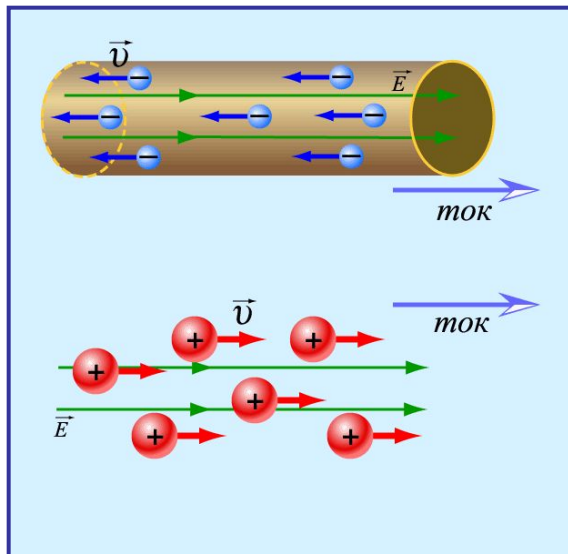


Лекция 2.

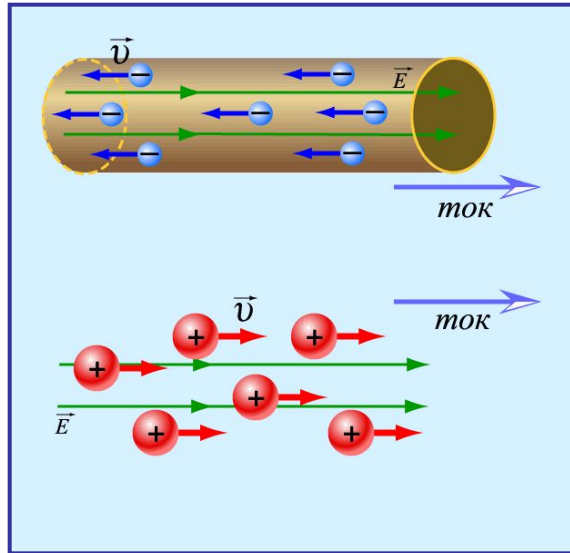
Электрический ток



1. Электрический ток проводимости в металлах, его характеристики и условия существования. Электродвижущая сила.
2. Сопротивление проводника. Закон Ома для однородного и неоднородного участков электрической цепи. Закон Ома для замкнутой цепи.
3. Работа и мощность тока. Закон Джоуля – Ленца в интегральной форме.
4. Правила Кирхгофа для расчета разветвленных электрических цепей.

Электрический ток

Электрический ток – непрерывное направленное упорядоченное движение заряженных частиц.



За направление электрического тока принято направление движения **положительных** свободных зарядов.

Почему появляется электрический ток?

□ Для возникновения и существования электрического тока необходимо выполнение двух условий:

- **наличие свободных носителей** зарядов $q = q_{\text{своб}}$ (т.е. вещество должно быть проводником или полупроводником при высоких температурах),
- **наличие внешнего** электрического поля с напряженностью E .

□ В результате на **свободные** заряды **в проводнике** будет действовать сила $F = qE$, вызывающая **перемещение свободных зарядов**.

Этот процесс **закончится** тогда, когда **собственное электрическое поле зарядов**, возникших на поверхности проводника, **полностью скомпенсирует** внешнее поле.

- **Результирующее электростатическое поле** внутри проводника **будет равно нулю**.

□ Однако, **в проводниках при определенных условиях** может возникнуть **непрерывное упорядоченное движение** свободных носителей электрического заряда.

□ Такое движение называется **электрическим током**.

Вывод: Для существования **электрического тока** в проводнике **необходимо создать** в нём **электрическое поле**.

