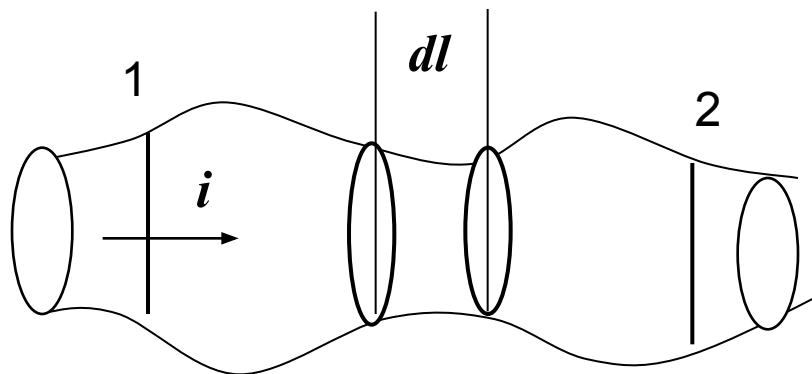


Работа

электрического

тока

Работа электрических сил внутри проводника



$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

- часть работы идет на увеличение кинетической энергии упорядоченного движения электронов, часть выделяется в виде тепла.

В случае переменного тока работу рассчитывают за промежутки времени dt , на которых силу тока и разность потенциалов можно считать *Const*

За время dt через участок 1-2 : **пройдет заряд** $dq = I \cdot dt$

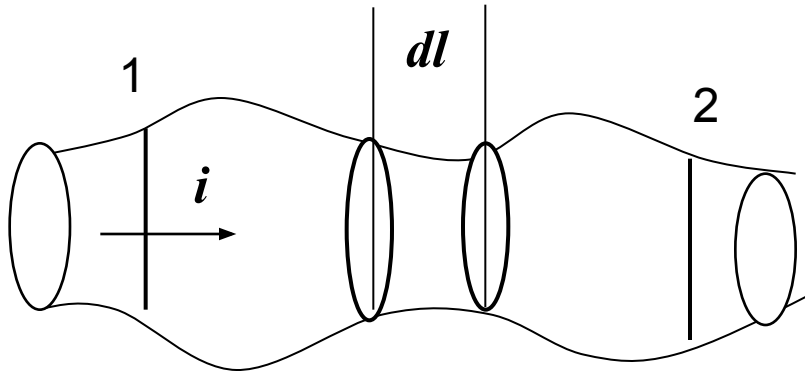
выделится энергия

$$dW = dq(\varphi_1 - \varphi_2) = I(\varphi_1 - \varphi_2)dt$$

Пусть $U = \varphi_1 - \varphi_2$ тогда

$$W = \int_0^t IU dt$$

Энергию можно выразить в зависимости от размеров и материала проводника



Поле E в объеме $S dl$ однородно.

Сила тока $I = jS = \gamma ES$

тогда

$$E = \frac{I}{\gamma S}$$

Умножим на dl и проинтегрируем между эквипотенциальными сечениями 1 и 2:

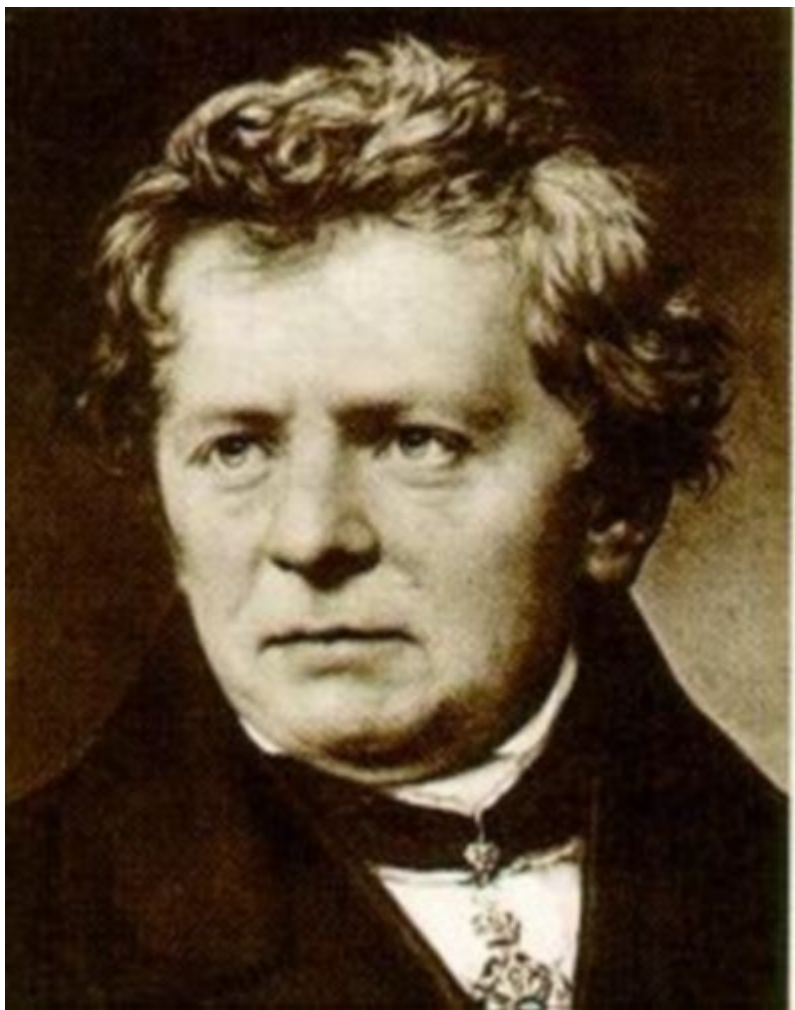
$$\int_1^2 E dl = I \int_1^2 \frac{dl}{\gamma S}$$

