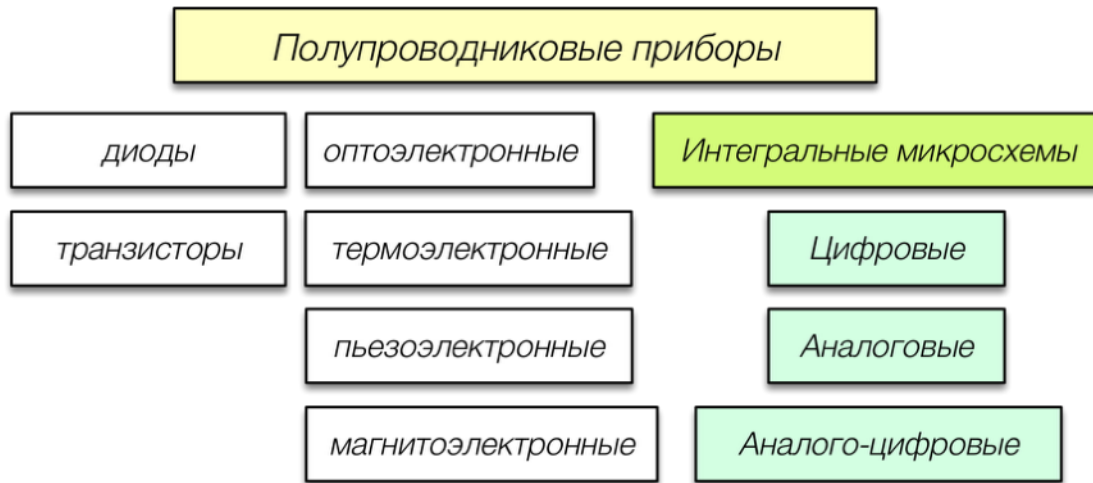


А вот у нас другой сигнал - напряжение  $U$ , которое может принимать только два значения 0 вольт и 5 вольт (уж так оно устроено). А в других случаях может другие два: 0 вольт и 3,3 вольт - абсолютная величина не столь важна. Можно в общем случае сказать: высокое и низкое.

Говорят, что такое напряжение  $U$  представляет дискретный (цифровой) сигнал. Не очень понятно для чего так? А вот для чего. Вся вычислительная техника, да и вся цифровая обработка информации основана на двоичном её представлении. В виде "логический ноль" и "логическая единица". "Логический ноль" - это 0 вольт напряжения  $U$  ("нет сигнала"), "логическая единица" - это 5 вольт напряжения  $U$  ("есть сигнал").



А теперь - классификация<sup>18</sup>.



- О диодах и транзисторах будем подробно говорить ниже.
- Оптоэлектронные приборы преобразуют световые сигналы в электрические и наоборот (фотодиод, фоторезистор, светодиод, полупроводниковый лазер).
- Термоэлектронные приборы преобразуют тепловую энергию в электрическую и наоборот (терморезистор, солнечные батареи).
- Магнитоэлектронные приборы - датчики магнитного поля.
- Пьезоэлектронные приборы - датчики механического давления и смещения.

Микросхемы включают в себя не отдельные приборы, а целые функционально законченные устройства.

- Цифровые микросхемы работают с цифровыми сигналами. Компьютеры, мобильные телефоны и другие обработчики цифровой информации собираются из цифровых микросхем: процессоров, схем памяти, сетевых модулей.
- Аналоговые микросхемы работают с аналоговыми сигналами: усилители, генераторы, фильтры.
- Аналого-цифровые микросхемы - это разного рода преобразователи цифровой информации в аналоговую и наоборот.

Технология производства микросхем достигла такого уровня, что, например, в уже упоминавшемся микропроцессоре Intel Core i9 содержится около **3 миллиардов** транзисторов.

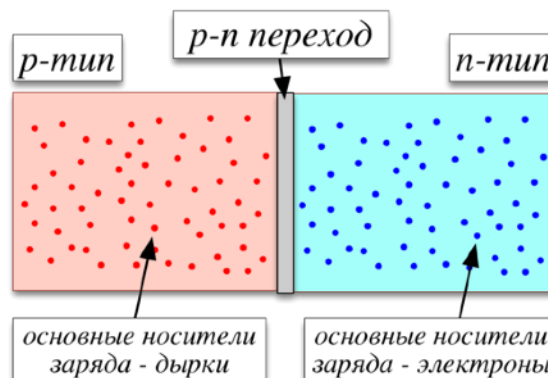


<sup>18</sup> Как и любая классификация, она условна.

## ■ Полупроводниковый диод

Напомню:

- дырка - незаполненная валентная связь, которая проявляет себя как положительный заряд<sup>19</sup>, численно равный заряду электрона. Дырка - это воображаемая частица. Дырка - это отсутствие электрона;
- рекомбинация электрона с дыркой - свободный электрон восстанавливает валентную связь между атомами на месте дырки *и перестаёт быть свободным* (и из учета свободных носителей уходит);
- у полупроводника *n-типа* концентрация свободных электронов сильно превосходит концентрацию дырок (*электронная проводимость*);
- у полупроводника *p-типа* концентрация дырок сильно превосходит концентрацию свободных электронов (*дырочная проводимость*).
- *p-n переход* - это область соприкосновения двух полупроводников с разными типами проводимости: электронной (*n-типа*) и дырочной (*p-типа*).

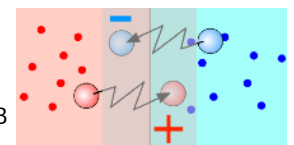


Говоря о полупроводниках *n-типа* и *p-типа*, мы сравниваем их по концентрациям **только свободных** носителей заряда (электронов и дырок). *В целом же общий заряд и полупроводников n-типа, и полупроводников p-типа равен нулю.*

### *p-n переход в состоянии покоя*

Давайте рассмотрим что происходит в *p-n*-переходе при отсутствии внешних полей. И электроны и дырки находятся в состоянии хаотического теплового движения. В результате этого наблюдается *диффузия* (взаимопроникновение) основных носителей зарядов из одной области в другую.

В результате этого одна из дырок из *p*-области может попасть в *n*-область, где быстро рекомбинирует с одним из электронов. В итоге в приграничной *n*-области появится избыточный положительный заряд, а в приграничной *p*-области - избыточный отрицательный заряд.

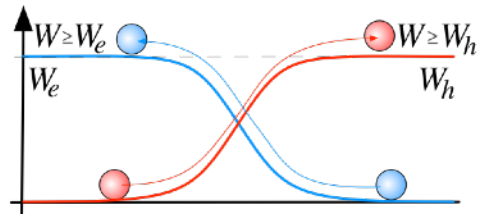
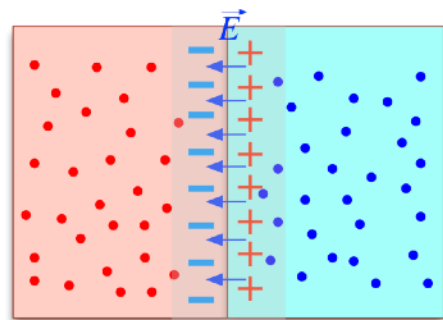


Аналогично, один из электронов из *n*-области может попасть в *p*-область, где быстро рекомбинирует с одной из дырок. В результате этого в *n*-области также появится избыточный положительный заряд, а в *p*-области - избыточный отрицательный заряд. Таким образом, через достаточно короткий промежуток времени с обеих сторон поверхности раздела образуются противоположные по знаку *пространственные заряды*.

Появление этих зарядов приведет к появлению электрического поля в *p-n*-переходе. Это поле будет отталкивать дырки от *p-n*-перехода обратно в *p*-область, а электроны - обратно в *n*-область. То есть электрическое поле будет препятствовать процессу диффузии. Установится динамическое равновесие.

<sup>19</sup> Дырка проявляет себя как положительный заряд, но она не несёт на себе заряд. Это важно помнить.

С электрическим полем можно связать потенциальную энергию  $W$  дырки и электрона. Получается, что дырка для перехода из  $p$ -области в  $n$ -область должна "забраться" на потенциальный порог высоты  $W_h$ . На аналогичный порог  $W_e$  должен "забраться" электрон для перехода из  $n$ -области в  $p$ -область. Возник, как говорят физики, **потенциальный барьер**. Преодолевать этот барьер могут электроны и дырки, имеющие энергию больше высоты барьера.



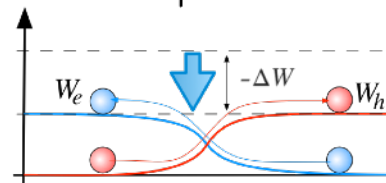
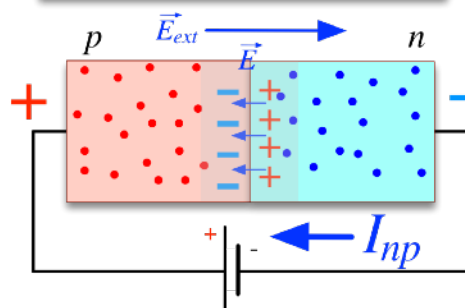
А теперь давайте попробуем включить наш полупроводник с  $p$ - $n$ -переходом в электрическую цепь. С точки зрения полярности включения у нас есть только два варианта.

### Прямое включение $p$ - $n$ перехода

Подключим к  $n$ -области отрицательный полюс источника, а к  $p$ -области - положительный (высокий потенциал - к  $p$ -области; низкий - к  $n$ -области). Такое подключение называется **прямым включением  $p$ - $n$ -перехода**.

В полупроводнике возникает внешнее электрическое поле  $E_{ext}$ . Оно уменьшает существующее в  $p$ - $n$ -переходе поле пространственных зарядов и опускает энергетический порог перехода электронов в  $p$ -область и дырок в  $n$ -область. Свободные электроны мчатся в  $p$ -область, а дырки - в  $n$ -область. В результате через полупроводник течет ток, называемый **прямым током**. Это ток основных носителей. Напомню: в  $n$ -области основные носители (заряда) - электроны, в  $p$ -области - дырки. Но есть ещё и **неосновные** носители (с малой концентрацией в соответствующей области): в  $n$ -области неосновные - это дырки, в  $p$ -области - электроны.

### прямое включение



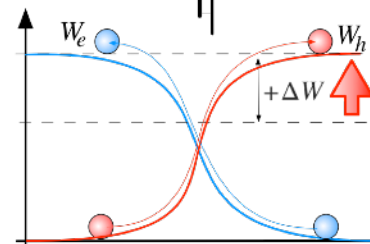
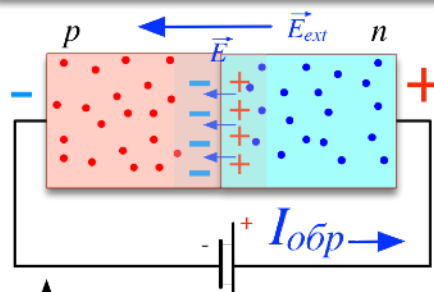
### Обратное включение $p$ - $n$ перехода

А теперь поменяем полярность включения  $p$ - $n$ -перехода. Такое включение называется **обратным включением  $p$ - $n$ -перехода**.

Внешнее электрическое поле  $E_{ext}$  сонаправлено с внутренним полем пространственных зарядов и поднимает энергетический порог перехода электронов в  $p$ -область и дырок в  $n$ -область.