Сила электрического тока

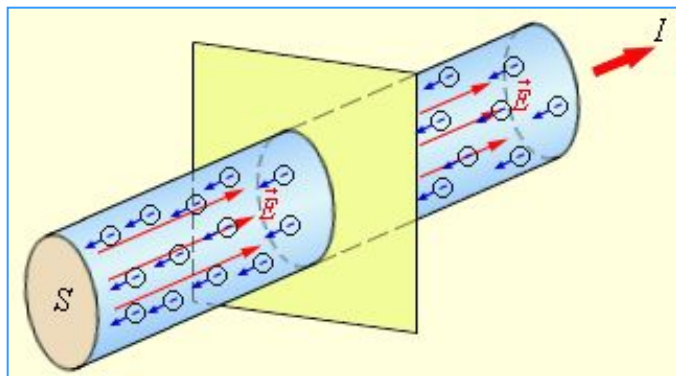
Сила тока I – скалярная физическая величина, равная отношению заряда dq , переносимого через поперечное сечение проводника за интервал времени dt , к этому интервалу времени:

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Общий случай

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

Для постоянного тока



За направление электрического тока принято направление движения **положительных** свободных зарядов.

Это **количественная мера электрического тока**, которая имеет **физический смысл скорости переноса заряда** и выражается в **Амперах** (А):

$$I = \left[\text{Ампер} = A = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}} \right]$$

- **Постоянный электрический ток** - электрический ток, сила тока и направление которого **не изменяются** со временем.
- **Переменный электрический ток** - электрический ток, сила тока и направление которого **изменяются с течением времени**.

Ампер – это очень большая величина. **Смертельна для человека** сила тока $I=200 \text{ мА} = 0,2 \text{ А}$ в течении **нескольких секунд**

Плотность электрического тока $\vec{j}$ («жи») – это векторная физическая величина, численно равная силе тока dI , проходящего через единицу площади dS , перпендикулярной к току:

$$\vec{j} = \frac{I}{S} \vec{n}$$

для постоянного тока

Общий случай

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS} \vec{n}$$

- За направление вектора $\vec{j}$ принимают **направление вектора скорости $\vec{v}$** и упорядоченного движения **положительных носителей** (или **направление, противоположное** направлению вектора скорости упорядоченного движения **отрицательных носителей**).

Условия прохождения постоянного электрического тока

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**, а **работа электрических сил равна нулю**.

Поэтому:



Обозначения на электрических
схемах

постоянного тока и **лампочка**.

1. Для существования постоянного тока необходимо **наличие** в электрической цепи **устройства**, способного **создавать и поддерживать разности потенциалов** на участках цепи **за счет работы сил неэлектрического происхождения** - **источника постоянного тока**.

2. **Силы неэлектрического происхождения**, действующие на свободные носители заряда со стороны источников тока, называются **сторонними силами**.

Источники постоянного тока:

1. Аккумуляторы
2. Электрические батареи
3. Выпрямители переменного электрического тока
4. Пьезоэлектрики и т.д.

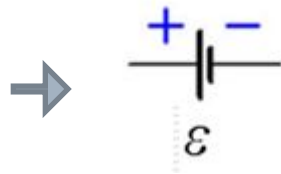
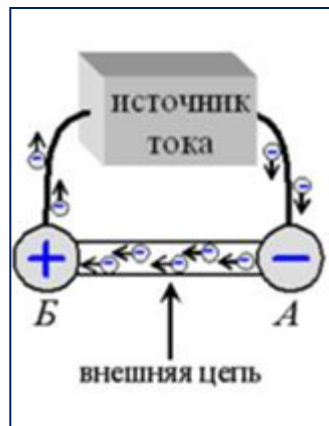
Понятие электродвижущей силы

При перемещении электрических зарядов по цепи постоянного тока **сторонние силы**, действующие внутри источников тока, **совершают работу**.

Электродвижущая сила источника (ЭДС) $\mathcal{E}$ - отношение работы $A_{ст}$ сторонних сил при перемещении заряда q от отрицательного полюса источника тока к положительному к величине этого заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}$$

Измеряется в СИ **в Вольтах (В)**, как и разность потенциалов.



Обозначение на
схемах
источника
постоянного тока

замкнутая электрическая цепь с
ЭДС

- **Природа сторонних сил** может быть **различной**.
- Сторонние силы возникают:
 - **в гальванических элементах** или **аккумуляторах** в результате электрохимических процессов,
 - **в генераторах постоянного тока** при движении проводников в магнитном поле.
- **Источник тока** в электрической цепи играет ту же роль, что и **насос**, который необходим **для перекачивания** жидкости в замкнутой гидравлической системе.
- **Под действием сторонних сил** электрические **заряды** движутся внутри источника тока **против сил электростатического поля**, благодаря чему в замкнутой цепи может поддерживаться постоянный электрический ток.