$\varphi_1 - \varphi_2$

$$R = \int_1^2 \frac{dl}{\gamma S}$$

Электрическое сопротивление на участке 1-2

$$\varphi_1 - \varphi_2 = IR$$



Георг Ом

Закон Ома для однородного участка цепи (не содержащего источников тока)

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}$$

Закон Ома в интегральной форме

$$j = \gamma E$$

Закон Ома в дифференциальной форме.

$$\mathcal{E} = I \cdot R + I \cdot r; \quad I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи (содержащего источник тока)

Пользуясь законом Ома работу электрического тока можно записать

$$W = qU = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$$

Для постоянного
тока

$$W = \int_0^t I^2 R dt = \int_0^t \frac{U^2}{R} dt$$

Для переменного
тока

$$W = I^2 R t$$

Закон Джоуля -
Ленца

Энергия, выделяющаяся в проводнике в виде тепла

Сопротивление однородного проводника с постоянным сечением

$$R = \int_1^2 \frac{dl}{\gamma S} = \frac{l}{\gamma S}$$

где $\frac{1}{\gamma} = \rho$

удельное сопротивление
вещества проводника

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

$$1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ Вольт}}{1 \text{ ампер}} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}$$

Сопротивление
проводника, на концах
которого при силе тока в
1А существует разность
потенциалов 1В

Зависимость сопротивления от температуры

Известно, что электрическое сопротивление некоторых материалов зависит от температуры. Это свойство можно использовать для измерения температуры.

Сопротивление металлических проводников линейно увеличивается с ростом температуры по формуле:

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot t)$$

где α - температурный коэффициент изменения сопротивления, R_0 – температура проводника при 0°C.

Это объясняется увеличением количества столкновений электронов с молекулами при увеличении скорости движения молекул.

Резисторы и термисторы. Зависимость сопротивления от температуры

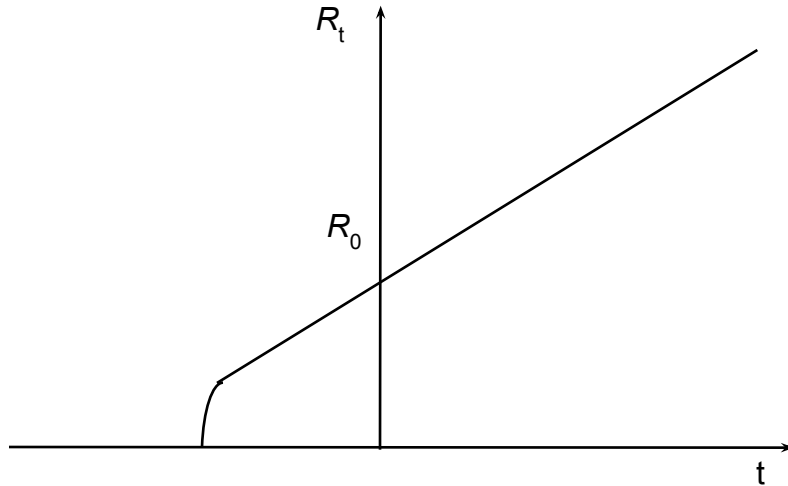


Рис. Зависимость сопротивления проводников от температуры

Изобразим эту зависимость графически (рис. 1.2.1)

Для большинства металлов $\alpha \approx 10^{-3}$, например, для меди

$$\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Однако, существуют сплавы, для которых $\alpha \approx 10^{-5}$. Их сопротивление практически не зависит от температуры. Один из таких сплавов называется **константан**.

Резисторы и термисторы. Зависимость сопротивления от температуры

Для измерения температуры можно использовать и полупроводники с р- и n- проводимостью. Для полупроводников зависимость сопротивления температуры носит обратный характер

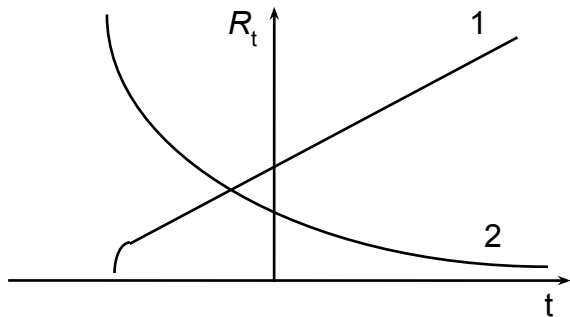


Рис. Зависимость сопротивления от температуры: (1) - для терморезисторов, (2) - для термисторов.

Датчики температуры на основе металлических проводников носят название **терморезисторы**. Датчики на основе полупроводников носят название **термисторы**.