Прямого тока не будет - внешнее электрическое поле не позволяет основным носителям течь. Но проявится малый ток неосновных носителей - обратный ток (в десятки тысяч раз меньший обратного).

### обратное включение



## Пробой $p-n$ перехода

При больших напряжениях при обратном включении возникает явление **пробоя  $p-n$ -перехода**: неосновные носители заряда ускоряются большим обратным напряжением и приобретают значительную энергию, которой хватает, чтобы столкнувшись с атомами кристаллической решетки, оторвать валентные электроны. Эти электроны, уходя со своего места, создают дырки. И вновь созданные носители снова ускоряются полем и также отрывают другие электроны. Процесс происходит лавинообразно - отсюда и название - **лавинный пробой**. Лавинный пробой не разрушает  $p-n$ -переход и при снятии большого обратного напряжения он восстанавливается.

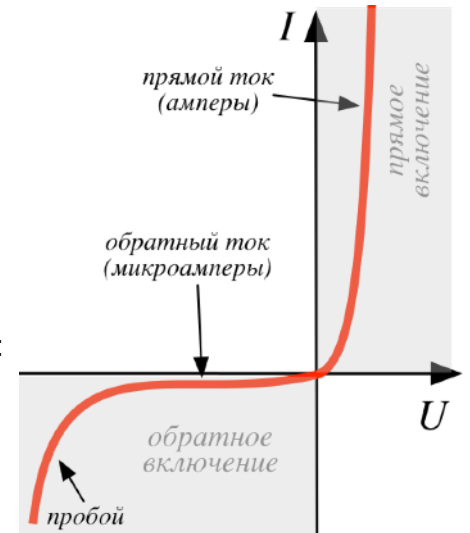
## ВАХ $p-n$ перехода

Перед вами типовая вольт-амперная характеристика  $p-n$ -перехода. Она отражает все режимы его включения. Очевидно, что она нелинейна.

Из всего вышесказанного следует одна замечательная вещь:



**$p-n$ -переход прекрасно проводит ток при прямом включении и практически его не проводит при обратном включении.**

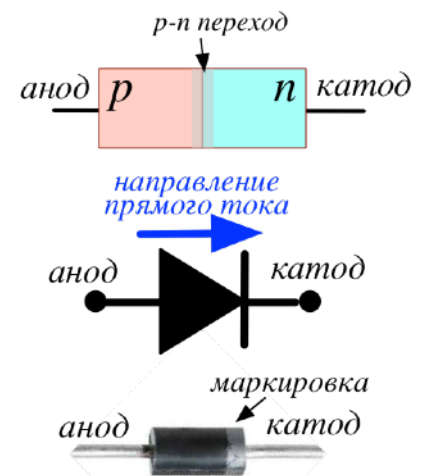


Так что же такое - полупроводниковый диод? **Полупроводниковый диод** - самый простой полупроводниковый прибор, состоящий из одного  $p-n$ -перехода. Основная его функция - проводить электрический ток в одном направлении, и не пропускать его в обратном. Эту функцию "туда - пущать, обратно - не пущать" мы уже встречали у лампового диода.

На рисунке приведена схема устройства, обозначение в электротехнике и маркировка выводов полупроводниковых диодов.

Вот список характеристик реальных полупроводниковых диодов:

- максимальный прямой ток;
- максимальное прямое напряжение;
- обратный ток;
- напряжение пробоя при обратном включении;
- паразитная ёмкость  $p-n$ -перехода;
- скорость переключения.



При превышении значений максимального прямого тока на полупроводниковых диодах может выделиться такое количество тепла, что оно разрушит  $p-n$ -переход - диод сгорит. Поэтому в схемотехнике обычно последовательно с диодом включают токоограничивающий резистор.

ВАХ реальных полупроводниковых диодов та же, что и ВАХ  $p-n$ -перехода.

По своим параметрам реальные диоды можно разделить на группы:

- диоды выпрямительные;
- диоды высоковольтные (с большим прямым и обратным напряжением);
- диоды силовые (с большим прямым током);
- диоды быстродействующие и СВЧ (с малым временем переключения);
- диоды Шоттки, варикапы, стабилитроны, туннельные и пр.

В школьных задачах применяется модель идеального диода.

**Идеальный диод** - это идеализация реального диода, при которой учитываются только его основные свойства, а побочные эффекты игнорируются.

ВАХ идеального диода представляется вот так  $\Rightarrow$

При прямом включении прямой ток неограничен и напряжение на диоде равно нулю. При обратном включении обратный ток равен нулю и при любом обратном напряжении пробоя не возникает.

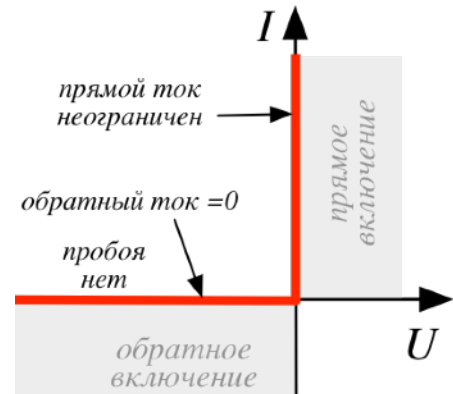
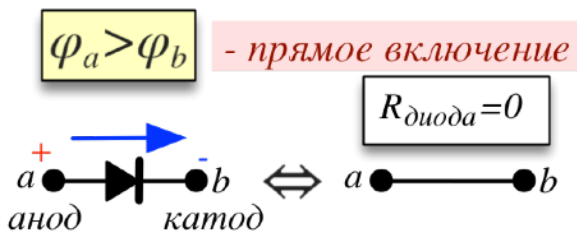
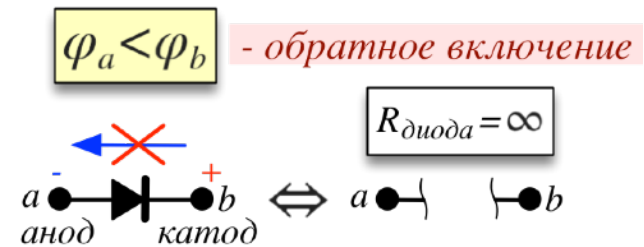


Рисунок поясняет случаи прямого и обратного включения идеального диода.

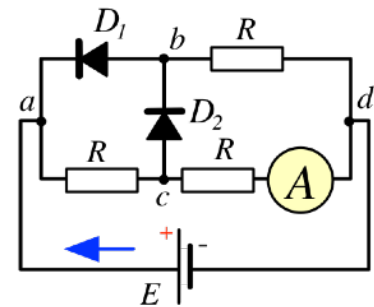
При прямом включении ( $\varphi_a > \varphi_b$ ) любой ток от точки  $a$  к точке  $b$  протекает беспрепятственно (электрическое сопротивление диода равно нулю). Точки  $a$  и  $b$  можно замкнуть "накоротко".



При обратном включении ( $\varphi_a < \varphi_b$ ) никакой ток от точки  $a$  к точке  $b$  протекать не может (электрическое сопротивление диода равно бесконечности). Можно считать, что между точками  $a$  и  $b$  - "разрыв цепи".

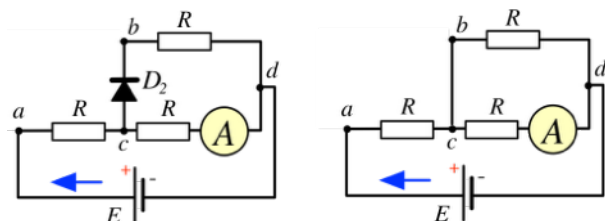


**Пример ЕГЭ-шной задачи на идеальный диод:** Три одинаковых резистора и два одинаковых идеальных диода включены в электрическую цепь, показанную на рисунке, и подключены к аккумулятору в точках  $a$  и  $d$ . Показания амперметра равны 2 Ампера. Определите силу тока через амперметр после смены полярности подключения аккумулятора. Сопротивлением амперметра и внутренним сопротивлением аккумулятора пренебречь.



**Решение:** Смотрим на нашу схему. В ней всего один источник ЭДС. Смотрим на потенциалы точек в схеме. Потенциал точки  $a$  - самый высокий - эта точка подключена к плюсу аккумулятора, потенциал точки  $d$  - самый низкий - эта точка подключена к минусу аккумулятора. Поэтому  $\varphi_a \geq \varphi_b$  и мы имеем обратное включение диода  $D_1$  - значит диод  $D_1$  можно "выкинуть", а точки  $a$  и  $b$  можно разъединить.

Из аналогичных соображений следует, что  $\varphi_c \geq \varphi_b$  и мы имеем прямое включение диода  $D_2$ . Поэтому точки  $c$  и  $b$  можно соединить. Получили полностью эквивалентную схему. Зная ток через амперметр, легко найти связку общего тока,



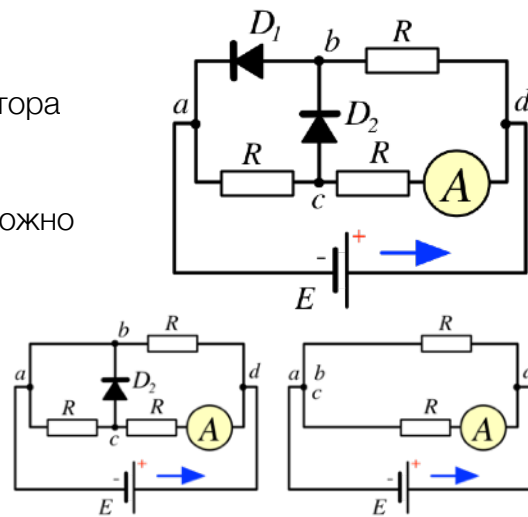
величины ЭДС и сопротивления  $R$ .

Меняем полярность аккумулятора. Ток в цепи аккумулятора потечёт в другую сторону. Поэтому  $\varphi_d > \varphi_b \geq \varphi_a$ .

Следовательно диод  $D_1$  включен **прямо** и точки  $a$  и  $b$  можно соединить.

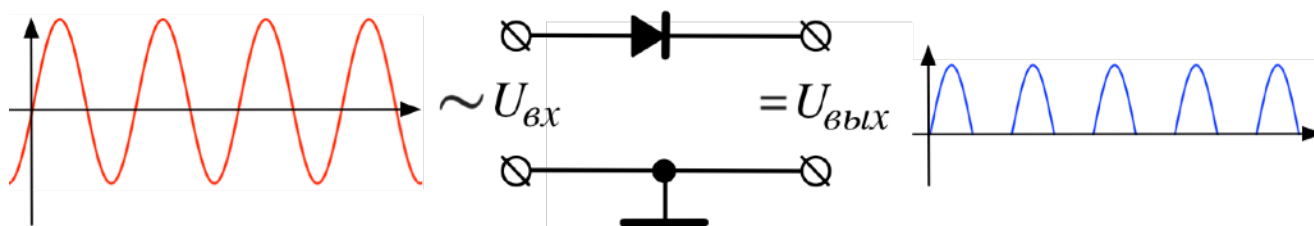
Но поскольку  $\varphi_d > \varphi_a$ , то и диод  $D_2$  тоже включен **прямо** и точки  $a, b, c$  можно соединить.

