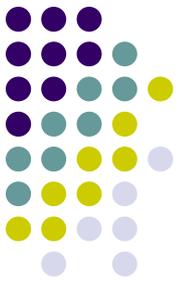


Электричество и магнетизм



Лекция 1. Электростатика.

Потенциал.

Работа электрического поля.

Емкость.

Постоянный и переменный ток.

Электромагнитное поле - переносчик силовых взаимодействий между частицами.

Электромагнитное поле также является носителем информации в современных информационных системах (связи, радио- и телевидения и т.д.).

Согласно фундаментальному принципу физики - принципу близкодействия - взаимодействие между частицами-носителями заряда переносится электромагнитным полем в пространстве с конечной скоростью.

Эта скорость называется скоростью света.



Электрический заряд – это внутреннее свойство тел или частиц, характеризующее их способность к электромагнитным взаимодействиям.

Элементарные заряженные частицы отождествляют с их электрическими зарядами.

Элементарные носители заряда:

– электрон ($m=9.11 \cdot 10^{-31}$ кг)

- протон ($m=1.67 \cdot 10^{-27}$ кг)

В системе СИ электрический заряд измеряется в кулонах (Кл).

Заряд электрона $1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Электрический заряд любого заряженного тела кратен модулю заряда электрона (элементарному - минимальному) электрическому заряду Кл.

Электрические заряды атомов и молекул равны нулю, а заряды положительных и отрицательных ионов в каждой ячейке кристаллических решеток твердых тел скомпенсированы.

Возникновение зарядовых систем обусловлено разделением зарядов, возникающим, например, при трении.



Электромагнитное поле, создаваемое неподвижными зарядами (в этой системе отсчета) называется **электростатическим**.

Электростатическое поле – физическая идеализация, т.к. после образования зарядовой системы передача взаимодействия между зарядами закончилось.

Точечным зарядом называется заряженное тело или частица, размеры которого (которой) пренебрежимо малы по сравнению с расстояниями до других зарядов рассматриваемой системы.

Пробным зарядом называется положительный точечный заряд, который вносится в данное электромагнитное поле для измерения его характеристик. Покоящийся пробный заряд является индикатором электрического поля.



Закон взаимодействия точечных зарядов (закон Кулона)

экспериментально установлен Ш. Кулоном
в 1785г.

Для точечных зарядов в вакууме
(или воздухе) сила взаимодействия дается
формулой:

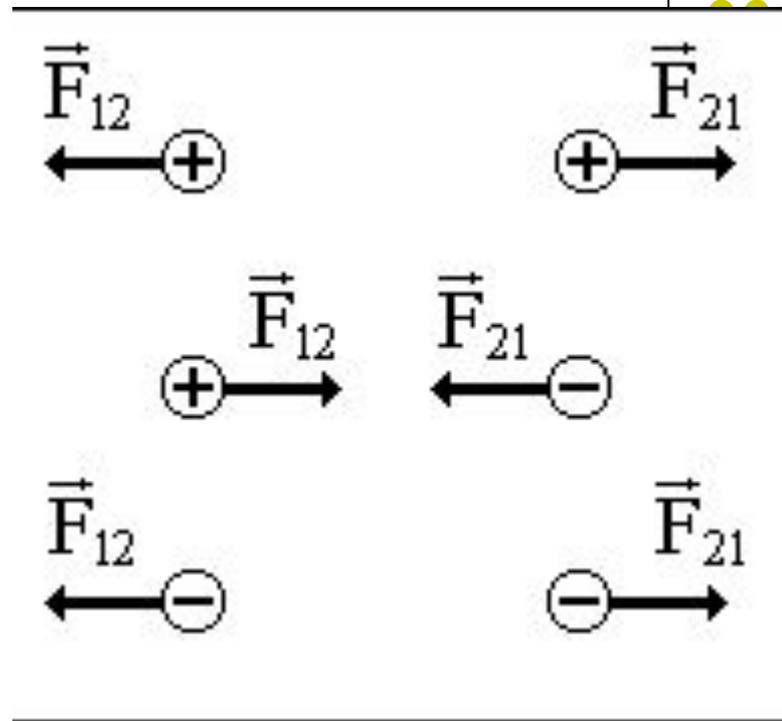
$$\mathbf{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r_{12}^3} \mathbf{r}_{12}$$



Сочетания взаимодействующих зарядов (по третьему закону Ньютона):



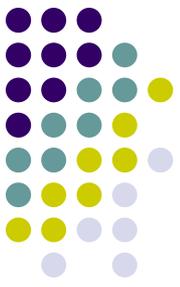
$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$



Коэффициент в законе Кулона в системе СИ равен: $\epsilon_e = 9 \cdot 10^9 \text{ н/Ф}^2$

Записывается в виде:

$$\epsilon_e = 1 / 4\pi\epsilon_0\epsilon$$



Напряженностью электрического поля (электростатического)

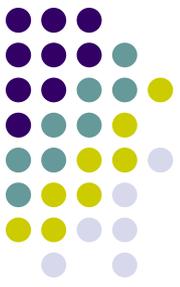
называется сила, действующая со стороны электромагнитного поля на пробный заряд q , покоящийся в точке (x, y, z) , отнесенная к величине этого заряда:

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{\mathbf{F}_q(x, y, z)}{q}$$



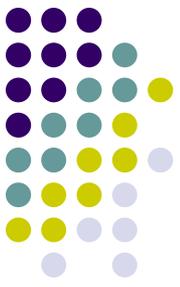
Зная \mathbf{E} как функцию координат
нетрудно найти силу,
действующую
в данном поле
на данный заряд в любой точке:

$$\mathbf{F}_q = q\mathbf{E}$$



Из закона Кулона и определения следует, что напряженность электростатического поля, созданного точечным зарядом Q на расстоянии r от него равна:

$$\mathbf{E} = k_e \frac{Q\mathbf{r}}{r^3}$$



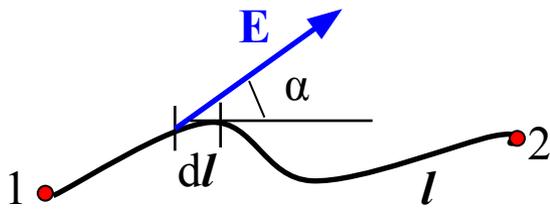
Вывод:

- Электростатическое поле создается точечными зарядами (любое заряженное тело можно рассматривать как систему микроскопических заряженных частиц);
- Сила, действующая на пробный заряд со стороны произвольного электростатического поля, есть сумма сил, действующих на пробный заряд со стороны каждого точечного источника.