1.2. Резисторы и термисторы. Зависимость сопротивления от температуры

Особенности термисторов, как датчиков температуры:

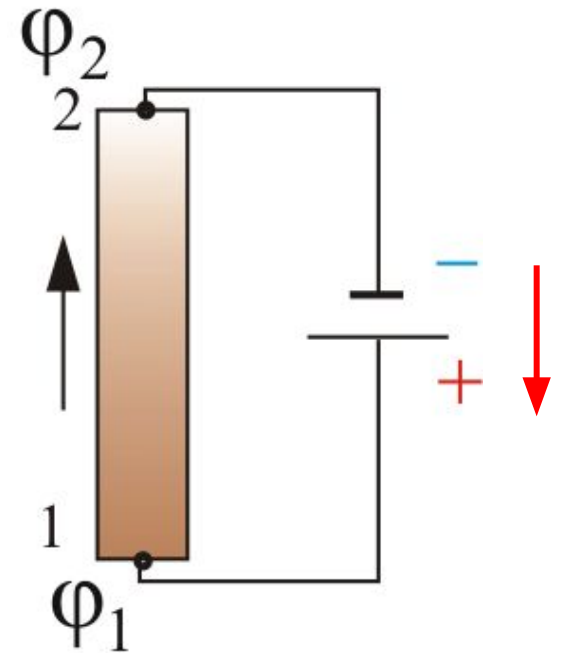
1. Зависимость сопротивления от температуры для термисторов более крутая, чем для терморезисторов.
2. Зависимость $R(t)$ для термисторов оказывается противоположной по отношению к терморезисторам.
3. Зависимость $R(t)$ для термисторов заметно нелинейная.
4. Зависимость $R(t)$ для термисторов нестабильна во времени.

Последнее обстоятельство сильно ограничивает применение термисторов. В метеорологических измерениях они применяются только в **радиозондах**, когда время измерения ограничено 1-2 часами.

Сторонние силы и ЭДС

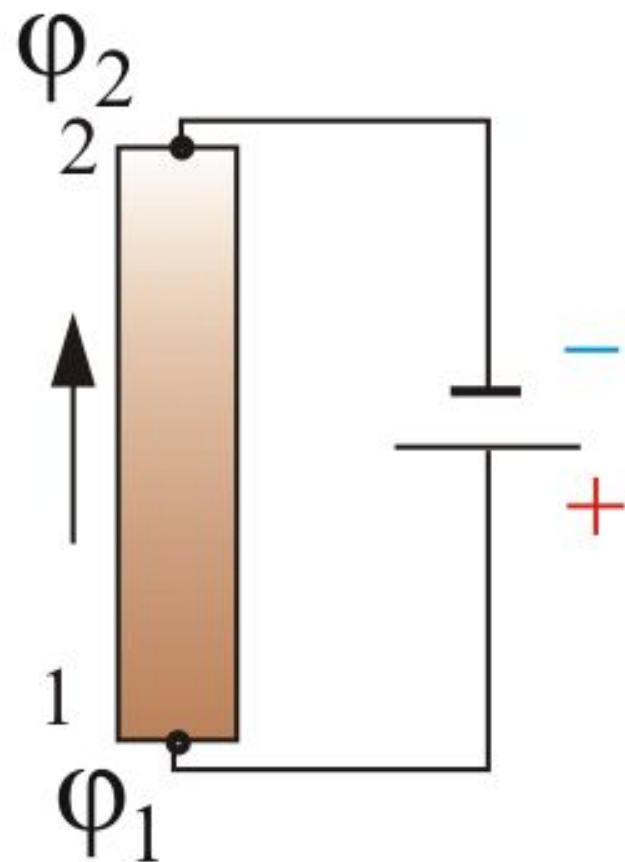
Для того, чтобы поддерживать в проводнике направленное движение электронов в течение некоторого времени, необходимо иметь устройство, которое перекачивало бы электроны обратно из тела В к телу А. Эти функции выполняет источник тока.

Поэтому в замкнутой цепи, наряду с нормальным движением зарядов, должны быть участки, на которых движение (положительных) зарядов происходит в направлении возрастания потенциала, т.е. против сил электрического поля



Перемещение заряда на этих
Участках возможно лишь с
помощью **сил неэлектрического
происхождения** (сторонних сил):
химические процессы, диффузия
носителей заряда, вихревые
электрические поля.

Аналогия: насос, качающий воду в
водонапорную башню, действует за
счет негравитационных сил
(электромотор).