Эквивалентную схему легко посчитать и найти всё, что нужно.



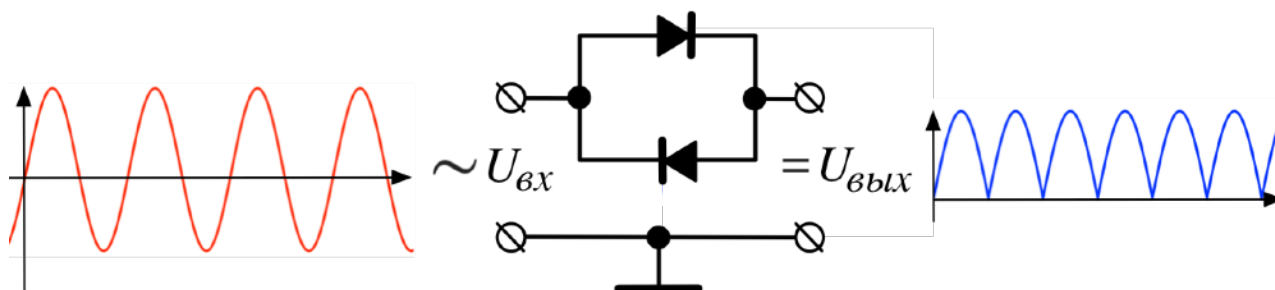
### ■ Применение диодов

Применение диодов основано на их главном свойстве - проводить электрический ток в одном направлении. Это - выпрямительное свойство - преобразовывать двуполярный переменный сигнал в однополярный. Вот самый простой пример применения диода:



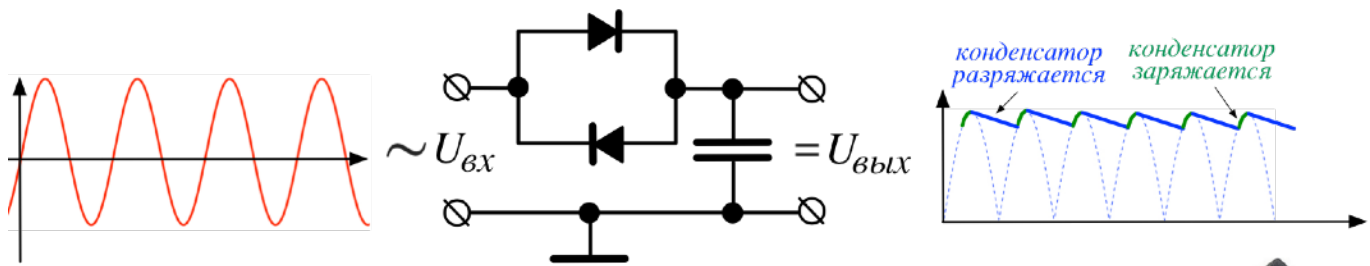
На входе - переменный двуполярный сигнал - нам он представлен во временном графике изменения напряжения. Это может быть синусоида переменного напряжения нашей бытовой сети, это может быть любой переменный сигнал (от радиоприёмника, например). Диод пропускает только "положительные полуволны" такой синусоиды. Может быть для каких-либо применений этого вполне достаточно, но для выпрямления бытового переменного напряжения явно недостаточно: "отрицательные полуволны" не используются - половина энергии пропадает.

Вот схема, учитывающая этот недостаток. Один диод пропускает "положительные полуволны", другой - "отрицательные полуволны". Но выпрямленное выходное напряжение уж больно непостоянно. Его надо "сгладить", или "отфильтровать", или "стабилизировать"

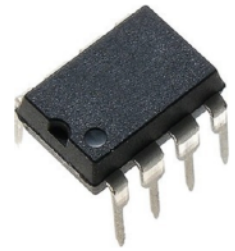


по-научному. Добавляем конденсатор на выходе и становится почти здорово. Конденсатор своими циклами заряда-разряда в такт меняющемуся напряжению выполняет роль такого фильтра-стабилизатора.

И схем выпрямителей со стабилизацией выходного напряжения существует великое множество. Диоды в них играют ключевую роль. Более того, существуют готовые



микросхемы-преобразователи переменного тока в постоянный (их называют AC-DC преобразователи), включающие в себя как выпрямительную, так и стабилизаторную части.



## ■ Светодиод

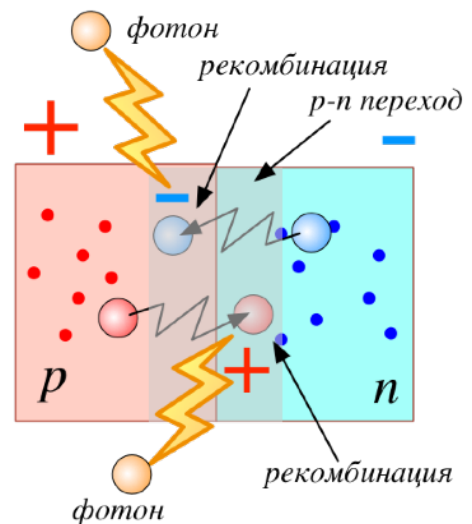
Светодиод - это полупроводниковый диод, излучающий свет (ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный) при прямом включении. При пропускании электрического тока через *p-n*-переход в прямом направлении основные носители заряда - электроны и дырки - рекомбинируют с излучением фотонов.



Излучаемый светодиодом свет лежит в узком диапазоне спектра и во многом зависит от химического состава используемых полупроводников. Используются полупроводники на основе арсенида галлия (кремниевые полупроводники практически не излучают).



Типовая схема включения светодиода довольно проста. Величина токоограничивающего резистора рассчитывается, исходя из параметров конкретного светодиода и составляет обычно порядка 500 Ом.

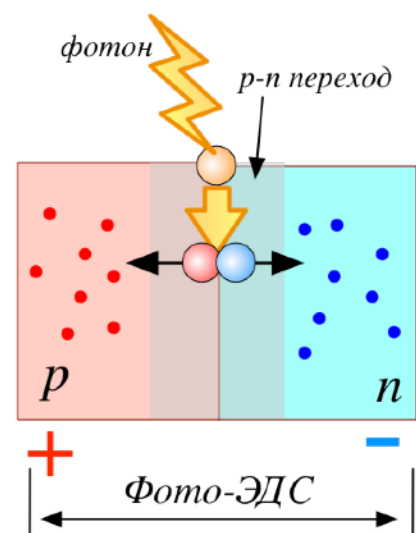


## ■ Фотодиод

Простейший фотодиод - это обычный полупроводниковый диод, в котором обеспечивается возможность воздействия оптического излучения на *p-n*-переход.



Рассматриваем ситуацию, когда фотодиод не подключен к напряжению (находится в состоянии покоя). При воздействии излучения (фотонов) в *p-n*-переходе возникают электронно-дырочные пары. В результате диффузии дырки заряжают *p*-область положительно, а электроны *n*-область отрицательно. Возникающая разность потенциалов называется фото-ЭДС. **Генерируемый ток в фотодиоде - обратный**, он направлен от катода к аноду, причем его величина тем больше, чем больше освещенность.

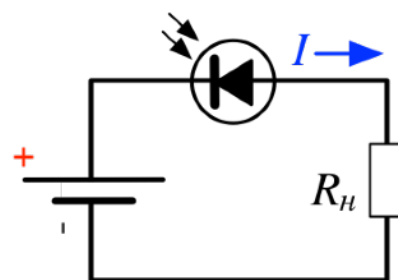


Фотодиоды могут работать в одном из двух режимов - режиме фотогенератора, либо в режиме фотопреобразователя.



*Фотодиоды в режиме фотогенератора* применяют в качестве источников питания, преобразующих энергию солнечного излучения в электрическую. Они входят в состав солнечных батарей.

*Фотодиоды в режиме фотопреобразователя* (с внешним источником электрической энергии) выполняют функцию фотореле. Поскольку генерируемый ток в фотодиоде - обратный, то фотодиод включается в цепь в обратном направлении относительно источника ЭДС. При увеличении освещенности обратный ток в фотодиоде возрастает и ток от источника ЭДС поступает на нагрузку. При уменьшении освещенности обратный ток падает и фотодиод запирается - ток от источника ЭДС на нагрузку не идет.



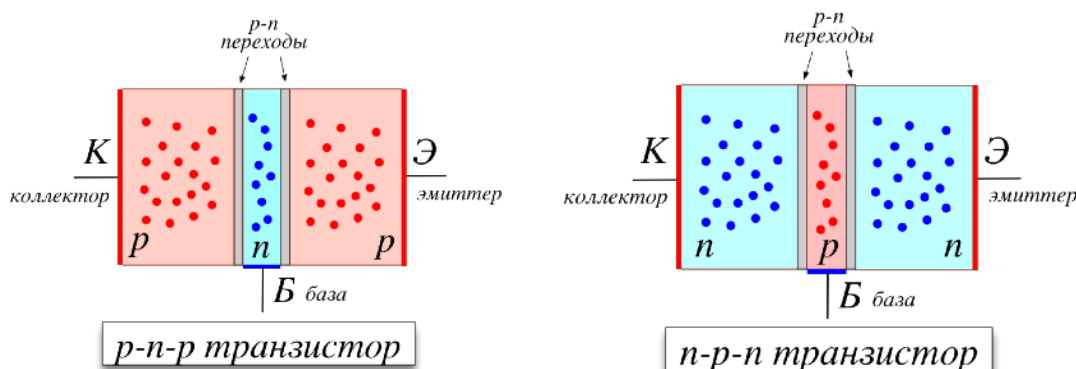
## ■ Транзистор

Транзистор - полупроводниковый прибор с двумя *p-n*-переходами, в котором ток в цепи двух электродов управляется третьим электродом.

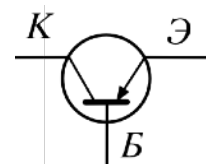
Транзисторы подразделяются на *биполярные* и *полевые*. Общим для них является наличие *p-n*-переходов. Основная область применения любых транзисторов - усиление слабого сигнала за счет дополнительного источника питания. Биполярные используются в основном в аналоговой технике, а полевые - в цифровой.

Мы будем говорить о *биполярных транзисторах*. В биполярном транзисторе используются оба типа носителей - основные и неосновные, поэтому его называют биполярным.

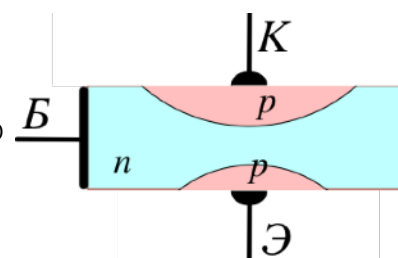
Биполярный транзистор состоит из трех областей полупроводника с разными типами проводимости и двух *p-n*-переходов. Возможны два их вида: *p-n-p* и *n-p-n* биполярные транзисторы.



Мы будем говорить о *p-n-p транзисторах*. У биполярных транзисторов три электрода: эмиттер ("излучатель"), коллектор ("собиратель") и база. На схемах биполярный *p-n-p* транзистор изображается вот так ⇒



Реальную конструкцию *p-n-p* транзистора можно представить вот так. Обычно область коллектора шире, чем эмиттера. Базу изготавливают из слаболегированного полупроводника (из-за чего она имеет большое сопротивление) и делают *очень тонкой*. Поскольку площадь контакта эмиттер-база получается значительно меньше площади контакта база-коллектор, то поменять эмиттер и коллектор местами с помощью смены полярности подключения нельзя. Таким образом, транзистор относится к несимметричным устройствам.