Принцип суперпозиции - сумма полей точечных зарядов в точке, удаленной на расстояние

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^N \mathbf{E}_i = \sum_{i=1}^N k_e \frac{q_i}{r_i^3} \mathbf{r}_i$$

Работа перемещения заряда в электрическом поле



Работа перемещения на участке dl , совершаемая силой $F=q_0 \cdot E$, действующей на переносимый заряд q_0 равна:

$$A=q_0 \cdot E \cdot dl \cdot \cos \alpha$$

Полная работа переноса заряда q_0 из **1** в **2** равна:

$$A_{12} = q_0 \int_1^2 E dl \cos \alpha$$

Эта работа может быть как положительной, так и отрицательной

положительная работа - совершается силами поля

отрицательная работа - совершается внешними силами

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q_0} = \int_1^2 E \cos \alpha dl$$

разность потенциалов



Если одна из точек расположена в пространстве, где поля нет, тогда $\varphi_2=0$

$$\varphi_1 = \int_1^{\infty} E \cos \alpha dl$$

Потенциал данной точки электрического поля равен отношению работы переноса пробного заряда из данной точки поля в другую точку, где электрическое поле отсутствует (например, в бесконечность), к величине переносимого заряда

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

$$\varphi = \frac{A_0}{q_0}$$

$$\varphi = \frac{A_0}{q_0}$$



Потенциал – скалярная величина, зависит от знака работы переноса A_0

Потенциалы всех точек поля вокруг положительных зарядов - **положительные**
отрицательных зарядов - **отрицательные**

Разность потенциалов между двумя точками равна 1 В (вольту), если работа переноса одного кулона электричества из одной точки в другую равна одному джоулю:

$$1 \text{ ВОЛЬТ} = \frac{1 \text{ джоуль}}{1 \text{ кулон}}$$

$$1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$$

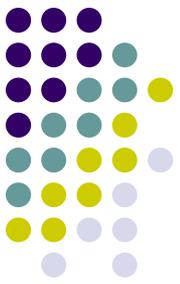
В атомной физике работа перемещения элементарных зарядов в электрическом поле измеряется в электрон-вольтах (эВ)

1эВ равен работе перемещения электрона, если разность потенциалов начальной и конечной точек перемещения равна **1В**

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

Потенциал φ_{∞} поля точечного заряда q_0 на расстоянии r от него относительно бесконечно удаленной точки вычисляется следующим образом:

$$\varphi = \varphi_{\infty} = \frac{1}{q} \int_r^{\infty} E dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_r^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$



Как следует из теоремы Гаусса, эта же формула выражает потенциал поля однородно заряженного шара (или сферы) при $r \geq R$, где R – радиус шара.

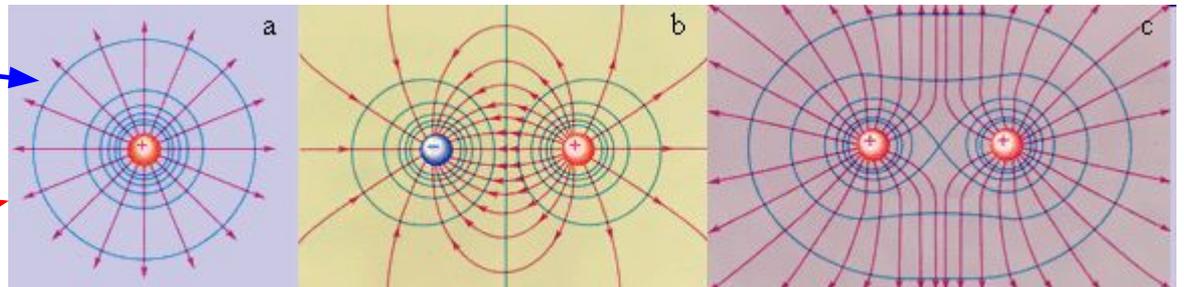
Для наглядного представления электростатическое поля наряду с силовыми линиями используют эквипотенциальные поверхности.

Поверхность, во всех точках которой потенциал электрического поля имеет одинаковые значения, называется **эквипотенциальной поверхностью** или **поверхностью равного потенциала**.

Силовые линии электростатическое поля всегда перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям. Эквипотенциальные поверхности кулоновского поля точечного заряда – концентрические сферы.

Эквипотенциальные поверхности

Силовые линии



Работа перемещения некоторого заряда из одной точки поля в другую равна произведению этого заряда на разность потенциалов начальной и конечной точек перемещения:

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

Если пробный заряд q совершил малое перемещение Δl вдоль силовой линии из точки (1) в точку (2), то можно записать:

$$\Delta A_{12} = q \cdot E \cdot \Delta l = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = -q \cdot \Delta \varphi$$

Отсюда следует

$$E = -\frac{\Delta \varphi}{\Delta l} (\Delta l \rightarrow 0); \quad E = -\frac{d\varphi}{dl}$$

Это соотношение в скалярной форме выражает связь между напряженностью поля и потенциалом. l – координата, отсчитываемая вдоль силовой линии.

Напряженность в данной точке поля равна изменению потенциала на единицу длины вдоль нормали к эквипотенциальной поверхности, проходящей через эту точку
(«минус» показывает направление в сторону убывания потенциала)



Потенциал φ_{∞} поля точечного заряда q_0 на расстоянии r от него относительно бесконечно удаленной точки вычисляется следующим образом:



$$\varphi_1 = \int_1^{\infty} E \cos \alpha dl$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad \cos \alpha = +1; \quad dl = dr$$

$$\varphi = \int_r^{\infty} E \cos \alpha dl = \int_r^{\infty} E dr = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_r^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

потенциал точечного заряда по абсолютной величине убывает обратно пропорционально расстоянию.

$$\varphi = \frac{W_p}{q_0}$$

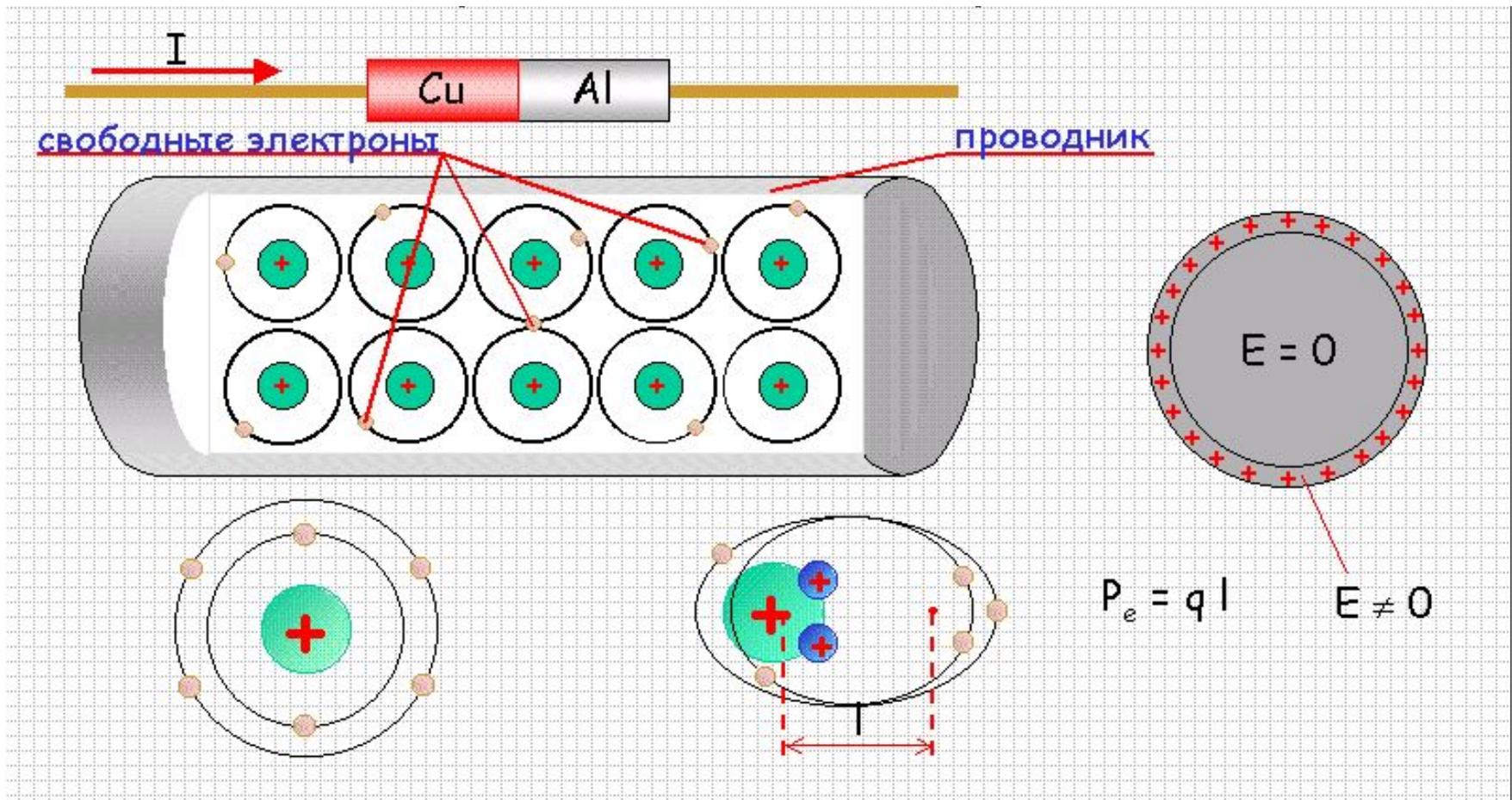
потенциал данной точки поля точечного заряда численно равен потенциальной энергии системы, состоящей из заряда q и единичного заряда q_0 , помещенного в эту точку поля