При перемещении электрических **зарядов** по цепи постоянного тока **сторонние силы**, действующие внутри источников тока, **совершают работу**.

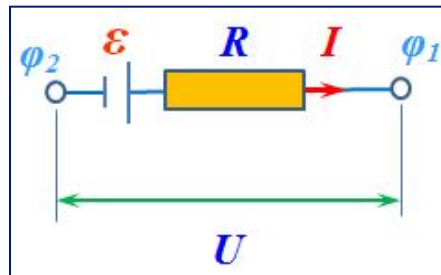
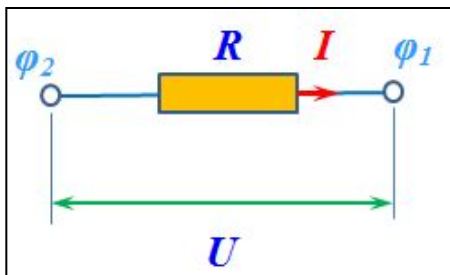
Вывод: при перемещении единичного положительного **заряда по замкнутой цепи** постоянного тока **работа сторонних сил равна сумме ЭДС**, действующих в этой цепи, а **работа электростатического поля равна нулю**.

Напряжение для участка цепи постоянного тока

Цепь постоянного тока можно разбить на отдельные участки:

Однородные участки

– это те, на которых **не действуют сторонние силы** (участки, **не содержащие** источники тока).



Неоднородные участки

– это те, на которых **действуют сторонние силы** (участки, **содержащие** источники тока).

- При перемещении **единичного положительного заряда** по некоторому участку цепи **работу совершают** как **электростатические** (кулоновские), так и **сторонние силы**.
- Работа **электростатических сил** равна разности потенциалов $\Delta\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ между начальной (1) и конечной (2) точками **неоднородного участка**.
- Работа **сторонних сил** равна по определению электродвижущей силе $\mathcal{E}_{12}$, действующей на данном участке. Поэтому **полная работа** равна:

Величину U_{12} принято называть **напряжением** на участке цепи 1–2.

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}$$

для единичного положительного заряда $q=1$

Для однородного участка напряжение равно разности потенциалов:

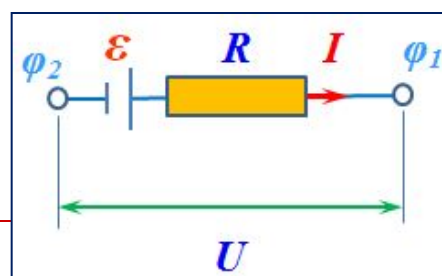
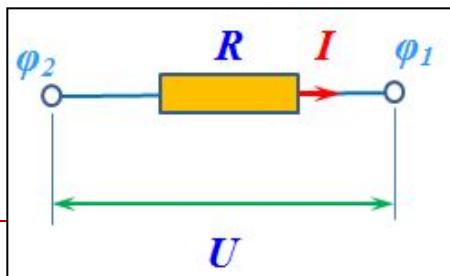
$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

Запомните:

Однородные участки

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

Напряжение



Неоднородные участки

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}$$

Напряжение



Ом Георг Симон
1789-1854

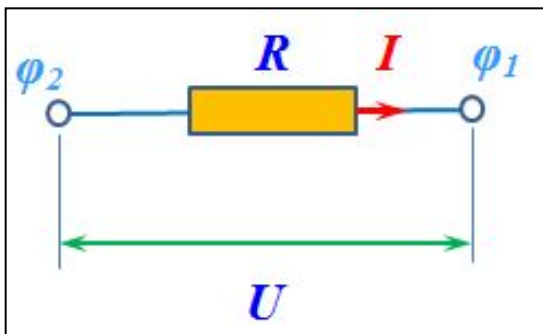
Закон Ома для участка цепи

- Немецкий физик Г. Ом в 1826 году экспериментально установил, что сила тока I , текущего по однородному металлическому проводнику (т. е. проводнику, в котором **не действуют сторонние силы**), пропорциональна напряжению U на концах проводника:

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

где $R = \text{const}$ и называется **электрическим сопротивлением**

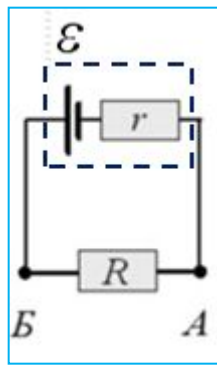
- В СИ единицей **электрического сопротивления** R проводников служит **Ом** [**Ом=Вольт/Ампер**]:
 - сопротивлением в **1 Ом** обладает такой участок цепи, в котором при напряжении **1 В** возникает ток силой **1 А**.
- Проводник, обладающий электрическим сопротивлением, называется **резистором**.
- Данное соотношение выражает **закон Ома для однородного участка** цепи: сила тока I в проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению U и обратно пропорциональна сопротивлению R металлического проводника.
- **Проводники, подчиняющиеся** закону Ома, называются **линейными**. Графическая зависимость силы тока I от напряжения U (такие графики называются **вольт-амперными характеристиками**) изображается прямой линией, проходящей через начало координат.



Для участка цепи, содержащего ЭДС,
закон Ома записывается в следующей форме:

$$IR = U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}$$

Обобщенный закон Ома для участка цепи или **закон Ома для неоднородного участка цепи**.



Закон Ома для замкнутой цепи в интегральной форме

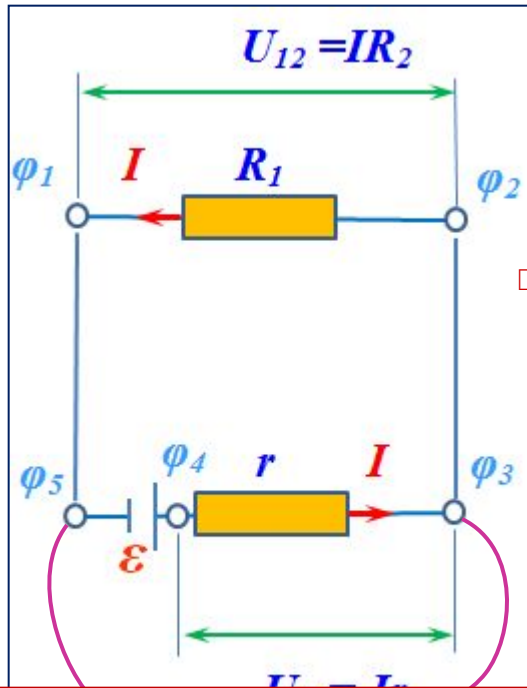
□ Источник тока обладает внутренним сопротивлением r . В этом случае участок **A-B** или $(\varphi_3 - \varphi_5)$ является внутренним участком источника.

□ Запомните **физический смысл ЭДС**: ЭДС – это **сумма падений напряжений** в замкнутой цепи.

□ Тогда для замкнутой цепи цепь постоянного тока:

$$\mathcal{E} = U_{12} + U_{34} = IR + Ir = I(R + r)$$

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



□ Эта формула выражает **закон Ома для полной (замкнутой) цепи**: сила тока в **полной цепи** равна электродвижущей силе

источника $\mathcal{E}$, деленной на сумму сопротивлений внешнего (однородного) и внутреннего (неоднородного) участков замкнутой цепи.

Если точки φ_3 и φ_5 замкнуть проводником, **сопротивление которого мало** по сравнению с внутренним сопротивлением источника ($R \ll r$), тогда в цепи потечет **ток короткого замыкания**:

$$I_{кз} = \frac{\mathcal{E}}{r}$$

У источников с **малым внутренним сопротивлением** r ток короткого замыкания $I_{кз}$ может быть **очень велик** и вызывать **разрушение электрической цепи** или **источника**.

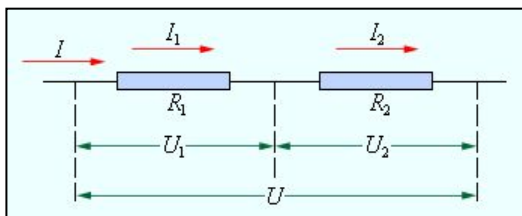
Например, у **свинцовых аккумуляторов**, используемых в **автомобилях**, сила тока короткого замыкания $I_{кз}$ может составлять несколько **сотен ампер**. Особенно **опасны** короткие замыкания в **осветительных сетях**, питаемых от подстанций (**тысячи ампер**).