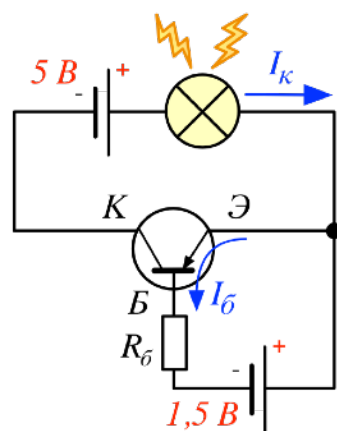
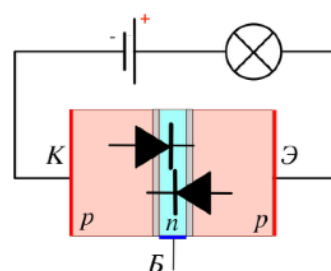
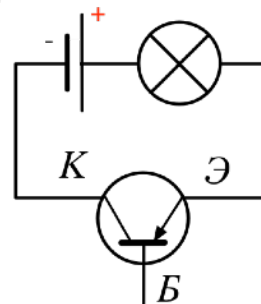
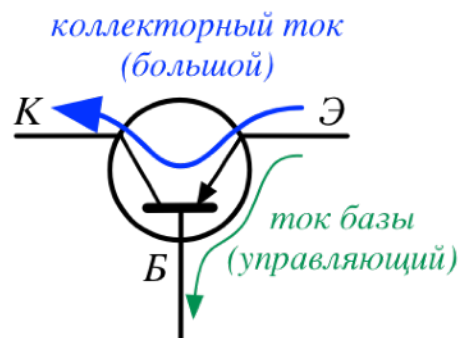
Основная идея работы транзистора заключается в следующем: между эмиттером и коллектором течет сильный ток (ток коллектора), а между эмиттером и базой - слабый управляющий ток (ток базы). Ток коллектора будет меняться в зависимости от изменения тока базы. Ниже мы поймем почему.

А ведь мы уже встречали подобную схему. В вакуумном триоде: малое изменение напряжения на сетке триода резко увеличивало (уменьшало) анодный ток.

### Режим ключа р-п-р транзистора

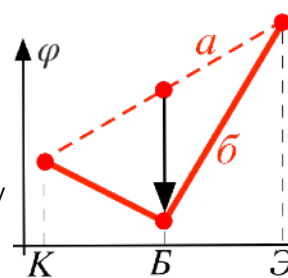
Между коллектором и эмиттером транзистора включим источник питания и лампочку. Базу транзистора оставим неподключенной. Лампа не горит. Почему?

На эмиттере будет самый высокий потенциал (потенциал плюса источника питания), на коллекторе - самый низкий (потенциал минуса источника питания). Электрическое поле в полупроводнике будет направлено от эмиттера к коллектору. Потенциал области базы будет ниже потенциала эмиттера и выше потенциала коллектора. Поэтому р-п-переход эмиттер-база будет включен в прямом направлении, а р-п-переход коллектор-база будет включен в обратном направлении. Поэтому ток эмиттер-коллектор не пойдет. Чтобы ток шёл, оба р-п-перехода должны быть открыты.

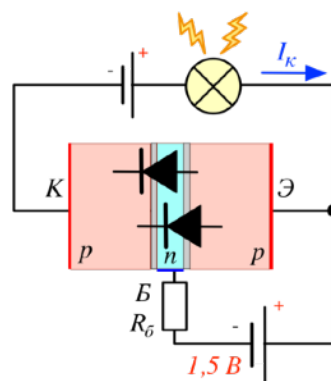


Немного усложним схему. Добавим ещё один источник питания в 1,5 вольта и соединим его минус через резистор  $R_b$  с базой, а плюс - с эмиттером. Сам же основной источник питания возьмём в 5 вольт (тут конкретные цифры напряжений-сопротивлений имеют своё значение). Подключаем - лампочка горит! Здорово! Давайте разбираться почему.

Вот график изменения потенциала от коллектора к эмиттеру. Линия *а* (пунктирная) соответствовала нашему предыдущему включению. Потенциал от коллектора к эмиттеру

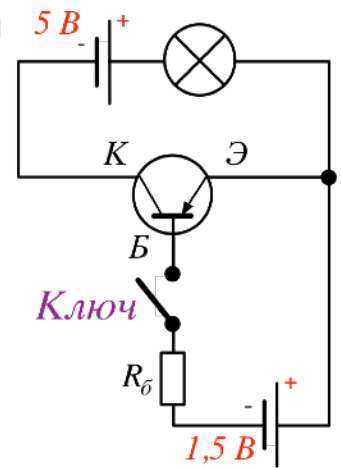


плавно повышался, при этом потенциал базы был ниже потенциала эмиттера и выше потенциала коллектора. А в нашей новой схеме подключения **мы опустили потенциал базы ниже потенциала коллектора** (ниже потенциала эмиттера он был и раньше) - линия *б*. Это позволил сделать второй источник питания, включенный "навстречу" основному. И тем самым мы открыли р-п-переход коллектор-база - оба р-п-перехода стали открыты. Ток пошёл - лампочка загорелась.



Важно заметить следующее: напряжение источника питания, соединяемого с базой, должно быть меньше напряжения питания основного источника; резистор  $R_b$  ограничивает ток в базовой цепи (иначе большой ток в базе может разрушить р-п-переход). Ток эмиттер-база составляет порядка 2 миллиампер, в то время как коллекторный ток - порядка 80 миллиампер. То есть малым током базы мы включили большой ток коллектора.

И что из всего этого следует? А следует то, что с помощью вот такой схемы ( $\Rightarrow$ ) с помощью **Ключа** мы можем малым током включать и выключать большие токи в силовой цепи. Это и есть **режим ключа транзистора**. Мы подобное встречали, когда говорили о вакуумном триоде. В качестве **Ключа** может выступать какой-либо управляющий сигнал. Такой режим работы транзистора используют в приборах и устройствах автоматики.

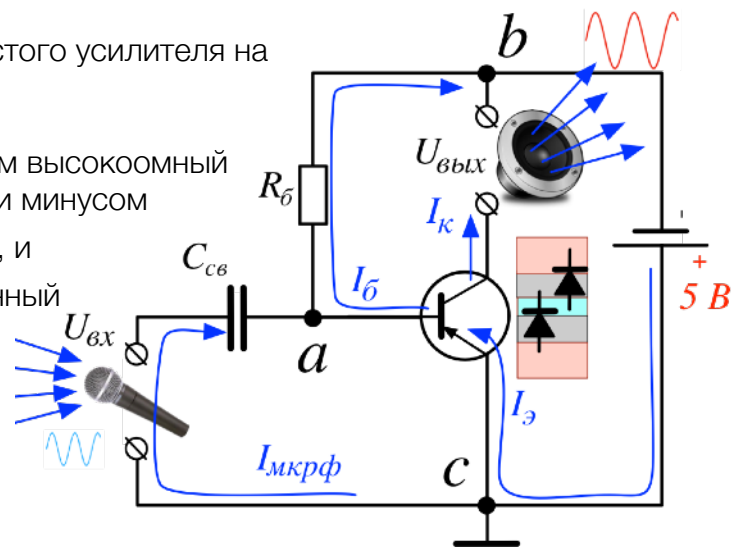


### Режим усилителя p-n-p транзистора

В режиме усилителя используются малые токи в базовой цепи транзистора, управляющие большими токами в коллекторной цепи. Этим и отличается режим усилителя от режима ключа, который лишь открывает или закрывает транзистор под действием напряжения на базе.

В качестве примера разберем работу простого усилителя на одном транзисторе.

В коллекторную цепь транзистора включим высокоомный электромагнитный динамик, между базой и минусом источника питания установим резистор  $R_b$ , и развязывающий конденсатор  $C_{св}$ , включенный в базовую цепь транзистора. Входной сигнал приходит с микрофона, преобразующего звуковые колебания в переменное напряжение звуковой частоты, которое через конденсатор  $C_{св}$  поступает на базу транзистора.

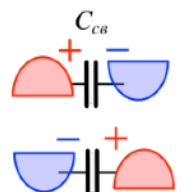


При подаче напряжения питания на базу транзистора через резистор  $R_b$  поступает небольшое отрицательное напряжение  $\sim -0,7$  вольт (для кремниевых транзисторов), называемое **напряжением смещения**. Это напряжение открывает транзистор, и через эмиттерный и коллекторный переходы начинает течь незначительный ток, который как бы переводит усилитель в дежурный режим, из которого он мгновенно выйдет, как только на входе появится входной сигнал.

*Для работы транзистора в режиме усиления на его базу, относительно эмиттера, вместе с напряжением входного сигнала обязательно подается постоянное напряжение смещения, открывающее транзистор. Без него p-n-переход эмиттер-база будет закрыт и, подобно диоду, будет "срезать" положительные полупериоды входного напряжения, отчего усиленный сигнал будет искаженным.*

*В режиме усилителя оба p-n-перехода: эмиттер-база и коллектор-база работают в прямом включении.*

Конденсатор  $C_{св}$  инвертирует (меняет знак на противоположный) напряжение входного сигнала с микрофона. На одной пластине плюс, на другой - минус, так работают все конденсаторы. Он прекрасно пропускает напряжение звуковой частоты, но **преграждает путь постоянному току из базовой цепи к микрофону** (конденсатор ток не пропускает). А так как микрофон имеет свое внутреннее сопротивление (около 1600 Ом), то без этого конденсатора база транзистора через внутреннее сопротивление микрофона была бы соединена с эмиттером по постоянному току. И ни о каком усилении сигнала речи бы быть не могло.



Теперь, если начать говорить в микрофон, то в цепи эмиттер-база возникнут колебания электрического тока микрофона  $I_{\text{мкрф}}$ , которые и будут управлять большим током в коллекторной цепи транзистора. И уже этот усиленный сигнал, преобразованный динамиком в звук, мы и будем слышать.

Сам процесс усиления сигнала можно описать следующим образом. При отсутствии напряжения входного сигнала  $U_{\text{вх}}$ , в цепях базы и коллектора текут небольшие токи (прямые участки графиков а, б, в), определяемые напряжением источника питания, напряжением смещения на базе и усилительными свойствами транзистора.

Как только в цепи базы появляется входной сигнал, то соответственно ему начинают изменяться и токи в цепях транзистора. Во время отрицательных полупериодов входного сигнала, когда отрицательное входное  $U_{\text{вх}}$  и напряжение источника питания суммируются на базе - токи цепей увеличиваются. Во время же положительных полупериодов, отрицательное напряжение на базе уменьшается и, соответственно, токи в обеих цепях также уменьшаются.

На рисунке показана зависимость тока коллектора от тока базы. Обратите внимание, ток коллектора - в миллиамперах, ток базы - в микроамперах.