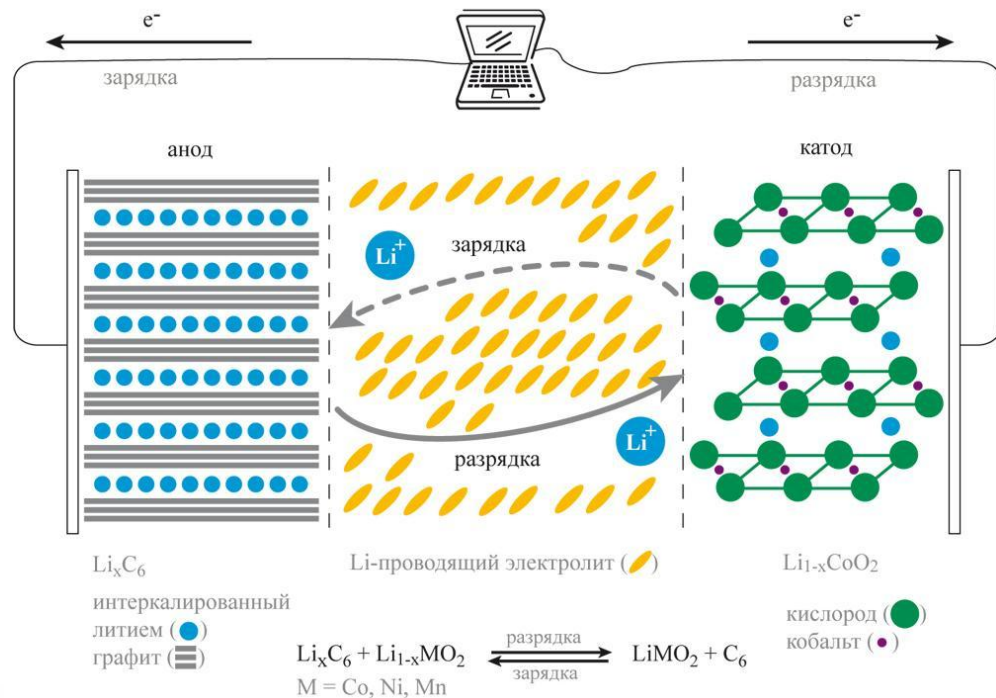
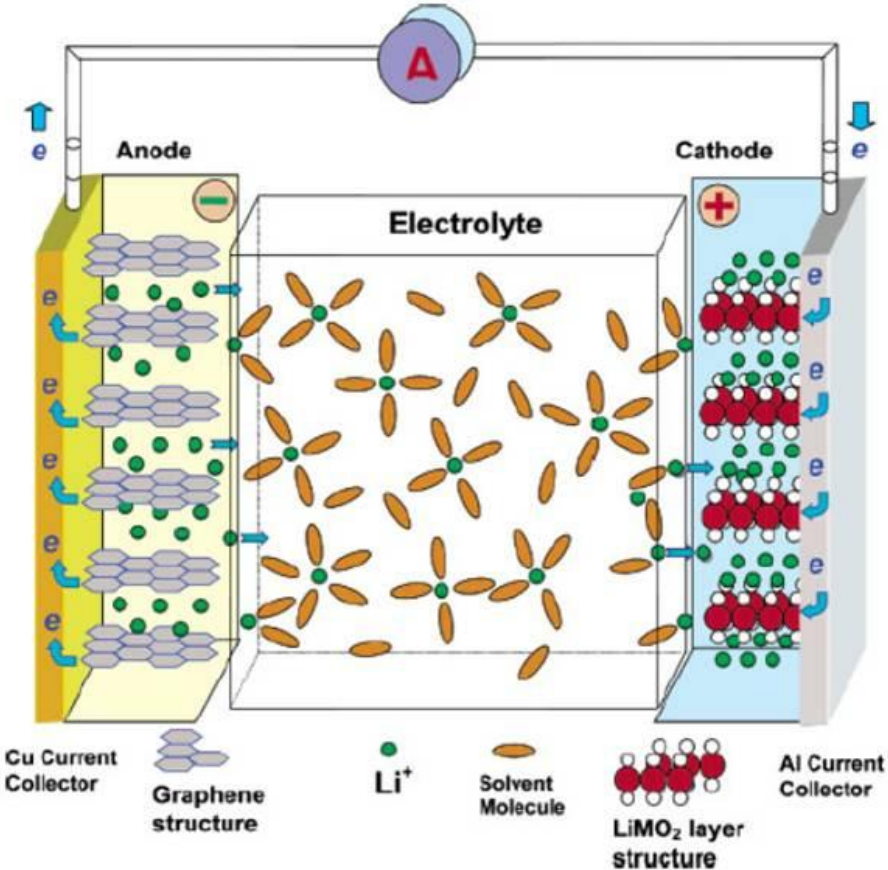


Схема литий-ионного химического источника тока, в котором в качестве материала положительного электрода выступает LiMO_2 ($M = \text{Co, Ni, Mn}$), а в качестве материала отрицательного электрода – графит. Во время процесса заряда ионы лития извлекаются из структуры LiMO_2 и, проходя через электролит, внедряются в межслоевое пространство графита; в процессе разряда перенос ионов лития идет в обратном направлении. Количество сохраняемой энергии ограничено в основном свойствами материала положительного электрода. Так, например, для LiCoO_2 характерны величины удельной емкости 130-150 мАч/г.

***Сторонние силы можно
характеризовать работой,
которую они совершают над
перемещающимися по
замкнутой цепи зарядами***

Мы пришли к выводу, что для поддержания постоянного тока в замкнутой цепи, в нее необходимо включить источник тока. Подчеркнем, что задача источника заключается не в том, чтобы поставлять заряды в электрическую цепь (в проводниках этих зарядов достаточно), а в том, чтобы заставлять их двигаться, совершать работу по перемещению зарядов против сил электрического поля.