Чтобы избежать разрушительного действия таких **больших токов**, в цепь **включаются предохранители** или **специальные автоматы защиты** сетей.

Параллельное и последовательное соединения проводников

- Чтобы **получить желаемую силу тока** при нужном рабочем напряжении, располагая определенными резисторами, **проводники соединяют определенным образом**.

Соединения проводников



Последовательное соединение

Для всех проводников (резисторов)
сила тока I одинаковая

Напряжение на проводниках:

$$U_1 = IR_1$$

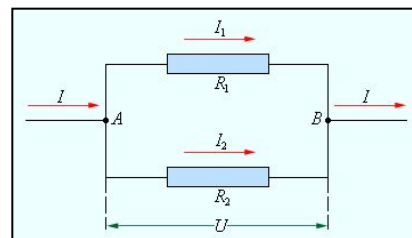
$$U_2 = IR_2$$

Суммарное напряжение будет равно сумме напряжений на отдельных конденсаторах:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i = I \sum_{i=1}^n R_i$$

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i$$

Вывод: При **последовательном** соединении **полное сопротивление** цепи **равно сумме сопротивлений отдельных** проводников.



Параллельное соединение

Для всех резисторов **напряжение U одинаковое**

Силы токов на проводниках:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2}$$

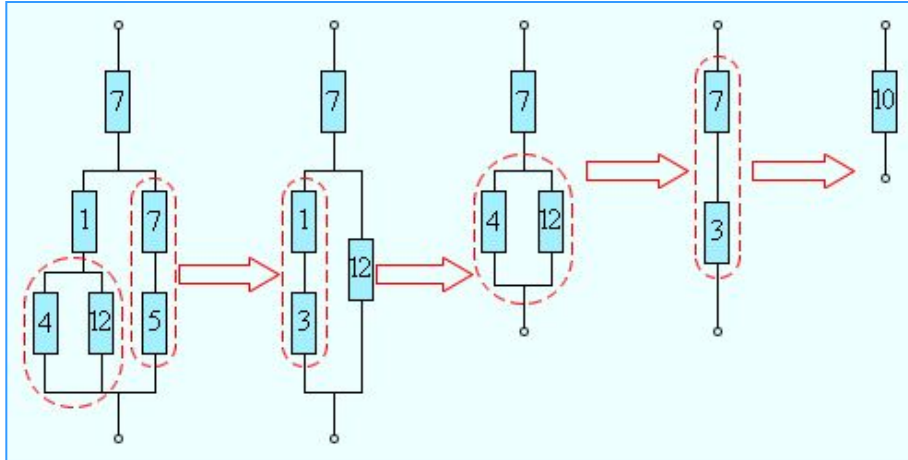
Общая сила тока будет равно сумме токов на отдельных резисторах:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \sum_{i=1}^n I_i$$

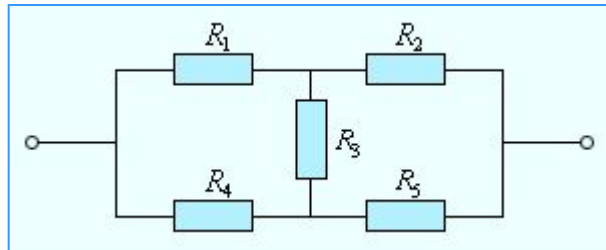
$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Вывод: при **параллельном** соединении проводников величина, **обратная общему сопротивлению** цепи, равна **сумме** величин, **обратных сопротивлениям** параллельно включенных проводников

Более сложные соединения проводников



- Формулы для последовательного и параллельного соединения проводников позволяют во многих случаях рассчитывать сопротивление сложной цепи, состоящей из многих резисторов.
- На рисунке приведен пример такой сложной цепи и указана последовательность вычислений.

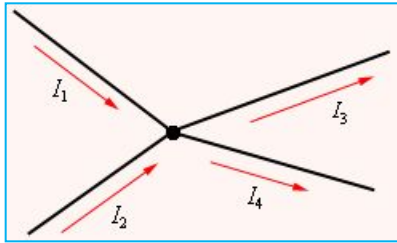


- Следует отметить, что далеко **не все сложные цепи**, состоящие из проводников с различными сопротивлениями, **могут быть рассчитаны** с помощью формул для последовательного и параллельного соединения.
- На рисунке приведен пример электрической цепи, которую нельзя рассчитать указанным выше методом.