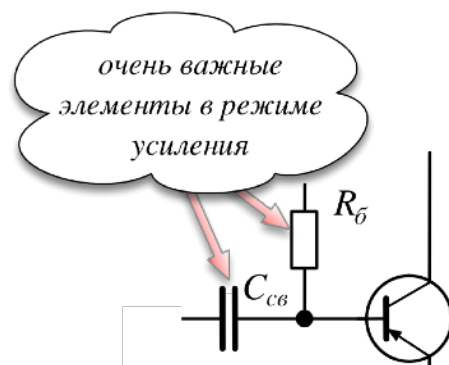
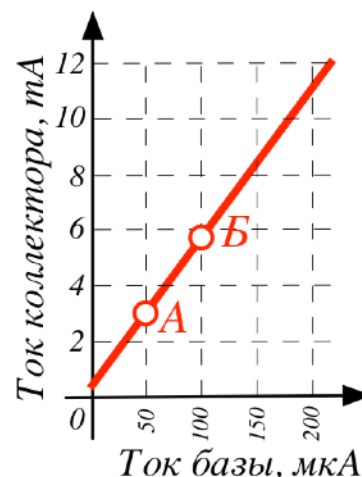
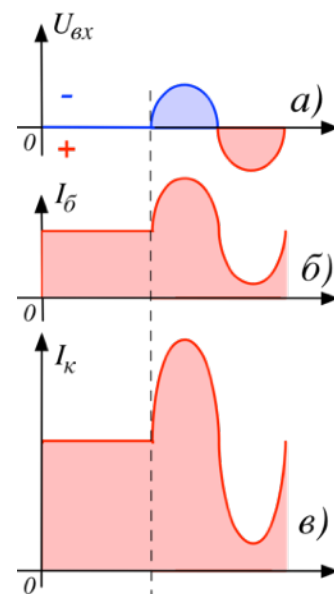
Например, если между точками А и Б ток базы увеличится с 50 до 100 микроампер, то есть увеличение составит 0,05 миллиампера, то ток коллектора между этими точками возрастет с 3 до 5,5 миллиампера, то есть вырастет на 2,5 мА. Отсюда следует, что усиление по току составляет:  $2,5 / 0,05 = 50$  раз.

Замечания по схеме:

- обратите внимание на полярность включения источника напряжения;
- И в режиме усиления и в режиме ключа к транзистору подключается источник напряжения: за Усиление и за Управление надо "платить" дополнительной энергией;
- $R_{\text{б}}$  обеспечивает отрицательное напряжение смещения базы относительно эмиттера;
- $C_{\text{св}}$  развязывает по току базу и эмиттер;
- если нагрузкой транзистора будет не динамик, а резистор, то создающееся на нем напряжение усиленного сигнала можно будет подать во входную цепь второго транзистора для дальнейшего усиления;
- **один транзистор может усилить сигнал по току в 30 - 50 раз.** Для большего усиления используются несколько каскадов таких усилителей

Существует множество схем включения транзисторов в зависимости от желаемого результата по усилению (усиление по току, по напряжению, по мощности). Да и сами транзисторы выпускаются для разных мощностей выходного сигнала и разных частот входного сигнала.

=====





Вдумчивый ученик: "Это всё здорово и почти понятно. Усиливать сигналы и переключать большие токи - замечательные способности транзистора. Но почему появление транзистора так подстегнуло развитие цифровой техники и компьютеров?"

Воот, хороший вопрос. Постараюсь ответить.

## ➔ Транзисторы и цифровая обработка информации

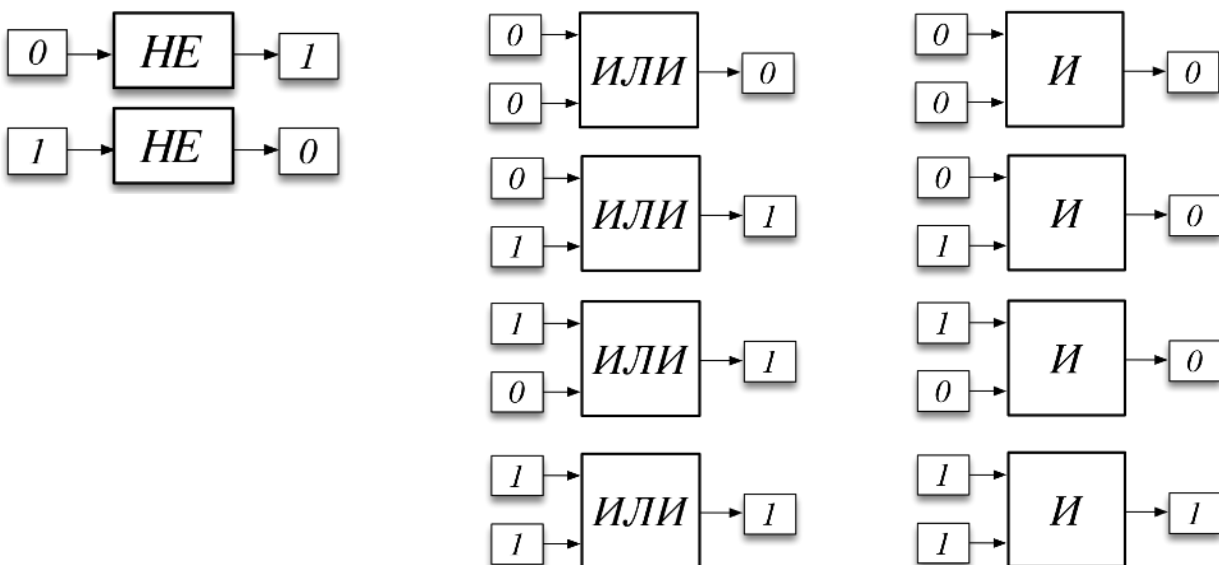
Информация во всех окружающих нас цифровых устройствах (компьютеры, планшеты, мобильные телефоны и пр.) представлена в двоичном виде. "Минимальной информацией" при цифровом представлении и обработке является 1 бит. 1 бит может принимать значения 0 или 1.

Двоичное представление числа - это последовательность бит представления числа в двоичной системе счисления. Например, десятичное число **2019** в двоичной системе счисления записывается как **11111100011**. Поэтому число **2019** будет записано в цифровом устройстве как последовательность одиннадцати бит с соответствующими значениями нулей и единиц.

Каждый текстовый символ (буква, знак препинания, цифра) имеет 8-битовый двоичный код своего цифрового представления. Например, латинские символы *x* - 01111000, *y* - 01111001, *z* - 01111010. И текстовая строка ***xuz*** будет записана в цифровом устройстве как последовательность 24-х бит с соответствующими значениями нулей и единиц.

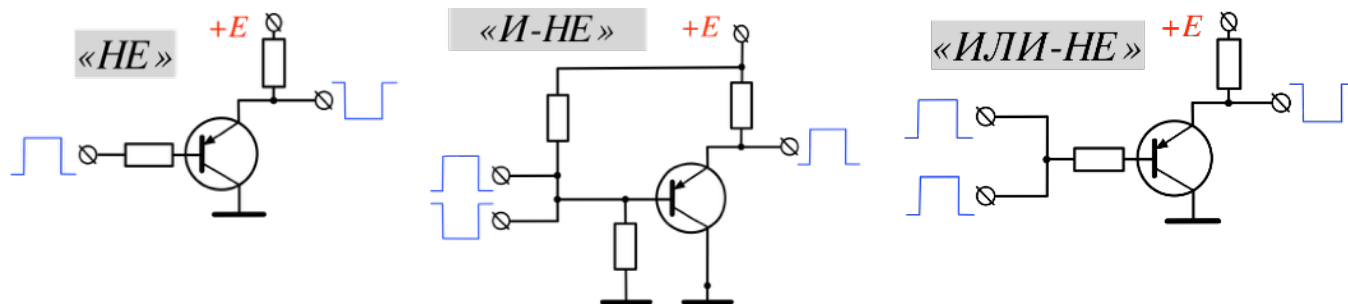
Эту двоичную информацию в цифровых устройствах надо уметь хранить (до обработки и после обработки). То есть речь идёт о **памяти цифрового устройства**.

И вторая задача, которую надо решать - это собственно **обработка этой самой цифровой информации**. Вся обработка цифровой информации осуществляется на основе булевой алгебры - математики двоичных состояний. В этой алгебре всего три операции: логическое **НЕ**, логическое **ИЛИ**, логическое **И**. Вот они:



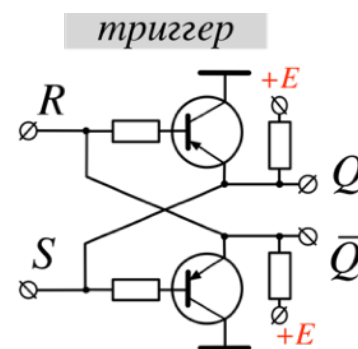
**Любая цифровая обработка любой цифровой информации сводится к этим трём логическим операциям.**

Так вот, с помощью транзисторов довольно просто реализовать электронные схемы как памяти, так и элементов булевой алгебры. Вот вам примеры:



И схема памяти для хранения 1-го бита информации - *триггер*:

Все функциональные устройства в системах цифровой обработки информации (процессоры, графические процессоры, модули памяти, драйверы шин связи, сетевые модули и пр.) строятся на основе этих "кирпичиков".



Поэтому не удивительно, что сложность микропроцессора Intel Core i9 оценивается в количестве содержащихся в нём транзисторов - около **3 миллиардов** штук.

Справедливости ради надо сказать, что и для вакуумных ламп существуют подобные схемы (и первая вычислительная машина ENIAC была на таких схемах построена). Однако давайте сравним размеры: длина вакуумного триода равна 3 см, размер транзистора в современном микропроцессоре - 100 нанометров. *Транзистор меньше лампы в триста тысяч раз!* Вот почему появление транзисторов так подстегнуло развитие цифровой техники и компьютеров.

В современной электронике применяются в основном *полевые транзисторы*. Как мы обсудили выше у биполярных транзисторов выходным коллекторным током управляет ток базы. В полевых транзисторах выходным током управляет напряжение. У полевых транзисторов есть преимущества перед биполярными:

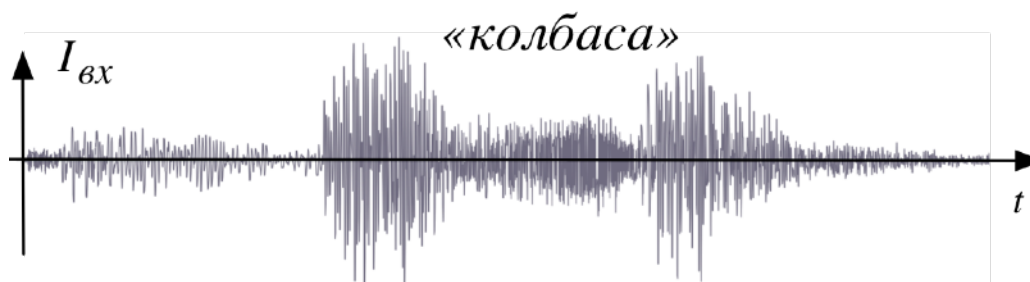
- высокое быстродействие;
- больше усилительные возможности;
- высокая температурная стабильность;
- малое потребление мощности.

## ➔ Переменный ток

Всё, что мы рассматривали выше, касалось цепей постоянного тока. Постоянным током мы называли ток, *не изменяющийся по направлению*.

А любой ток, который не постоянный, соответственно, называется переменным. То есть *переменный ток меняется во времени как по величине, так и по направлению*.