Проводники в электрическом поле

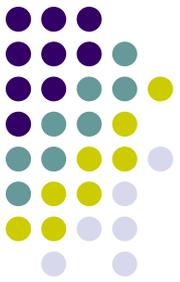


Проводники – вещества, содержащие свободные электроны.

1. Электростатическое поле внутри однородного заряженного проводника отсутствует.

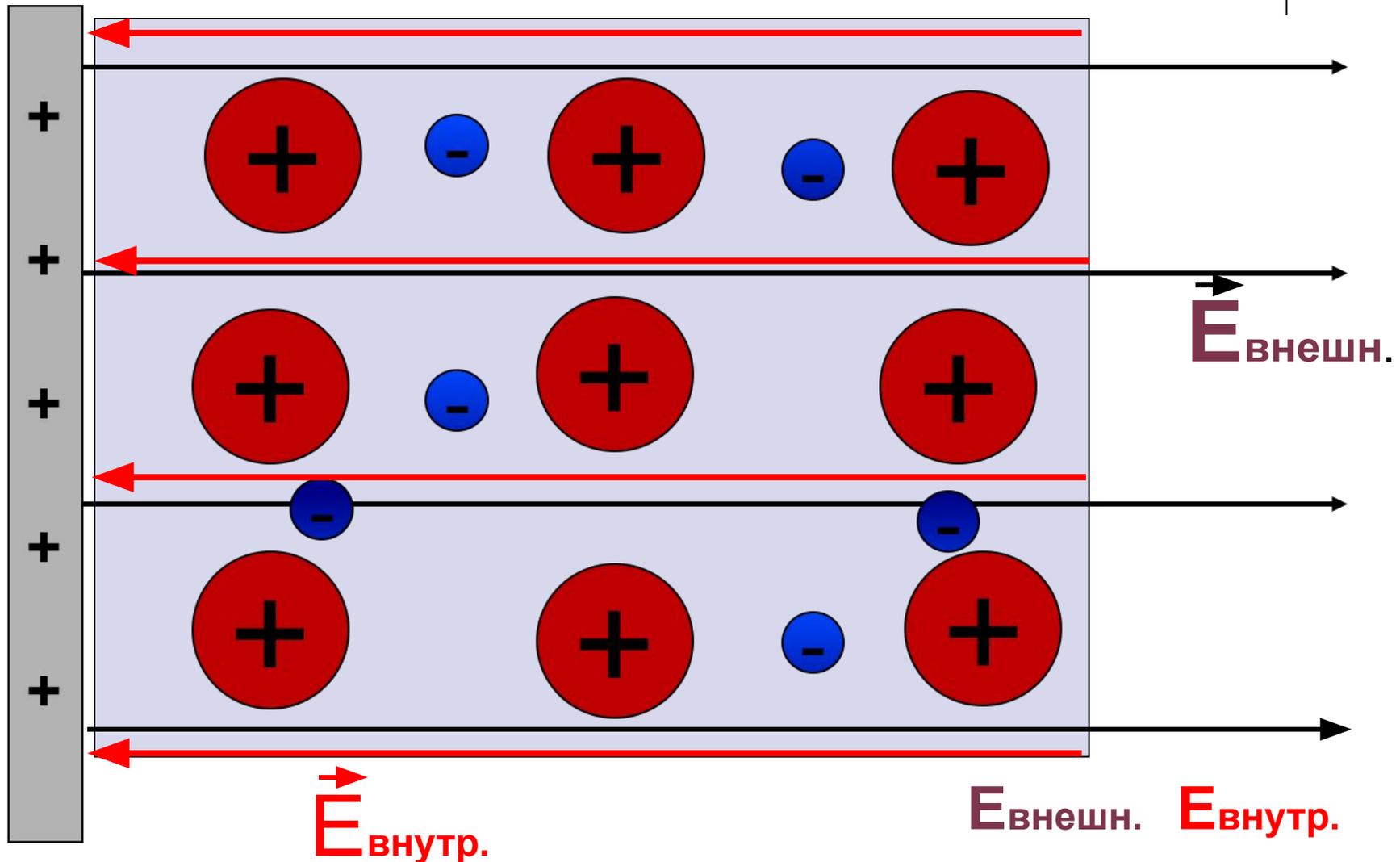


Внутри заряженных проводников поле равно нулю



- Если проводник заряжен, то есть на нем находится избыточный заряд какого - либо знака, то из-за того, что одноименные заряды отталкиваются, они будут стремиться занять как можно больший объем и окажутся все на поверхности проводника.
- Наличие поля внутри привело бы к непрерывному движению зарядов до тех пор, пока поле не исчезло бы. Таким образом, *внутри заряженного проводника электростатическое поле отсутствует.* Потенциал внутри проводника постоянен.