- **Цепи**, подобные изображенной на рисунке, а также **цепи с разветвлениями**, содержащие **несколько источников**, **рассчитываются с помощью правил Кирхгофа**.

Расчет разветвленных цепей, например нахождение токов в отдельных ее ветвях, значительно упрощается, если пользоваться двумя правилами Кирхгофа.

Правила Кирхгофа



- **Первое правило Кирхгофа** — оно относится к узлам цепи, т. е. к точкам ее разветвления: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

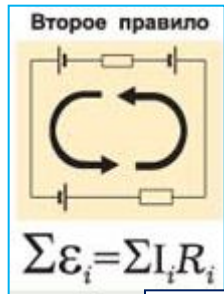
$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$

При этом токи, **текущие к узлу**, и токи, **исходящие из узла**, следует считать величинами **разных знаков**, например: первые — **положительными**, вторые — **отрицательными** (или наоборот — это не существенно).

Уравнение является **следствием условия стационарности**:

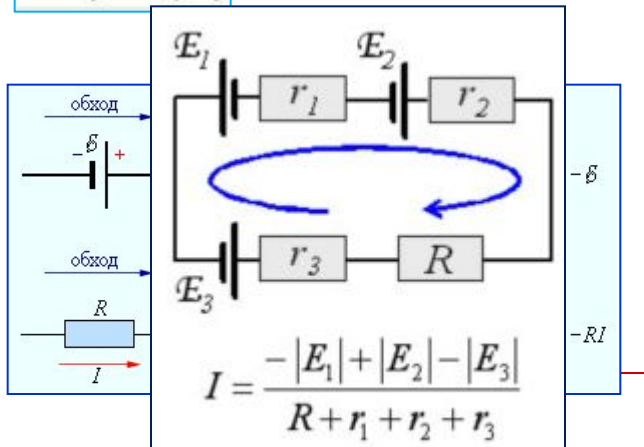
$$\text{div} \vec{j} = 0$$

Если бы это было не так, в узле **изменялся бы заряд** и **токи не были бы стационарными**



- **Второе правило Кирхгофа** — относится к **любому** выделенному в разветвленной цепи **замкнутому контуру**: алгебраическая сумма произведений сил токов в отдельных участках произвольного замкнутого контура на их сопротивления равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре:

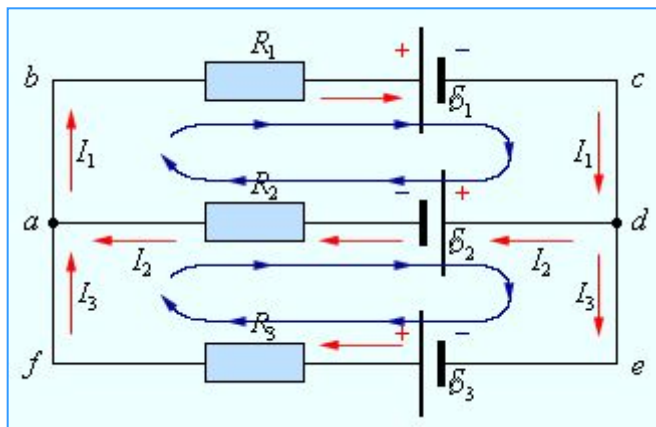
$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i$$



- Если предположительное **направление тока совпадает** с выбранным направлением обхода, то соответствующее слагаемое **IR** в уравнении надо брать со знаком **«плюс»**, **если** же эти **направления противоположны**, то со знаком **«минус»**.
- **Аналогично** следует поступать и с ЭДС: **если** какая-то ЭДС **повышает потенциал в направлении обхода**, ее надо брать со знаком **«плюс»**, в противном случае — со знаком **«минус»**.