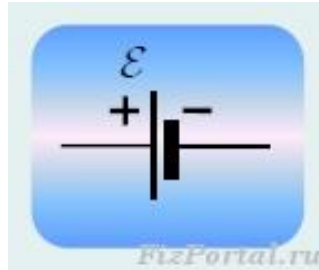
Основной характеристики источника является **электродвижущая сила (ЭДС) – работа, совершаемая сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда**

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q}; \quad \left[\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right] = [V]$$

ЭДС источника равна 1 вольт, если он совершает работу 1 Джоуль при перемещении заряда 1 Кулон

Название этой физической величины не вполне удачно – так как электродвижущая сила является работой, а не силой в обычном механическом понимании.

Для обозначения источников тока на электрических схемах используется специальное обозначение



Электростатическое поле совершает положительную работу по перемещению положительного заряда в направлении уменьшения потенциала поля. Источник тока проводит разделение электрических зарядов – на одном полюсе накапливаются положительные заряды, на другом отрицательный.

Напряженность электрического поля в источнике направлена от положительного полюса к отрицательному, поэтому работа электрического поля по перемещению положительного заряда будет положительной при его движения от «плюса» к «минусу».

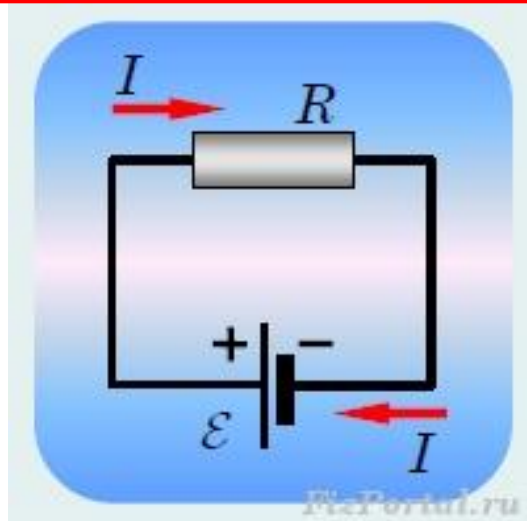
Работа сторонних сил, наоборот, положительна в том случае, если положительные заряды перемещаются от отрицательного полюса к положительному, то есть от «минуса» к «плюсу».

В этом принципиальное отличие понятий разности потенциалов и ЭДС

Таким образом, электродвижущую силу источника можно считать алгебраической величиной, знак которой («плюс» или «минус») зависит от направления тока.

В схеме, показанной на рис. вне источника (во внешней цепи) ток течет от «плюса» источника к «минусу», внутри источника от «минуса» к «плюсу».

В этом случае, как сторонние силы источника, так и электростатические силы во внешней цепи совершают положительную работу.



Следует иметь в виду, что движение электронов внутри источника тока происходит при наличии некоторого сопротивления, обусловленного столкновениями между электронами и атомами. При этом теряется часть кинетической энергии упорядоченного движения электронов. Чтобы сохранить постоянной скорость этого движения источник тока должен компенсировать указанную выше потерю энергии внутри самого источника тока.

Полная энергия A , совершаемая сторонними силами внутри источника тока при переносе заряда q , равна сумме:

1) работы A_{12} против электростатических сил F , действующих внутри источника тока; и

2) потери энергии электронов W при их прохождении через источник тока:

$$A = A_{12} + W$$

Закон сохранения энергии

Очевидно, что работа A_{12} сторонней силы равна работе A_{21} , совершаемой электростатическими силами вне источника тока.

Для того, чтобы поддержать потенциалы φ_1 и φ_2 постоянными, источник тока должен непрерывно совершать работу A_{12} , компенсирующую потерю энергии во внешней цепи.

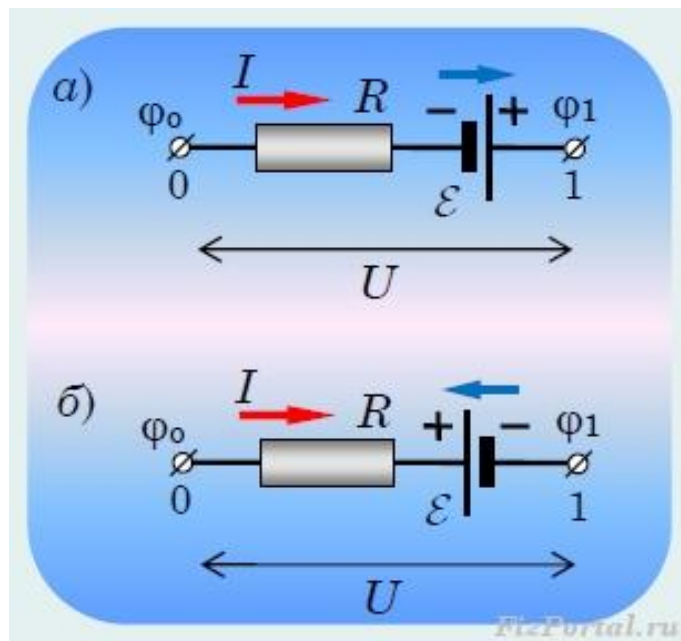
Если на некотором участке электрической цепи помимо электростатических действуют и сторонние силы, то над перемещением зарядов «работают» как электростатические, так и сторонние силы.