Металлический проводник в электростатическом поле

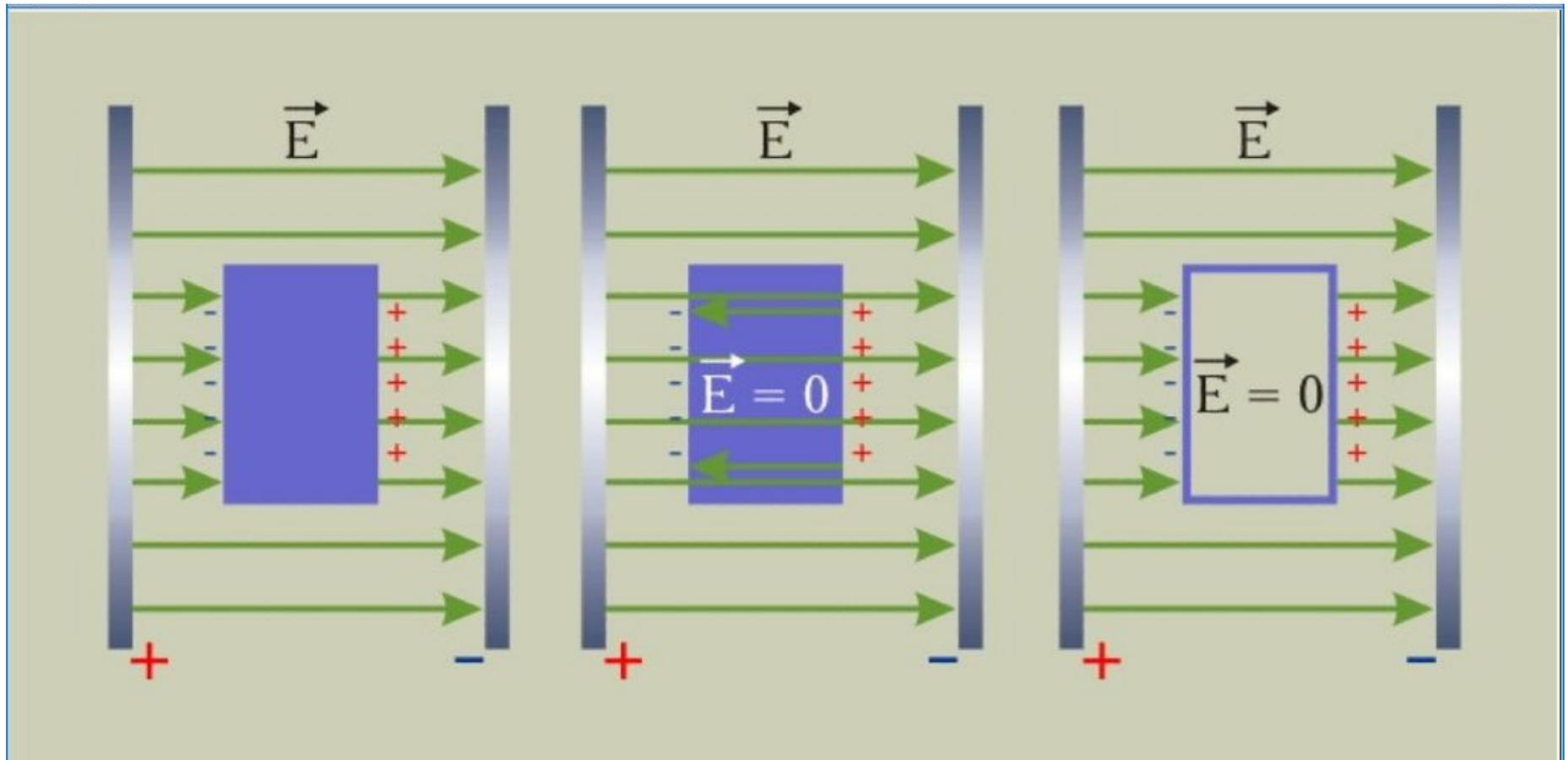


2. Явление электростатической индукции



- Если проводник поместить во внешнее электрическое поле, то начнется перемещение свободных зарядов таким образом, что положительные заряды скапливаются на одной стороне, а отрицательные - на противоположной.
- Перераспределение зарядов будет происходить до тех пор, пока поле, созданное этими зарядами, не компенсирует внешнее поле. Если в этот момент разделить проводник плоскостью, перпендикулярной внешнему полю, то разделенные части проводника окажутся заряженными разноименно.
- В разделении зарядов и заключается явление электростатической индукции. Благодаря этому явлению осуществляется электростатическая защита. Если какой-либо прибор необходимо защитить от внешних электрических полей, то его помещают в проводящую оболочку.

Явление электростатической индукции

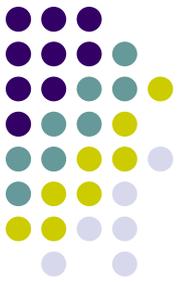


Проводники в электрическом поле



3. Внутри проводника электрический заряд отсутствует; весь заряд проводника, полученный им при электризации, может располагаться только на его поверхности.

4. Если внутри проводника имеется полость, то в каждой точке этой полости электростатическое поле равно нулю: $E=0$



5. Во всех точках внутри проводника потенциал электростатического поля имеет одно и то же значение.

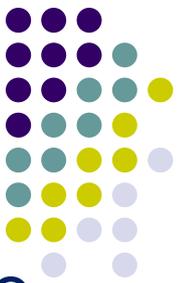
6. Электрические заряды распределяются по поверхности проводника так, что электростатическое поле оказывается сильнее на выступах проводника и слабее на его впадинах.

7. Если заряженный проводник имеет форму шара или сферы радиусом R , то напряженность и потенциал создаваемого им поля определяются выражениями:



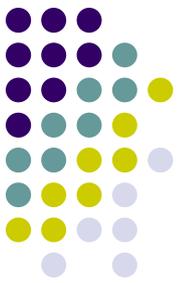
$$E = \begin{cases} 0, & \text{если } r < R \\ k \frac{q}{r^2}, & \text{если } r \geq R \end{cases} \quad \varphi = \begin{cases} k \frac{q}{R}, & \text{если } r \leq R \\ k \frac{q}{r}, & \text{если } r > R \end{cases}$$

Диэлектрики



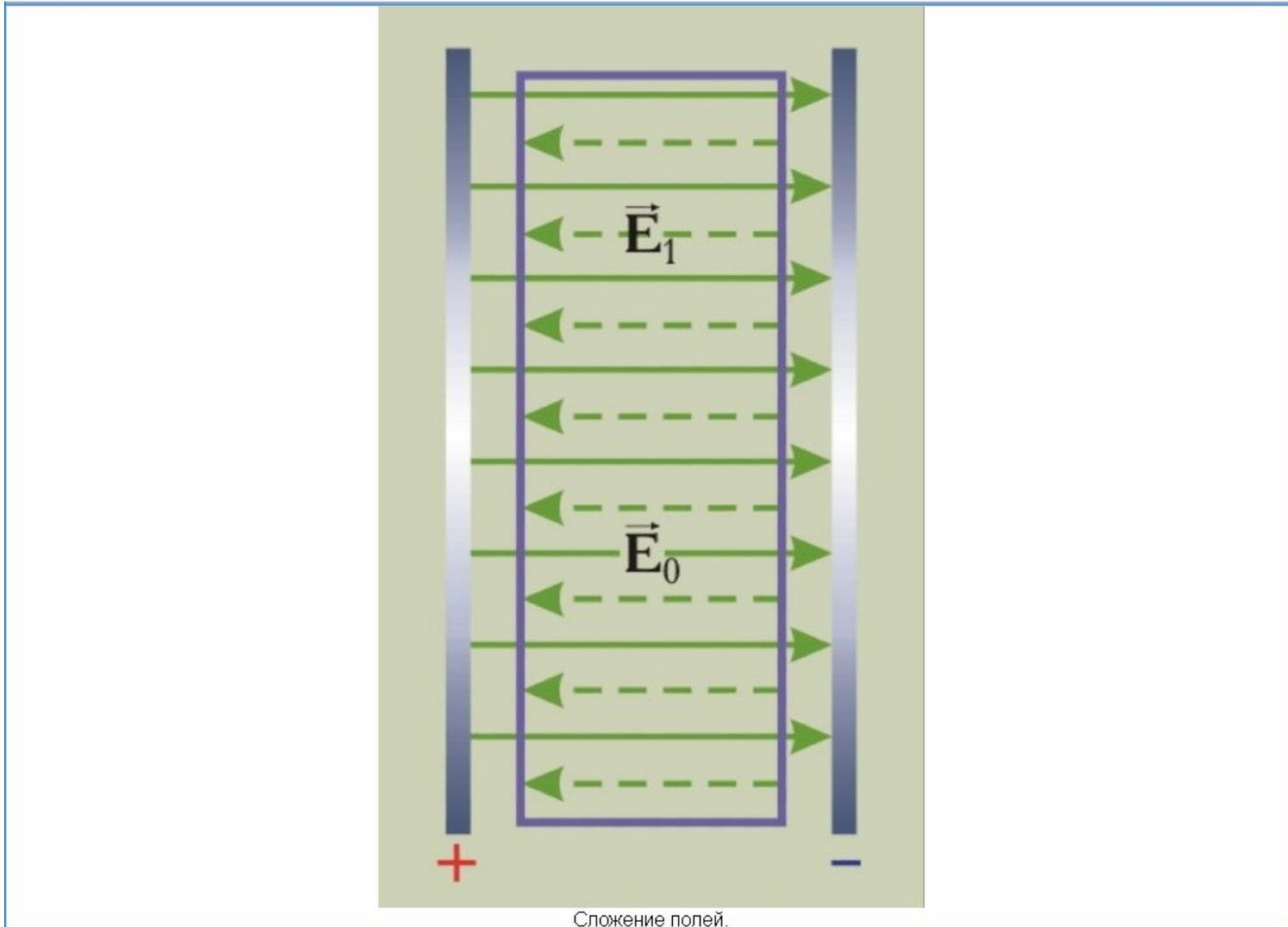
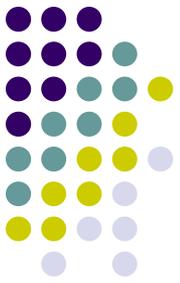
- Диэлектрики - это вещества, не содержащие свободных заряженных частиц, т.е. таких заряженных частиц, которые способны свободно перемещаться по всему объему тела. Поэтому *диэлектрики не могут проводить электрический ток.*
- Диэлектриками являются многие твердые тела (фарфор, янтарь, эбонит, стекло, кварц, мрамор и др.), некоторые жидкости (например, дистиллированная вода) и все газы.
- По внутреннему строению диэлектрики разделяются на полярные и неполярные.