Составление системы уравнений

- **При расчете сложных цепей** постоянного тока с применением правил Кирхгофа необходимо:
 1. **Выбрать произвольное направление токов** на всех участках цепи; действительное направление токов определится при решении задачи; если искомый ток получился положительным, то направление выбрано правильно, если отрицательным, то его истинное направление противоположно выбранному.
 2. **Выбрать направление обхода контура.** Произведение положительно, если ток на данном участке совпадает с направлением обхода, и наоборот. ЭДС положительны, если они создают ток направленный в сторону обхода контура, против - отрицательны.
 3. **Записывается первое правило** для $N - 1$ узла.
 4. **Записать второе правило Кирхгофа** для замкнутых контуров, которые могут быть выделены в цепи. Каждый рассматриваемый контур должен содержать хотя бы один элемент, не содержащийся в предыдущих контурах.
- **Число независимых уравнений**, составленных в соответствии с первым и вторым правилом Кирхгофа, **равно числу различных токов**, текущих в разветвленной цепи.
- Поэтому, если заданы ЭДС и сопротивления для всех неразветвленных участков, то могут быть вычислены все токи.



Пример: составим систему уравнений для данной схемы

1 правило Кирхгофа для точки **a**:

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

2 правило Кирхгофа для контура **abcd**:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = -\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$$

2 правило Кирхгофа для контура **ade**:

$$-I_2 R_2 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3$$

Работа и мощность тока для участка цепи



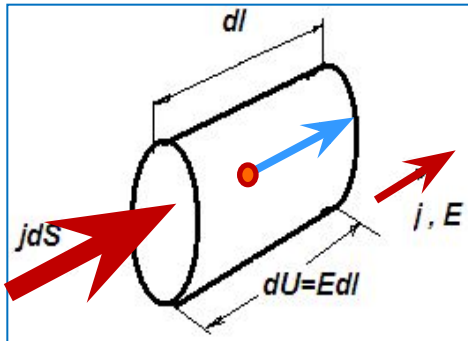
При прохождении тока через проводник

1. Проводник нагревается
2. У проводника появляются магнитные свойства

При прохождении тока через электролит

1. Электролит нагревается
2. Электролит участвует в электролизе

- Допустим, требуется найти количество теплоты, выделяющееся за единицу времени на определенном участке цепи проводника.



Мощность - работа, совершаемая в единицу времени:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{dA}{dt} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

- Пусть интересующий нас участок заключен между сечениями **1** и **2** проводника.
- Найдем работу, которую совершают силы поля над носителями тока на участке **1-2** за время **dt**. Если сила тока в проводнике равна **I**, то за время **dt** через каждое сечение проводника пройдет заряд **dq = Idt**.
- Поэтому **совершаемая** при таком переносе **работа сил поля** равна:

$$dA = (\varphi_1 - \varphi_2) dq = U dq = UI dt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt$$

- Если **ток проходит по неподвижному проводнику**, то вся работа тока идет **на нагревание** металлического проводника, и по закону сохранения энергии **dQ = dA**, поэтому:

$$\delta Q = UI dt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt$$

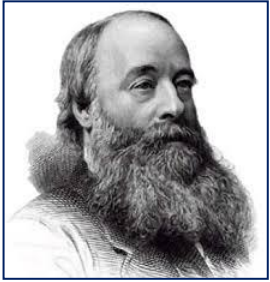
Закон Джоуля – Ленца

13

+9

Зависит от нескольких переменных

Интегральный закон Джоуля – Ленца



Джоуль Джеймс
1818-1889

$$Q = \int_0^t \delta Q = \int_0^t RI^2 dt = RI^2 t$$

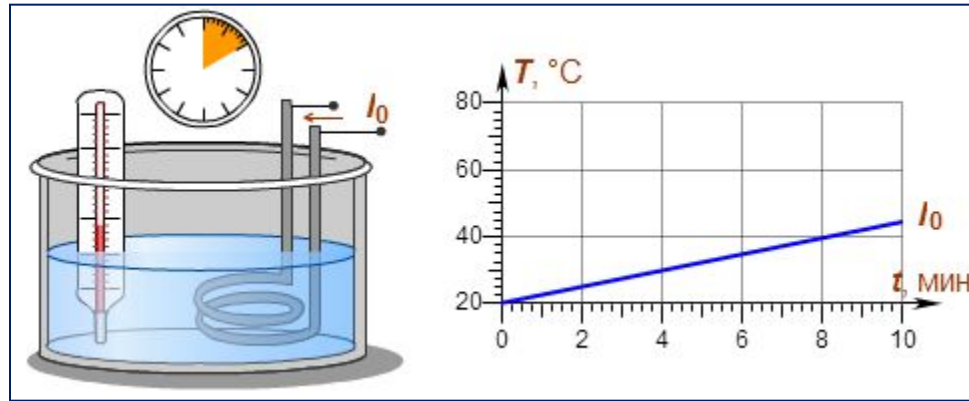


$$Q = RI^2 t = \frac{U^2}{R} t = UI t$$

Интегральный закон Джоуля – Ленца

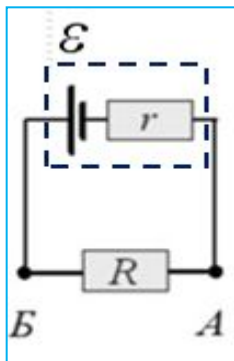


Ленц Эмилий
Христианович
1804_1865



- На графике приведена зависимость **количества теплоты Q** , выделившегося на проводнике, от времени нагревания проводника: **Q прямо пропорционально** времени **t** .
- **Закон Джоуля – Ленца в интегральной форме**: **количество теплоты Q** , выделившееся при прохождении тока через проводник, **пропорциональна** электрическому **сопротивлению R** проводника и **квадрату силы тока I** в проводнике.

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



Мощность, выделяемая в замкнутой цепи

- **Внешняя цепь** может представлять собой не только проводник с сопротивлением R , но и какое-либо устройство, потребляющее мощность, например, электродвигатель постоянного тока.
- В этом случае под R нужно понимать **эквивалентное сопротивление нагрузки**.
- **Энергия**, выделяемая во внешней цепи, может частично или полностью **преобразовываться** не только **в тепло**, но и в **другие виды энергии**, например, в механическую работу, совершаемую электродвигателем.
- Поэтому вопрос об использовании энергии источника тока имеет большое практическое значение.

Полная мощность источника, то есть работа, совершаемая **сторонними силами** за единицу времени:

$$P_{\text{СторСил}} = P_{\text{ист}} = \mathcal{E}I = \frac{\mathcal{E}^2}{R+r}$$

Во внешней цепи выделяется **мощность P** :

$$P_{\text{ЭлСил}} = RI^2 = \mathcal{E}I - rI^2 = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2}$$

Коэффициент полезного действия источника:

Зависимость мощности **источника $P_{\text{ист}}$** , мощности во внешней цепи P и КПД источника η от силы тока I

$$\eta = \frac{P_{\text{Полн}}}{P_{\text{СторСил}}} = \frac{P}{P_{\text{ист}}}$$



$$\eta = \frac{P}{P_{\text{ист}}} = 1 - \frac{r}{\mathcal{E}} I = \frac{R}{R+r}$$

Из приведенных графиков видно:

при $R = r$

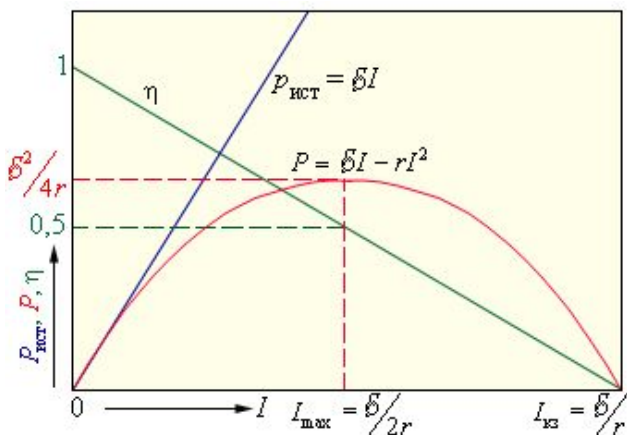


$$P_{\text{max}} = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2} = \frac{\mathcal{E}^2 r}{(r+r)^2} = \frac{\mathcal{E}^2 r}{4r^2} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}$$

При этом ток в цепи:

$$I_{\text{max}} = \frac{1}{2} I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{2r}$$

а КПД источника равен **50 %**.



- При коротком замыкании полезная мощность $P = 0$ и **вся мощность выделяется внутри источника**, что может привести **к его перегреву** и **разрушению**.
- КПД источника при этом **обращается в нуль**.

Спасибо за внимание!