Суммарная работа электростатических и сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда называется **электрическим напряжением на участке цепи**

$$U = \frac{A_{\text{эл}} + A_{\text{ст}}}{q} = \varphi_0 - \varphi_1 + \mathcal{E}. \quad (2)$$

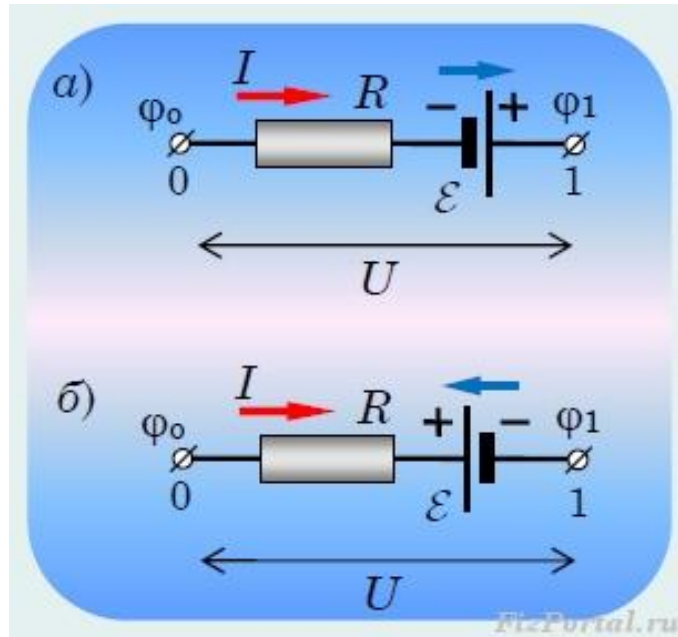
В том случае, когда сторонние силы отсутствуют, электрическое напряжение совпадает с разностью потенциалов электрического поля.

Поясним определение напряжения и знака ЭДС на простом примере. Пусть на участке цепи, по которому протекает электрический ток, имеются источник сторонних сил и резистор



Для определенности будем считать, что $\varphi_0 > \varphi_1$, то есть электрический ток направлен от точки **0** к точке **1**. При подключении источника, как показано на рис. а, Сторонние силы источника совершают положительную работу, поэтому соотношение (2) в этом случае может быть записано в виде

а.
$$U = \varphi_0 - \varphi_1 + |\mathcal{E}|$$



$$U = \varphi_0 - \varphi_1 + |\mathcal{E}|$$

$$U = \varphi_0 - \varphi_1 - |\mathcal{E}|$$

При обратном включении источника (рис. б) внутри него заряды движутся против сторонних сил, поэтому работа последних отрицательна. Фактически силы внешнего электрического поля преодолевают сторонние силы. Следовательно, в этом случае рассматриваемое соотношение (2) имеет вид

б.
$$U = \varphi_0 - \varphi_1 - |\mathcal{E}|$$

Для оценки потери энергии электронов W при их перемещении внутри самого источника тока необходимо знать его электрическое сопротивление r , тогда согласно формуле работы электрического тока

$$W = I^2 \cdot r \cdot t = q \cdot I \cdot r$$

Полная работа сторонних сил равна:

$$A = A_{12} + W = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) + q \cdot I \cdot r$$

Тогда ЭДС источника будет равна: $\mathcal{E} = \varphi_1 - \varphi_2 + Ir$

На основании закона Ома для участка цепи $\varphi_1 - \varphi_2 = I \cdot R$

тогда

$$\mathcal{E} = I \cdot R + I \cdot r; \quad I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи (содержащего источник тока)

Электродвижущая сила, действующая в замкнутой цепи, равна сумме падений напряжения в этой цепи.

Ежесекундная работа, совершаемая источником тока, т.е. его мощность

$$N = \frac{A}{t} = \frac{\mathcal{E} \cdot q}{t} = \mathcal{E} \cdot I$$

$$\mathcal{E} \cdot I = I^2 R + I^2 r$$

Эта работа равна той энергии, которая ежесекундно выделяется во всех сопротивлениях цепи.

Если источник тока не замкнут, то упорядоченное движение зарядов через него не происходит, и потеря энергии внутри источника тока отсутствует. Разность потенциалов между полюсами разомкнутого источника тока равна:

$$\varphi_1^0 - \varphi_2^0 = \int_1^2 E dl$$

Подставим $E = F/q_0$ $F = -f$ (F электростатическая сила
 f сторонняя сила)

$$\varphi_1^0 - \varphi_2^0 = \frac{1}{q_0} \int_1^2 F dl = -\frac{1}{q_0} \int_1^2 f dl = \frac{1}{q_0} \int_2^1 f dl$$

$$\int_2^1 f dl$$

работа A сторонних сил против электростатических при переносе заряда q_0 из точки 2 в точку 1.