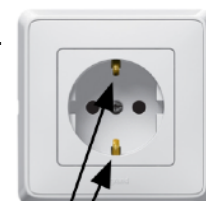
Вот я произнёс в микрофон слово "колбаса" (не шучу, правда произнёс - можете проверить). Акустические волны из моего горла попали на мембрану микрофона, заставляя её колебаться и тем самым изменять сопротивление в цепи микрофон - аудио-вход компьютера. Это вызвало соответствующее изменение тока в этой цепи и аудио-плата компьютера эти изменения тока записала. Вот такая получилась картинка.



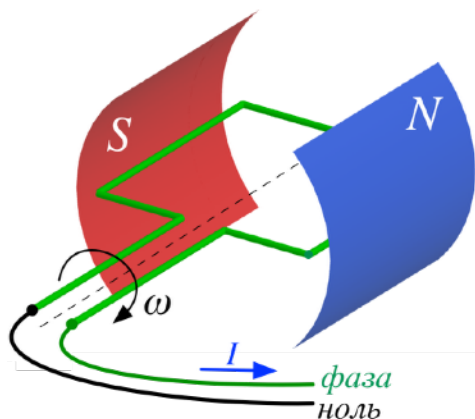
Вот вам переменный ток во всей красе. Но рассматривать такие "переменные токи" мы не будем: это тема Теории Сигналов и Теории Передачи Информации.

Мы поговорим о бытовом переменном токе - токе, "который у нас в розетках".

Что мы, как потребители, знаем про этот ток. Ну, честно скажем, немного: напряжение 220 вольт и частота 50 герц. И ещё - вилку в розетку можно втыкать "и так и так". И в розетках-вилках есть ещё третий контакт - "земля".



«ЗЕМЛЯ»



А что мы можем сказать про такой ток как физики? В Истории про Магнетизм мы рассмотрели вращение рамки в магнитном поле. И пришли к выводу, что порождаемый вследствие электромагнитной индукции ток выражается формулой

$$I = \frac{\omega \cdot B \cdot S}{R} \cdot \sin(\omega t),$$
 где  $B$  - индукция магнитного поля,

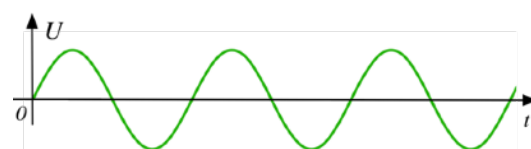
$\omega$  - угловая скорость вращения рамки,  $S$  - площадь рамки,  $R$  - электрическое сопротивление рамки. Ну а напряжение на концах рамки будет выражаться как

$$U = \omega \cdot B \cdot S \cdot \sin(\omega t).$$
 Вот по сути это напряжение и

"сидит" в нашей домашней розетке.

Один контакт (провод) считается "нулевым" (от него отсчитывается ноль потенциала), другой называется "фаза". Третий контакт розетки "земля" - защищает нас от удара током "фазы": если нарушится изоляция проводов или ток фазы (в результате неисправности включенного в розетку утюга, например) попадёт на корпус этого самого утюга, то ток уйдёт в "землю" (сопротивление "земли" делают очень маленьким), а не нам в руку.

Так вот такой переменный ток (напряжение), изменяющийся по закону синуса (косинуса)<sup>20</sup>, мы и будем рассматривать.



<sup>20</sup> Изменение по закону синуса-косинуса называют *гармоническим*.

Но прежде, чем мы углубимся в рассмотрение цепей переменного тока, давайте сформулируем ответы на очевидный вопрос: а зачем в нашей розетке (да и у всех потребителей электро-энергии) переменный ток? А почему не постоянный? Ответов - целый список.

## Почему в розетке переменный ток?

- Централизованное производство в больших объёмах электричества переменного тока значительно проще, чем производство постоянного.
- Переменный ток легко передавать с минимальными потерями на большие расстояния.
- Напряжение переменного тока легко преобразовывать (практически без потерь) в любое другое напряжение с помощью трансформаторов<sup>21</sup>.
- Переменный ток легко преобразовать в постоянный с помощью выпрямителей (мы это обсуждали выше).
- Генераторы и двигатели переменного тока проще по устройству, надёжней в работе и проще в эксплуатации по сравнению с машинами постоянного тока.
- Большое количество устройств-потребителей электроэнергии прекрасно работают на переменном токе (лампочки накаливания, утюги, нагревательные приборы, вентиляторы и пр.).

А наши компьютеры, мобильные телефоны и прочая электроника - на постоянном. И это понятно: в основе этих устройств - полярные элементы (транзисторы, диоды). Для них важно, чтобы, например, на эмиттер подавался "плюс", а на коллектор - "минус". Если наоборот, то соответствующий р-п-переход просто закроется и не будет работать. Но позвольте, скажете вы, ведь и ноутбуки и мобильные телефоны мы включаем в обычную домашнюю сеть переменного тока и всё работает! Это да, но что мы включаем в розетку питания? Мы включаем *адаптер питания*, который переменный ток преобразует до нужной величины, потом его выпрямляет и подаёт в ноутбук уже постоянный ток.



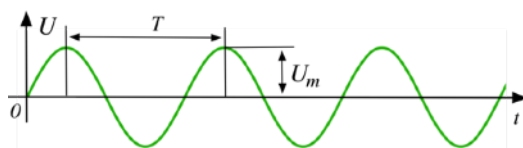
О производстве (генерации) переменного тока мы поговорим ниже. А сейчас ...

## ■ Цепи переменного тока

Мы с вами уже в *совершенстве*<sup>22</sup> владеем всеми методами расчёта цепей постоянного тока - законами Ома, правилами Кирхгофа. А что же происходит в цепях переменного тока? Сейчас обсудим.

Итак, что мы имеем на входе?

Синусоидальное напряжение в виде  $U(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$ , где  $U_m$  - амплитуда напряжения,  $\omega$  - угловая частота. Это не просто постоянное значение, *это - функция времени*.

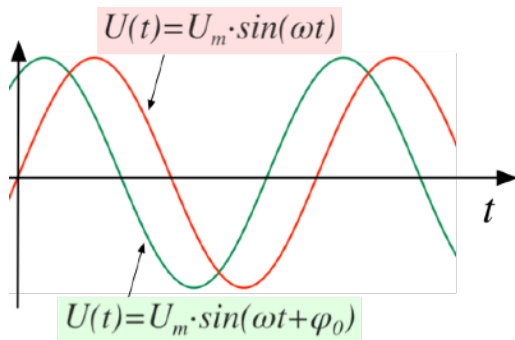


<sup>21</sup> Мы говорили о трансформаторах в *Истории про Магнетизм*.

<sup>22</sup> Совершенство (определение) - полнота всех достоинств, высшая степень какого-либо качества. Не шутка (шутка).



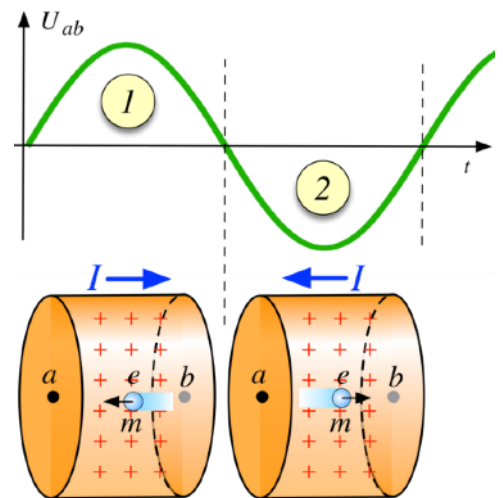
Частота изменения напряжения  $\nu$  (которая в случае напряжения "из розетки" равна 50 Герц - то есть напряжение достигает своего положительного максимума 50 раз в секунду) связана с угловой частотой так:  $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$ . Соответственно, период колебаний напряжения равен  $T = \frac{1}{\nu}$ . А 220 вольт - это  $U_m$ ? Нет, но об этом чуть позже.



И ещё одно важное понятие - *фаза синусоидального напряжения (тока)*. В общем случае синусоидальное напряжение может задаваться так:  $U(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$ . Величина  $\omega t + \varphi_0$  называется фазой синусоидального напряжения, а величина  $\varphi_0$  - начальной фазой. При сравнении двух синусоидальных сигналов равной частоты (смотрим на рисунок) можно сказать, что у сигналов есть *разность фаз*: "зелёный" сигнал отстаёт от "розового" сигнала на фазу  $\varphi_0$ .

Давайте взглянем на кусок медного проводника и на один электрон в нём. К концам этого проводника приложено напряжение  $U_{ab}(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$ .

На участке 1 приложенное напряжение создаёт электрическое поле, заставляющее электрон двигаться влево, на участке 2 - электрон движется вправо. Если частота изменения напряжения равна 50 герц, то электрону приходится менять направление своего движения 50 раз в секунду. Скорость дрейфа электронов невелика (миллиметры в секунду). Масса его тоже крайне мала. Поэтому механической инерцией электронов на таких частотах можно спокойно пренебречь. А вот при колебаниях на частотах свыше десятков гигагерц (естественно, таких частот у бытового переменного тока быть не может) инерцию электронов приходится учитывать.



### ■ Резистор в цепи переменного тока

Рассмотрим простейшую цепь переменного тока (проще не бывает):

на резистор  $R$  подаём синусоидальное напряжение  $U(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$ . Сопротивлением проводов пренебрегаем.

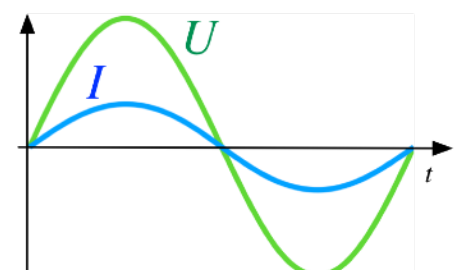
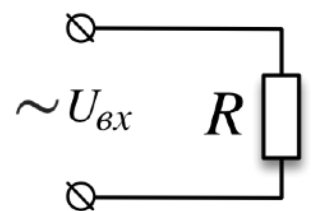
Помним, что напряжение на резисторе - переменная во времени величина. Но *в любой момент времени для мгновенных значений напряжения и тока*

*справедлив закон Ома*  $I = \frac{U}{R}$ . Поэтому мы спокойно можем записать выражение для тока

как функции времени:  $I(t) = \frac{U(t)}{R}$  или  $I(t) = \frac{U_m}{R} \cdot \sin(\omega t)$ . Вот их графики. Величина  $\frac{U_m}{R}$

- это амплитуда изменения тока в цепи. Главный вывод из этих нехитрых рассуждений: и напряжение  $U(t)$  и ток  $I(t)$  изменяются по синусоидальному закону с одинаковой частотой *с одинаковой фазой*.

По резистору течёт ток (хоть и переменный), значит на нём по закону Джоуля - Ленца выделяется тепловая энергия.