Поляризация диэлектриков



- Если диэлектрик поместить во внешнее электрическое поле, то происходит **поляризация диэлектрика**. При этом процессе *молекулы диэлектрика ориентируются по внешнему электрическому полю*. На противоположных поверхностях диполя появляются связанные заряды.
- Это приводит к тому, что в диэлектриках возникает свое электрическое поле, направленное против внешнего, и в сумме поле внутри диэлектрика будет меньше внешнего.
- Диэлектрическая проницаемость, о которой мы говорили раньше, характеризует способность диэлектрика к ослаблению внешнего поля.

Поляризация диэлектриков

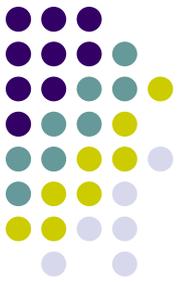




Диэлектрическая проницаемость среды

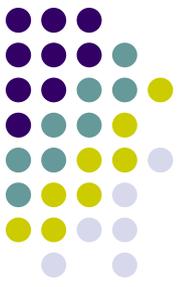
- E_0 - напряжённость электрического поля в вакууме
- E - напряжённость электрического поля в диэлектрике
- ε - диэлектрическая проницаемость среды

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}$$



Электроёмкость

Конденсаторы



Если двум изолированным друг от друга проводникам сообщить заряды q_1 и q_2 , то между ними возникает некоторая разность потенциалов $\Delta\phi$, зависящая от величин зарядов и геометрии проводников. Разность потенциалов $\Delta\phi$ между двумя точками в электрическом поле часто называют напряжением и обозначают буквой **U**. Наибольший практический интерес представляет случай, когда заряды проводников одинаковы по модулю и противоположны по знаку: $q_1 = -q_2 = q$. В этом случае можно ввести понятие электрической емкости.

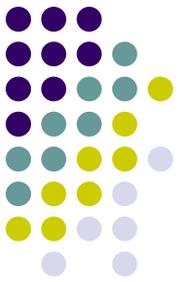


Електроємкiстю системи из двух проводников называется физическая величина, определяемая как отношение заряда q одного из проводников к разности потенциалов $\Delta\varphi$ между ними:

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta\varphi} = \frac{q}{U}$$

В системе СИ единица электроемкости называется **фарад** (Ф):

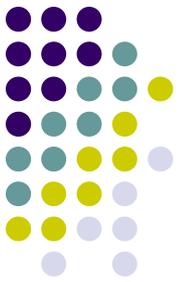
$$1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}$$



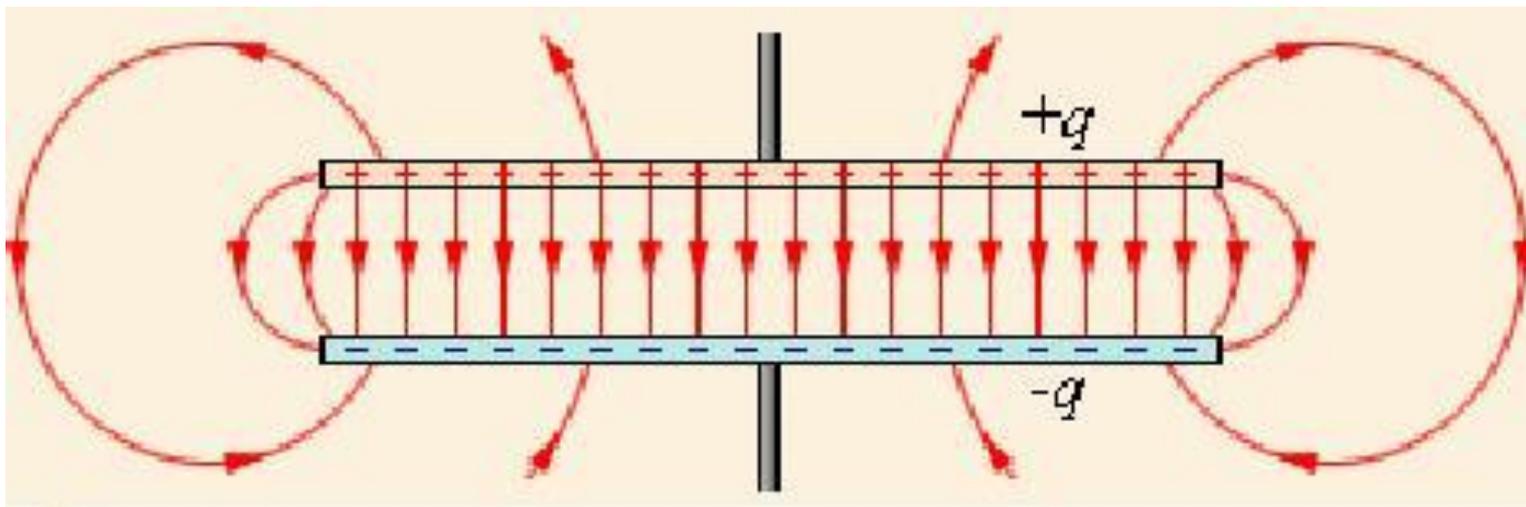
Величина емкости зависит от формы и размеров проводников и от свойств диэлектрика, разделяющего проводники.

Существуют такие конфигурации проводников, при которых электрическое поле оказывается сосредоточенным (локализованным) лишь в некоторой области пространства. Такие системы называются *конденсаторами*, а проводники, составляющие конденсатор, называются *обкладками*.