ЭДС источника тока равна разности потенциалов на его полюсах в разомкнутом состоянии

Тогда

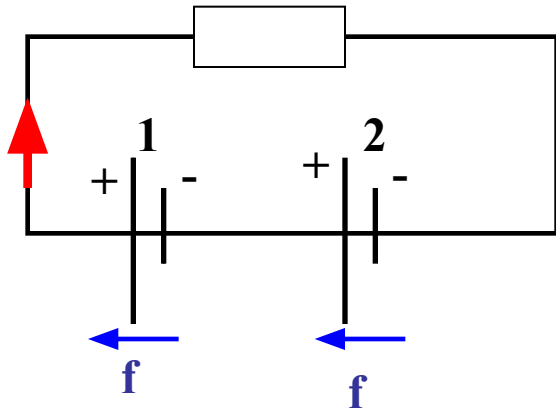
$$\mathcal{E} = \frac{A}{q_0} = \varphi_1^0 - \varphi_2^0$$

ЭДС источника тока равна разности потенциалов на его полюсах в разомкнутом состоянии

Если источник тока замкнут на внешнюю цепь, то разность потенциалов между его полюсами будет *меньше* ЭДС на величину падения напряжения $I \cdot r$ внутри самого источника:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \mathcal{E} - Ir$$

Если в цепи имеется несколько источников тока, то они могут быть включены последовательно или навстречу друг другу.

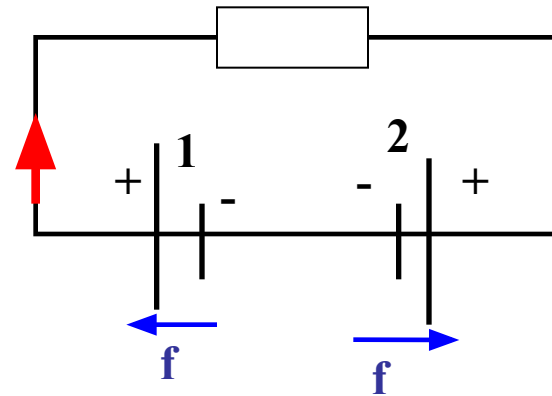


Сторонние силы действуют в направлении движения зарядов.

Работа $A > 0$

$$A = A_1 + A_2$$

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q} = \frac{A_1}{q} + \frac{A_2}{q} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$$



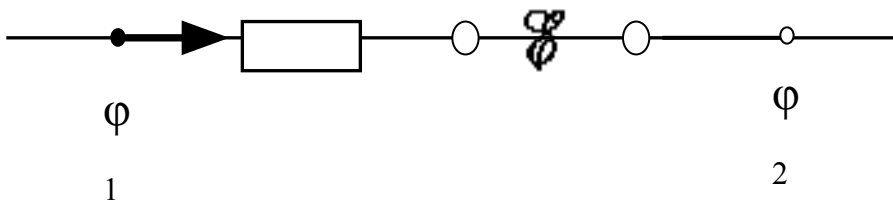
У 1-го источника сторонние силы действуют в направлении движения зарядов $\rightarrow A > 0$.

У 2-го источника сторонние силы направлены против движения зарядов $\rightarrow A < 0$

$$A = A_1 - A_2$$

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q} = \frac{A_1}{q} - \frac{A_2}{q} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$$

Выделим участок цепи, содержащий ЭДС.



$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}$$

Работа эл сил по переносу заряда

$A' = I^2 R \cdot t = q \cdot I \cdot R$ работа на сопротивлении участка (в виде тепла)

A'' - работа электростатических сил внутри источника ЭДС против сторонних сил. Она равна и противоположна по знаку работе сторонних сил.

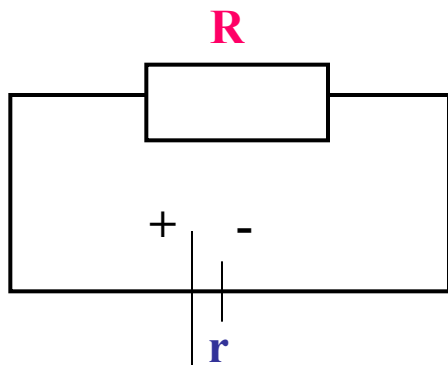
$A_{12} = q \cdot I \cdot R \pm A'' = q \cdot I \cdot R \pm A$, т.к. $A/q = \mathcal{E}$, тогда

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{qIR \pm A}{q} = IR \pm \mathcal{E}$$

откуда

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E}}{R}$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи (содержащего источник ЭДС)



Полная мощность, выделяемая в цепи равна

$$P_{\text{полн}} = I^2 \cdot R + I^2 \cdot r = I[I(R+r)] = I \cdot \mathcal{E}$$

Полезная мощность – только мощность, выделяемая во внешней цепи

$$P_{\text{полезн}} = I^2 R = I(I \cdot R) = I \cdot U$$

Тогда КПД будет равен:

$$\eta = \frac{P_{\text{полезн}}}{P_{\text{полн}}} = \frac{I \cdot U}{I \cdot \mathcal{E}} = \frac{U}{\mathcal{E}}$$

Максимальный кпд = 50%, когда внешнее сопротивление **R** равно внутреннему сопротивлению **r** источника тока.

Для расчета сил токов в разных участках сложных разветвленных цепей по заданным сопротивлениям этих участков и ЭДС источников тока пользуются **правилами Кирхгофа**.

Они выводятся на основании закона сохранения заряда и закона Ома.