Выражение для мощности этого теплового выделения мы можем записать как функцию времени:  $P(t) = \frac{U(t)^2}{R} = \frac{U_m^2}{R} \cdot (\sin(\omega t))^2$ , а дальше с помощью тригонометрической формулы переписать это всё в более удобном для анализа виде:

$P(t) = \frac{U_m^2}{2R} \cdot (1 + \cos(2\omega t)) = \frac{U_m^2}{2R} + \frac{U_m^2}{2R} \cdot \cos(2\omega t)$ . Вот график выделяемой на

резисторе тепловой мощности ( $T$  - это период входного напряжения). В этой формуле есть постоянная составляющая

(не изменяющаяся во времени)  $\frac{U_m^2}{2R}$  и переменная

составляющая  $\frac{U_m^2}{2R} \cdot \cos(2\omega t)$ . Найдём среднее значение мощности *за период  $T$* . Среднее значение постоянной

составляющей будет сама постоянная составляющая  $\frac{U_m^2}{2R}$ , а среднее значение переменной составляющей будет равно нулю (среднее значение косинуса на двух его периодах равно нулю - это очевидно). Поэтому среднее значение мощности (и не только на периоде  $T$ , но и

вообще) равно:  $\bar{P} = \frac{U_m^2}{2R}$  ( $\bar{P}$  - так обозначается среднее).

Если сравнить формулы  $P(t) = \frac{U(t)^2}{R}$  и  $\bar{P} = \frac{U_m^2}{2R}$ , то можно сказать, что  $\overline{U(t)^2} = \frac{U_m^2}{2}$  - это *среднеквадратичное значение напряжение в цепи* <sup>23</sup>.

А вот корень из него  $U_d = \sqrt{\overline{U(t)^2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$  называется *действующим значением напряжения переменного тока*.

- Ой, а для чего наградили такие городухи? - наверняка спросите вы.

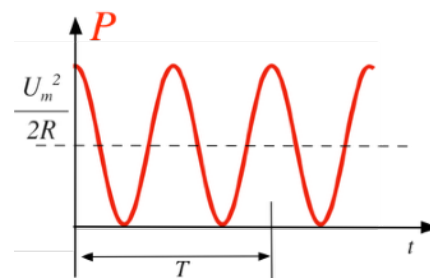
Объясняю. Ток у нас - переменный, то есть изменяющийся во времени. Хочется как-то сравнить его с *эквивалентным постоянным*. По какому критерию сравнить? Критерий один - по тепловому выделению на одинаковых сопротивлениях. Поэтому:

**Действующее значение переменного напряжения равно такому постоянному напряжению, при котором в одном и том же проводнике выделяется одинаковая тепловая мощность.**

Вот и 220 вольт в нашей бытовой электросети - это *действующее значение переменного напряжения*. А амплитуда переменного напряжения, соответственно в  $\sqrt{2}$  раз больше.

Аналогичные рассуждения можно применить и для действующего значения силы переменного тока:  $I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$

<sup>23</sup> Помните, в Истории про Молекулярно-Кинетическую Теорию применялось понятие "среднеквадратичная скорость молекулы". Это пришло из статистики. Обратите внимание, что *среднее напряжение равно нулю, а среднеквадратичное - нет*.



Резисторы в цепях переменного тока называют обобщённо активными сопротивлениями (активными в том смысле, что на них выделяется тепло). Про не-активные сопротивления в цепях переменного тока ("реактивные") - чуть ниже.



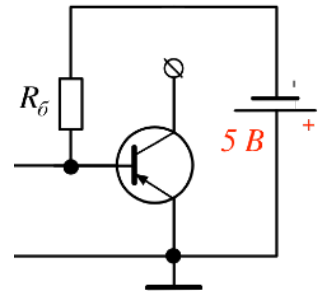
Вдумчивый ученик: "А можно чётко сформулировать - для чего нужны резисторы в схемах? То, что на них выделяется тепло и это приводит к тепловым потерям, это понятно. А может вообще без них обойтись?"



Два свойства резисторов (и в цепях переменного и в цепях постоянного токов):

- на резисторах падает напряжение;
- на резисторах выделяется тепло.

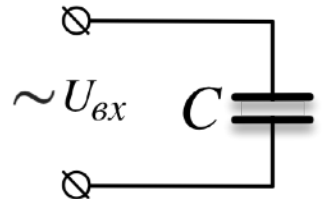
Про падение напряжения. Приведу свежий пример: на резисторе в цепи базы транзистора в режиме усиления падает напряжение от источника напряжения, чем обеспечивается более низкий потенциал базы относительно эмиттера, что, в свою очередь, обеспечивает открытый режим работы р-п-перехода эмиттер-база. Другим способом это обеспечить не получится. *Падение напряжения - замечательное свойство резисторов.*



Про выделяемое тепло. Да, зачастую выделяемое тепло на резисторах ведёт к энергетическим потерям. Но эти потери - плата за использование первого свойства резисторов. А с другой стороны, нагревание утюга - это выделение тепла на сопротивлении его нагревательной спирали. И тут уже о потерях речи нет. Тут свойство выделять тепло используется по прямому назначению.

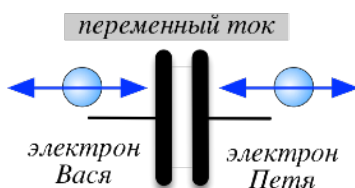
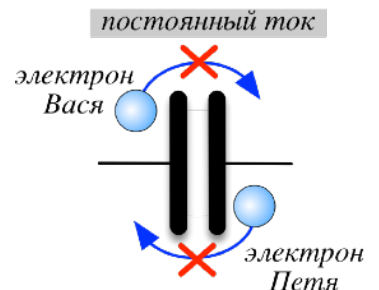
### ■ Конденсатор в цепи переменного тока

Рассмотрим ещё одну простейшую цепь переменного тока: на конденсатор  $C$  подаём синусоидальное напряжение  $U(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$ . Сопротивлением проводов пренебрегаем.



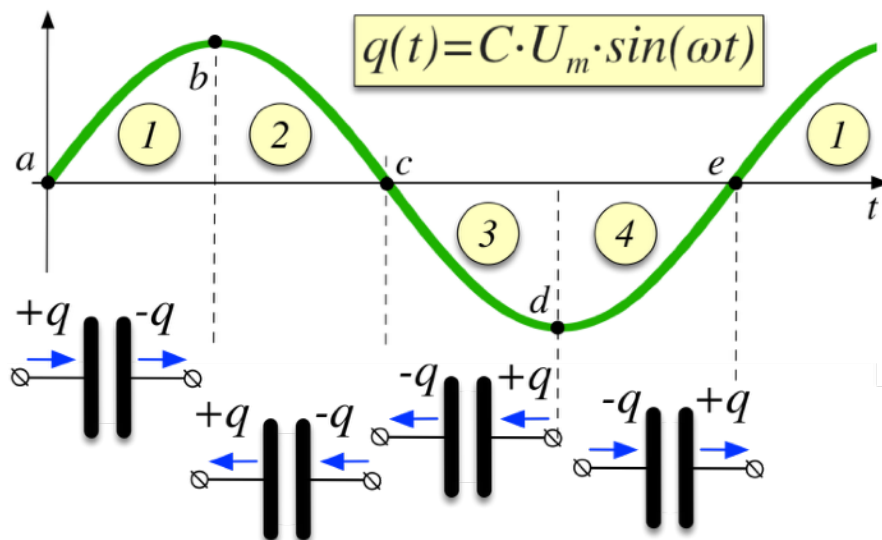
Сразу смело можем записать:  $\frac{q(t)}{C} = U(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$ , где  $q(t)$  - заряд на конденсаторе, изменяющийся во времени. Заряд на конденсаторе меняется по такому же гармоническому закону, что и напряжение:  $q(t) = C \cdot U_m \cdot \sin(\omega t)$ .

А ток течёт через конденсатор? Постоянный - нет. Образно говоря, электрон Вася не может перепрыгнуть с левой пластины конденсатора на правую, а электрон Петя - наоборот. Между пластинами находится диэлектрик и он электроны не пропускает.



А переменный ток течёт через конденсатор? Да. Для создания переменного тока электронам Васе и Пете совсем не обязательно перепрыгивать с пластины на пластину. Под действием переменного напряжения (переменного электрического поля) они совершают в такт этому напряжению движение то в одну, то в другую сторону каждый на своей стороне и *создают тем самым переменный ток.*

Давайте взглянем вот на такую картинку. Напомню, что в любой момент времени заряды пластин одинаковы по модулю и противоположны по знакам.



Закон изменения заряда на конденсаторе мы выяснили. Он таков:  $q(t) = C \cdot U_m \cdot \sin(\omega t)$ . Смотрим что происходит на конденсаторе на периоде изменения заряда на нём.

В точке  $a$  на конденсаторе заряд 0. На участке 1 на конденсаторе идёт накопление заряда: электроны уходят с левой пластины и другие электроны приходят на правую пластину - ток течёт слева направо.

В точке  $b$  на конденсаторе - максимальный положительный заряд. На участке 2 на конденсаторе идёт перезаряд: электроны приходят на левую пластину и другие электроны уходят с правой - ток течёт справа налево. В точке  $c$  конденсатор разряжен. На участке 3 конденсатор продолжает перезаряжаться: ток течёт справа налево. В точке  $d$  на конденсаторе - максимальный отрицательный заряд.

На участке 4 на конденсаторе идёт перезаряд в другую сторону: ток течёт слева направо.

А можно как-то ток через конденсатор записать формулой? Да запросто!

Надо только вспомнить, что по определению тока:  $I = \frac{dq}{dt}$  (ток - это скорость изменения заряда). И тогда имеем:

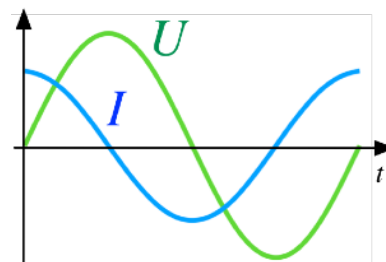
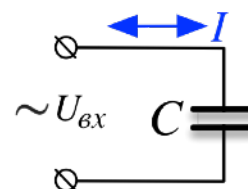
$I(t) = q'(t) = C \cdot U_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)$ . А чтоб сравнивать синус с синусом, перепишем последнее уравнение в виде:  $I(t) = C \cdot U_m \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ .

Итак, мы имеем на конденсаторе напряжение  $U(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$  и ток через него  $I(t) = C \cdot U_m \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ . Что можно сказать, глядя на эти формулы? А вот что:

*Колебания силы тока опережают по фазе колебания напряжения на конденсаторе на  $\frac{\pi}{2}$ .* Амплитуда силы тока равна

$I_m = \omega \cdot C \cdot U_m$ . Если обозначить  $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ , то можно

записать  $I_m = \frac{U_m}{X_C}$ . Похоже на закон Ома для конденсатора<sup>24</sup>?



<sup>24</sup> Только для конденсатора закона Ома не существует.

Да, похоже. Величину  $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$  называют **ёмкостным сопротивлением конденсатора**. Аналогичную формулу можно записать и для действующих значений напряжения и тока:  $I_d = \frac{U_d}{X_C}$ .

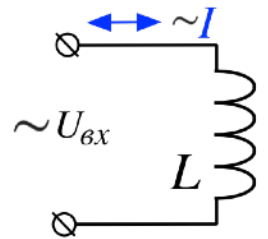
! А вот для текущих значений такую формулу записать нельзя - текущие ток и напряжение различаются по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ .

Величину  $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$  рассматривают как сопротивление конденсатора переменному току.