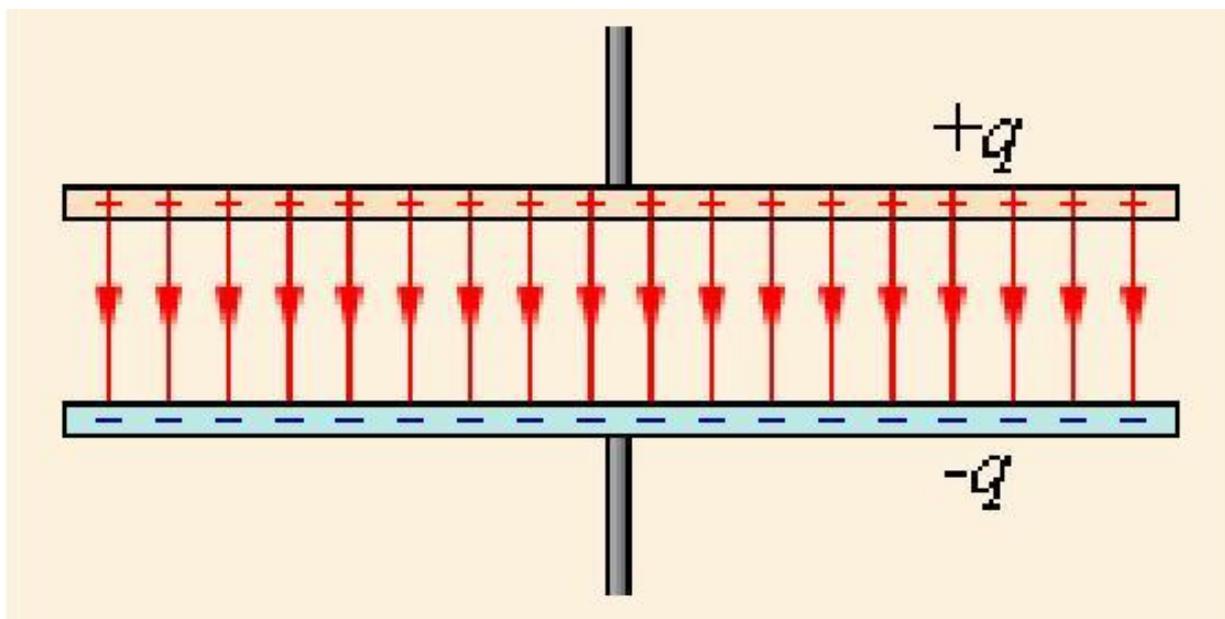
Вид конденсатора:



Простейший конденсатор – система из двух плоских проводящих пластин, расположенных параллельно друг другу на малом по сравнению с размерами пластин расстоянии и разделенных слоем диэлектрика. Такой конденсатор называется **плоским**. Электрическое поле плоского конденсатора в основном локализовано между пластинами; однако, вблизи краев пластин и в окружающем пространстве также возникает сравнительно слабое электрическое поле, которое называют **полем рассеяния**. В целом ряде задач можно приближенно пренебрегать полем рассеяния и полагать, что электрическое поле плоского конденсатора целиком сосредоточено между его обкладками (рисунок №2). Но в других задачах пренебрежение полем рассеяния может привести к грубым ошибкам, так как при этом нарушается потенциальный характер электрического поля



Поле плоского конденсатора.

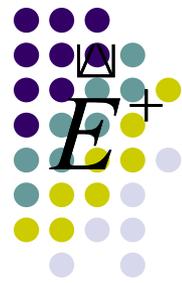


Идеализированное представление поля плоского конденсатора. Такое поле не обладает свойством потенциальности.



Согласно принципу суперпозиции, напряженность \vec{E} поля, создаваемого обеими пластинами, равна сумме напряженностей \vec{E}^+ и \vec{E}^- полей каждой из пластин:

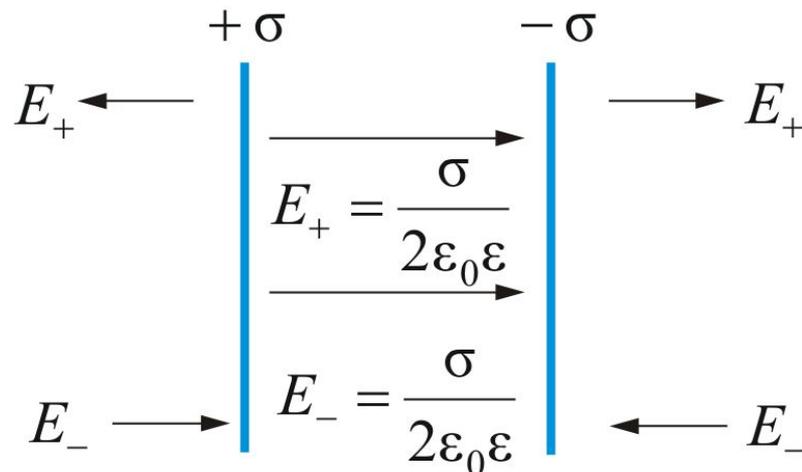
$$\vec{E} = \vec{E}^+ + \vec{E}^-$$

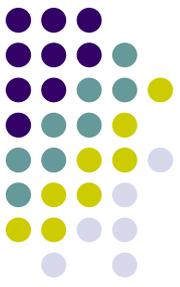


$$E^+$$

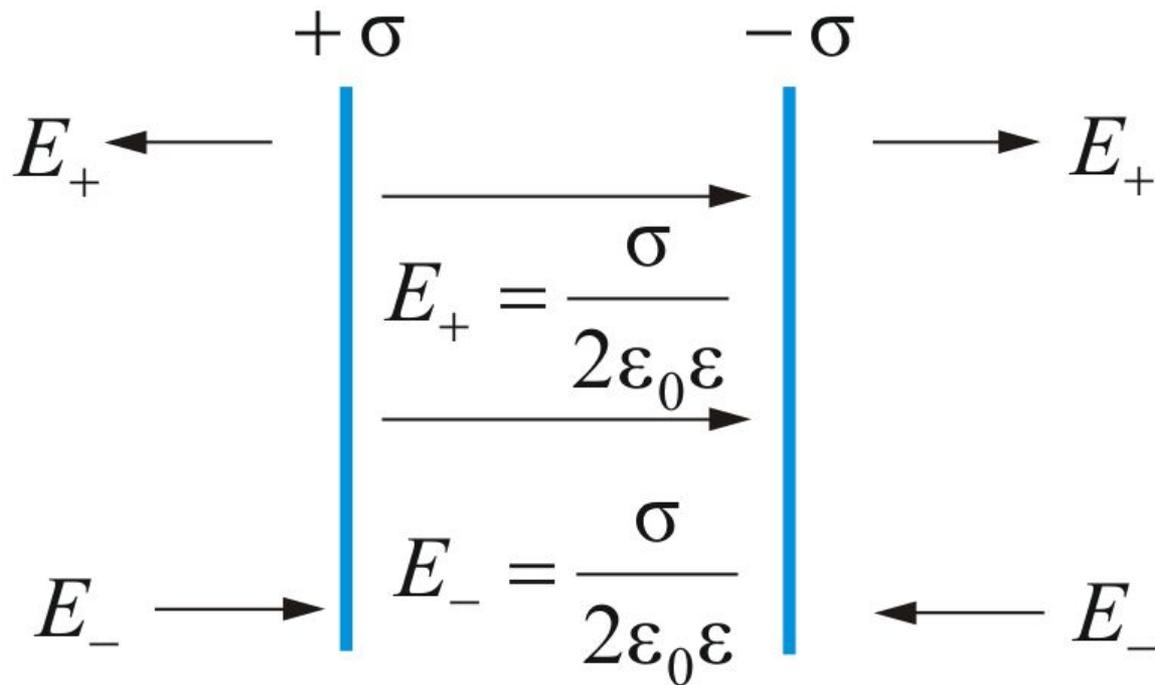
Внутри конденсатора вектора
параллельны; поэтому модуль
напряженности суммарного поля равен