Предполагается, что токи в цепи установившиеся, т.е $I, R, \mathcal{E} = \text{Const}$

Первое
правило

Алгебраическая сумма токов в участках цепи, сходящихся в любой точке разветвления равна нулю

$$\sum I_i = 0$$

Второе
правило

Алгебраическая сумма падений напряжений в замкнутом контуре равна алгебраической сумме ЭДС источников тока, находящихся в этом контуре

$$\sum I_i R_i = \mathcal{E} = \sum \mathcal{E}_i$$

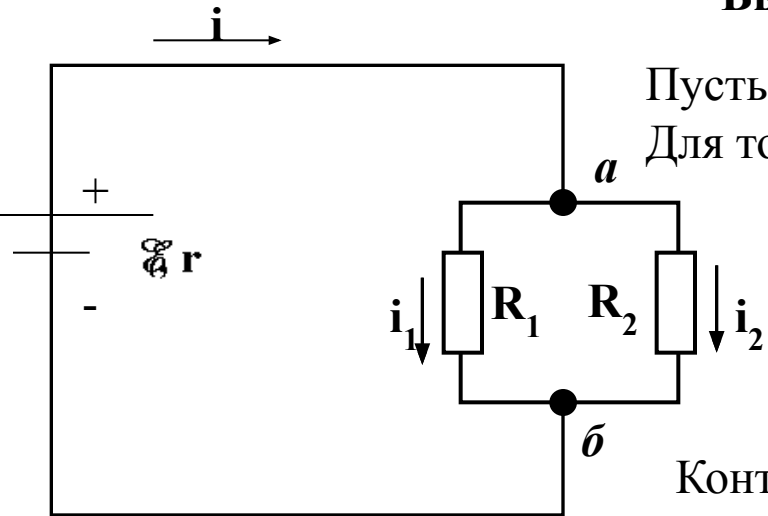
При использовании 1-го правила, соблюдаются следующее условие знаков:

- 1) Токи входящие в точку разветвления берут со знаком «плюс», выходящие из узла - со знаком «минус»

При использовании 2-го правила, обычно выбирается какое-либо направление обхода и соблюдаются следующие условия знаков:

- 1) Если токи текут по направлению обхода, то произведения $I_i R_i$ берут со знаком «плюс», если против - то со знаком «минус»
- 2) Если линия обхода направлена внутри источника тока от «-» полюса к «+», то его ЭДС берут со знаком «+», иначе - со знаком «-».

Вычислим силу тока в цепи



Пусть «+» направление тока – по часовой стрелке.
Для точки *a*) 1-е правило Кирхгофа дает:

$$i - i_1 - i_2 = 0 \quad (1)$$

Применим 2-е правило Кирхгофа:

Контур $aR_2бR_1a$ (обход по часовой стрелке)

$$-R_1 i_1 + R_2 i_2 = 0 \quad (2)$$

Контур $aR_1б \mathcal{E} a$ $ir + R_1 i_1 = \mathcal{E} \quad (3)$

$$\left. \begin{array}{l} (1) \rightarrow i_2 = i - i_1 \\ (2) \rightarrow i_2 = \frac{R_1}{R_2} i_1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} i - i_1 = \frac{R_1}{R_2} i_1; \\ \frac{i_1}{i} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow i_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i \end{array}$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Подставим это выражение в уравнение (3)

$$ir + R_1 i_1 = \mathcal{E}$$

$$i\left(r + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}\right) = \mathcal{E}$$

Это сопротивление
внешней цепи R

По закону Ома

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Тогда получаем

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

или

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

$$R = \frac{R_i}{n}$$

Формула для расчета сопротивления в случае
параллельного соединения проводников.

В случае соединения **n**
одинаковых проводников

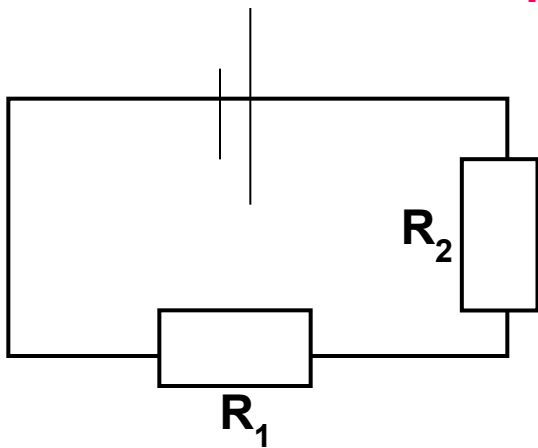
Законы параллельного соединения проводников

$$1. U_1 = U_2 = U$$

$$2. I = I_1 + I_2$$

$$3. 1/R = 1/R_1 + 1/R_2$$

Последовательное соединение проводников



Запишем 2-е правило Кирхгофа:

$$\mathcal{E} = ir + iR_1 + iR_2$$

$$\mathcal{E} = ir + i(R_1 + R_2)$$

$$\mathcal{E} = i[r + (R_1 + R_2)]$$

По закону Ома

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

тогда получаем

$$R = R_1 + R_2$$

В случае соединения n одинаковых проводников

$$R = nR_i$$

Законы последовательного соединения

$$1. U_1 + U_2 = U$$

$$2. I = I_1 = I_2$$

$$3. R_1 + R_2 = R$$