Заметьте, что сопротивление это зависит не только от ёмкости конденсатора, но и от частоты тока. Ни о каком тепловом выделении энергии на конденсаторе речи не идёт: энергия электрического поля то запасается на конденсаторе при его зарядке, то отдаётся в цепь при разрядке. Поэтому говорят, что ёмкостное сопротивление конденсатора - **реактивное сопротивление**.

### ■ Катушка индуктивности в цепи переменного тока

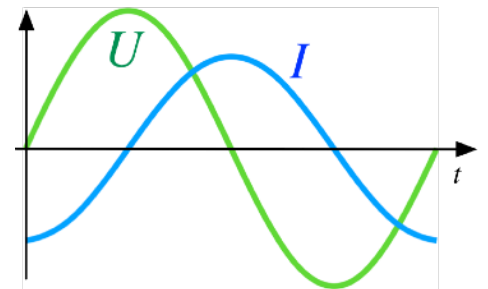
Ещё одна простейшая цепь переменного тока: на катушку индуктивности  $L$  подаём синусоидальное напряжение  $U(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$ . Сопротивлением катушки и проводов пренебрегаем.



Ток в цепи - переменный, значит в катушке будет наблюдаться явление самоиндукции. И ЭДС самоиндукции равна  $\epsilon_{sind} = -L \cdot \frac{dI}{dt}$ <sup>25</sup>. ЭДС самоиндукции по правилу Ленца направлена против изменения внешнего напряжения и для нашего контура цепи можно записать:  $U(t) = -\epsilon_{sind}$  или  $L \cdot \frac{dI}{dt} = U_m \cdot \sin(\omega t)$ . Откуда простейшим интегрированием

получаем выражение для тока:  $I(t) = -\frac{U_m}{L \cdot \omega} \cdot \cos(\omega t)$ . Преобразуем эту формулу, чтобы сравнивать синус с синусом:

$I(t) = \frac{U_m}{L \cdot \omega} \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$ . Отсюда вывод: **Колебания силы тока отстают по фазе от колебаний напряжения на индуктивности на  $\frac{\pi}{2}$** .



Амплитуда силы тока в катушке равна  $I_m = \frac{U_m}{L \cdot \omega}$  и если

ввести обозначение  $X_L = L \cdot \omega$ , то получим  $I_m = \frac{U_m}{X_L}$ . Аналогичную формулу можно написать и для действующих значений тока и напряжения.

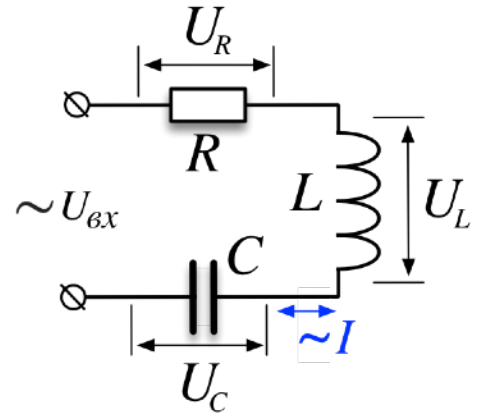
Величину  $X_L = L \cdot \omega$  называют **индуктивным сопротивлением катушки индуктивности**. Индуктивное сопротивление - **реактивное сопротивление** (тепловая энергия не выделяется).

<sup>25</sup> В Истории про Магнетизм это подробно описано.

## ■ Резистор, конденсатор и индуктивность в цепи переменного тока

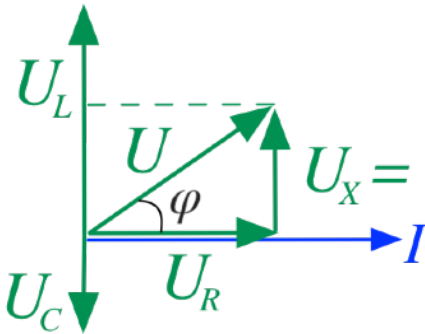
А теперь возьмём и объединим в одну цепь резистор, конденсатор и катушку индуктивности: соединим их **последовательно**. На входе у нас то же синусоидальное напряжение  $U(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$ .

Для любого мгновенного значения напряжений в нашей цепи можем записать:  $U(t) = U_R(t) + U_C(t) + U_L(t)$  - напряжение на входе равно сумме напряжений на резисторе, конденсаторе и индуктивности. А ток в этой последовательной цепи один и тот же.



Но вот такая заковыка: все эти три напряжения имеют свою фазу относительно текущего тока. Мы это только что обсуждали. Фаза напряжения на резисторе совпадает с фазой тока, фаза напряжения на конденсаторе отстаёт на  $\frac{\pi}{2}$  от фазы тока, а фаза напряжения на индуктивности опережает на  $\frac{\pi}{2}$  фазу тока. И как же нам посчитать эту цепь?

Нам поможет векторное представление<sup>26</sup> тока-напряжений. Отложим "вектор" тока (нам важно лишь его направление).



Напряжение на резисторе совпадает по фазе с током - отложим это напряжение как вектор  $U_R$ .

Напряжение на конденсаторе отстаёт на  $\frac{\pi}{2}$  от фазы

тока - отложим это напряжение как вектор  $U_C$ .

Напряжение на индуктивности опережает на  $\frac{\pi}{2}$  фазу

тока - отложим это напряжение как вектор  $U_L$ .

$U_X = U_L - U_C$  - это напряжение на реактивных сопротивлениях (емкостном и индуктивном) сопротивлениях цепи. И вот теперь мы можем векторно складывать эти напряжения (все фазы мы учли).

По теореме Пифагора:  $U(t) = \sqrt{U_R(t)^2 + (U_L(t) - U_C(t))^2}$ . Угол  $\varphi$  на картинке - это угол сдвига фазы между входным напряжением и результирующим током в цепи. И если теперь мы введём величину  $Z$  как  $Z = \frac{U_m}{I_m}$  (амплитудные значения входного напряжения и

результирующего тока), то получим  $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$  - эта величина называется

**полным сопротивлением цепи**. Угол  $\varphi$  сдвига фазы между входным напряжением и

результирующим током в цепи считается так:  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$ .

На реактивных сопротивлениях цепи (конденсаторе и индуктивности) мощность не выделяется. А выделяется она на резисторе (активном сопротивлении). **Средняя мощность**, выделяемая в цепи на резисторе, равна  $P = I \cdot U \cdot \cos \varphi$ .

<sup>26</sup> Во "взрослой" теории цепей переменного тока такое представление называют векторной диаграммой токов и напряжений.

Все эти рассуждения и выкладки применимы лишь к последовательному соединению резистора, конденсатора и индуктивности. Для иных соединений (параллельных, смешанных) надо рисовать соответствующие векторные диаграммы и заново проводить рассуждения.

В институте теория цепей переменного тока подробно объясняется с помощью векторных диаграмм и комплексных чисел. Здесь же вы получили общее представление о поведении резисторов, конденсаторов и индуктивностей в цепях переменного тока.

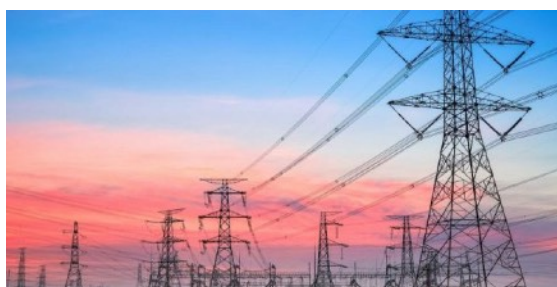
## ➔ Производство электроэнергии. Трёхфазный ток

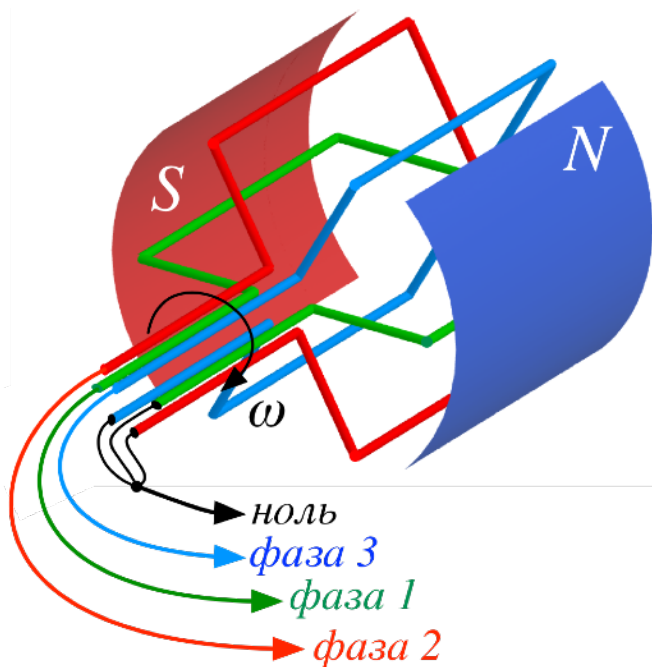
По большому счету основные промышленные способы производства электроэнергии различаются лишь тем, что заставляет вращаться "рамку с током в магнитном поле".

Гидроэлектростанции (ГЭС) используют напор воды, вращающий гидротурбины.



Теплоэлектростанции (ТЭЦ - теплоэлектроцентрали) используют энергию сжигаемого топлива (уголь, мазут) для вращения тепловой турбины. Атомные электростанции (АЭС) - энергию реакций ядерного деления. Ветрогенераторы - энергию ветра.

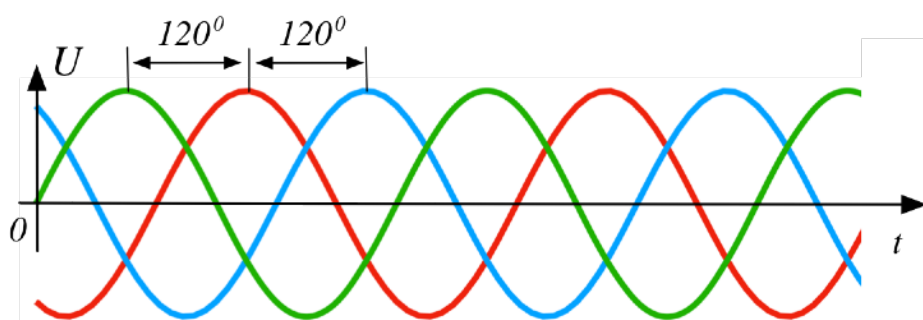




Все они производят трёхфазный ток. Что это такое? Мы уже знаем, что если вращать рамку с током в магнитном поле, то можно получать переменный ток.

А если вращать одновременно три рамки с током? И эти рамки повернуты вокруг общей оси вращения друг относительно друга на 120 градусов.

Мы тем самым по сути объединили три генератора переменного тока в один. И по четырём проводам (три провода независимых фаз плюс один общий нулевой) мы получаем три линии переменного напряжения. Каждая из фаз сдвинута относительно другой на 120 градусов.



На ГЭС и ТЭС производят трёхфазный ток напряжением порядка 10 киловольт. Затем это напряжение повышают до 100-500 киловольт и направляют в линии электропередач (ЛЭП). Напряжение повышают для уменьшения потерь энергии при передаче. При подходе к потребителям напряжение уменьшают (промышленный стандарт электрического тока - трёхфазное напряжение 380 вольт; бытовой - однофазное напряжение 220 вольт).