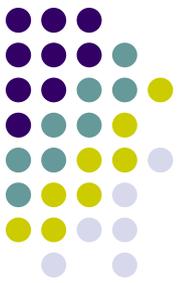
$$E = 2E_1 = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$





Вне пластин вектора \vec{E}^- и \vec{E}^+ направлены в
разные стороны, и поэтому $\vec{E} = 0$

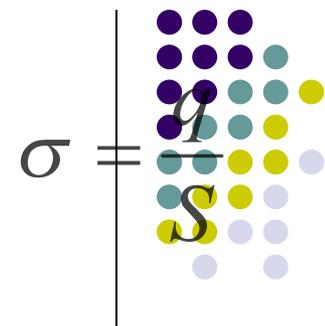




Каждая из заряженных пластин
плоского конденсатора создает вблизи
поверхности электрическое поле,
модуль напряженности которого
выражается соотношением

$$E_1 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

Поверхностная плотность σ заряда пластин равна
где q – заряд, а S – площадь каждой пластины.



Разность потенциалов $\Delta\varphi$ между пластинами в
однородном электрическом поле равна,
где d – расстояние между пластинами.

$$\Delta\varphi = E \cdot d$$

Из этих соотношений можно получить формулу для
емкости плоского конденсатора,
где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$ – электрическая постоянная.

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{\sigma \cdot S}{E \cdot d} = \frac{\epsilon_0 S}{d}$$



Таким образом, емкость плоского конденсатора прямо пропорциональна площади пластин (обкладок) и обратно пропорциональна расстоянию между ними. Если пространство между обкладками заполнено диэлектриком, емкость конденсатора увеличивается в ϵ раз:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

Примерами конденсаторов с другой конфигурацией обкладок могут служить сферический и цилиндрический конденсаторы.

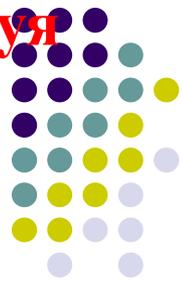
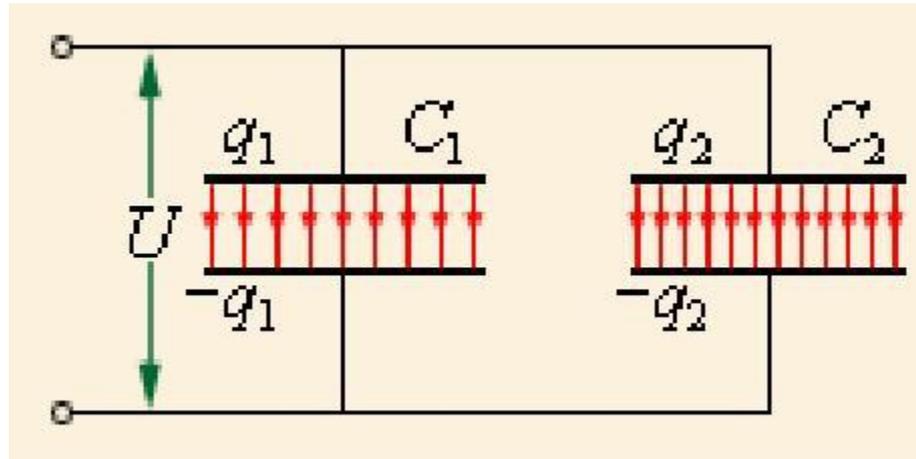
Сферический конденсатор – это система из двух концентрических проводящих сфер радиусов R_1 и R_2 .

Цилиндрический конденсатор – система из двух соосных проводящих цилиндров радиусов R_1 и R_2 и длины L . Емкости этих конденсаторов, заполненных диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ϵ , выражаются формулами:

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon \frac{L}{\ln R_2 / R_1} \quad (\text{цилиндрический конденсатор}).$$

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} \quad (\text{сферический конденсатор}).$$

Конденсаторы могут соединяться между собой, образуя батареи конденсаторов.



1. При **параллельном соединении** конденсаторов

- напряжения на конденсаторах одинаковы: $U_1 = U_2 = U$,
- заряды равны $q_1 = C_1 U$ и $q_2 = C_2 U$.

Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор емкости C , заряженный зарядом $q = q_1 + q_2$ при напряжении между обкладками равном U .

Отсюда следует

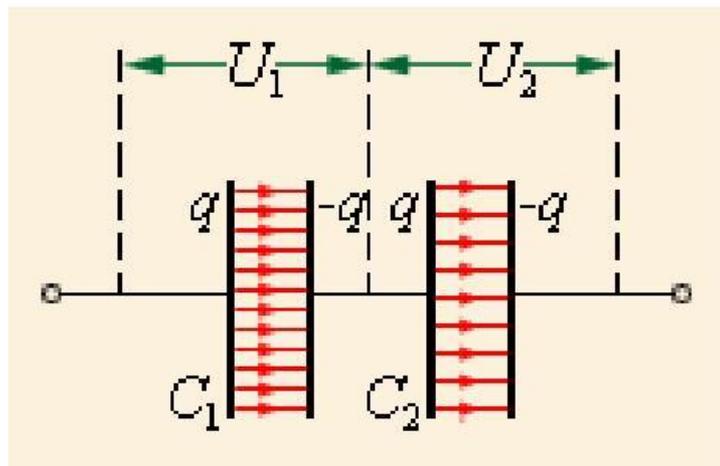
$$C = \frac{q_1 + q_2}{U} = \frac{q_1}{U} + \frac{q_2}{U}$$

Отношение

$$\frac{q_1}{U} = C_1 \quad \frac{q_2}{U} = C_2$$

$$C = C_1 + C_2$$



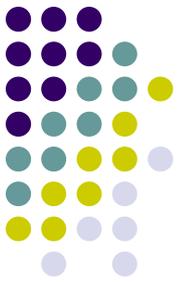


2. При последовательном соединении одинаковыми оказываются заряды обоих конденсаторов: $q_1 = q_2 = q$, а напряжения на них равны соответственно

$$U_1 \stackrel{\text{и}}{=} \frac{q}{C_1} \quad U_2 = \frac{q}{C_2}$$

Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор, заряженный зарядом q при напряжении между обкладками $U = U_1 + U_2$.

Пластинки соседних конденсаторов, соединенные проводником, имеют одинаковый потенциал. Следовательно, $U = U_1 + U_2$.



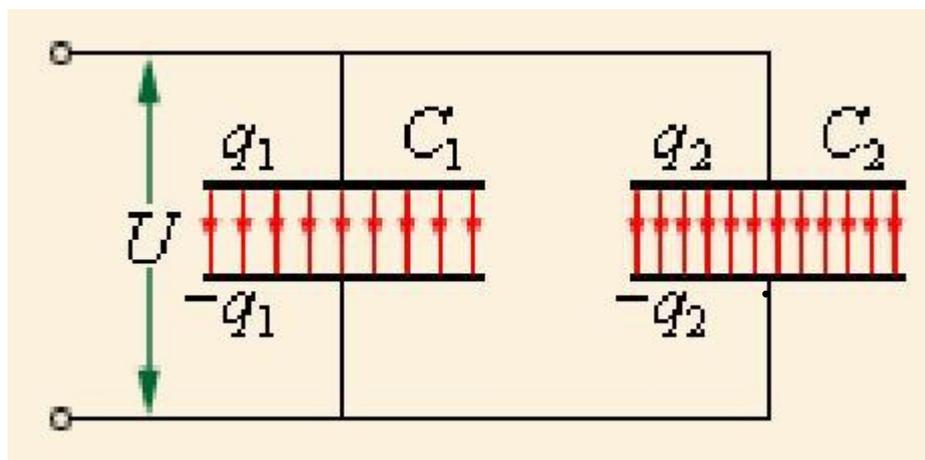
Поскольку

$$\frac{q}{U} = C \Rightarrow U = \frac{q}{C}$$

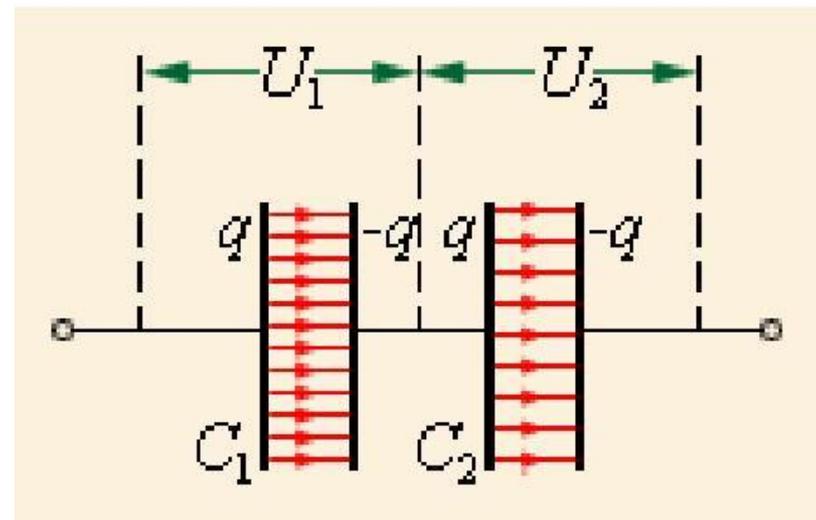
$$U = \frac{q}{C} = \frac{q}{C_1 + C_2} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Формулы для параллельного и последовательного соединения остаются справедливыми при любом числе конденсаторов, соединенных в батарею.



Параллельное соединение конденсаторов. $C = C_1 + C_2$.



Последовательное соединение конденсаторов.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

В случае соединения n одинаковых конденсаторов

$$C = n \cdot C$$

$$C = \frac{C}{n}$$

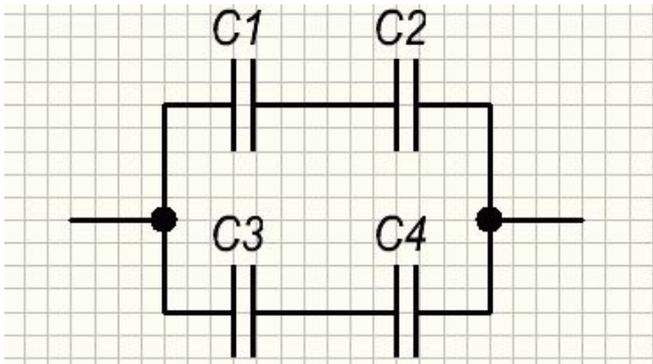
Смешанное соединение конденсаторов



Смешанным соединением конденсаторов называется такое соединение их, при котором имеется и параллельное и последовательное соединение

При смешанном соединении конденсаторов для участков с параллельным соединением применяются формулы параллельного соединения конденсаторов, а для участков с последовательным соединением - формулы последовательного соединения конденсаторов.

Всякое смешанное соединение конденсаторов путем упрощений может быть сведено либо к параллельному соединению, либо к последовательному.



Эквивалентная емкость
верхней ветви

$$C_{1,2} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

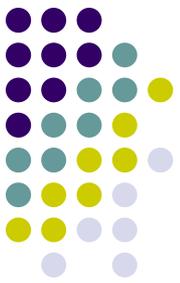
Эквивалентная емкость
нижней ветви

$$C_{3,4} = \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4}$$

Теперь это смешанное соединение конденсаторов может быть приведено к параллельному соединению. Эквивалентная емкость всей батареи конденсаторов

$$C = C_{1,2} + C_{3,4} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4}$$

Энергия конденсатора



Для того, чтобы сообщить проводнику некоторый заряд q , необходимо затратить некоторую работу.

Пусть очередная порция dq заряда подводится из бесконечности, где $\varphi_1 = 0$, тогда элементарная работа равна :

$$dA = dq(\varphi_1 - \varphi_2) = -\varphi \cdot dq$$

Вся работа вычисляется по формуле:

$$A = -\int_0^q \varphi \cdot dq = -\int_0^q \frac{q}{C} \cdot dq = -\frac{q^2}{2C}$$

Знак «минус» показывает, что для зарядки тела необходимо совершить некоторую внешнюю работу.

При разрядке электрическое поле само совершает работу, равную A .

Тогда получаем формулу энергии заряженного конденсатора:



$$W_p = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

W_p – энергия электрического поля заряженного конденсатора

q – модуль заряда любого из проводников конденсатора

U – разность потенциалов между проводниками

C – емкость конденсатора



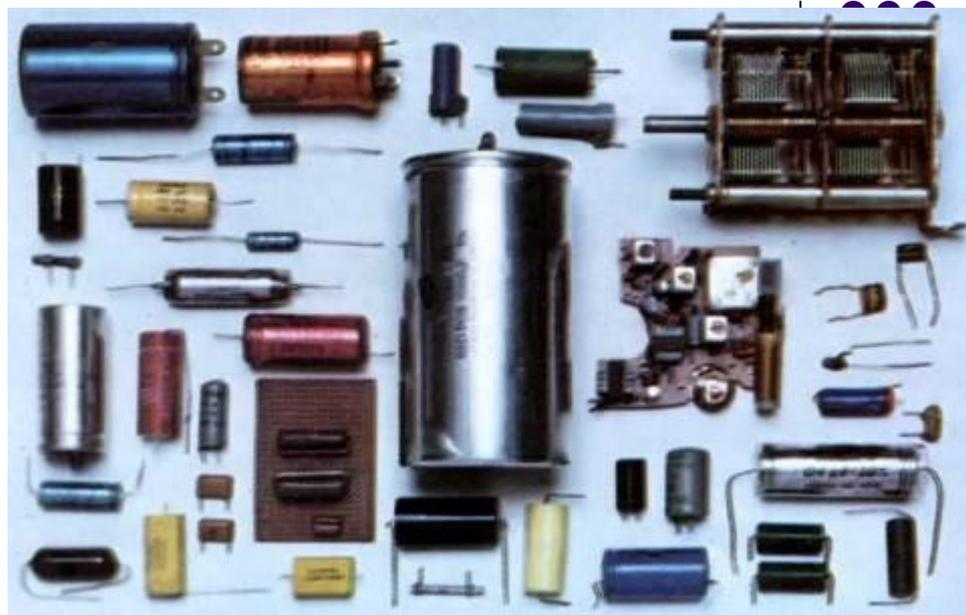
Батарея конденсаторов



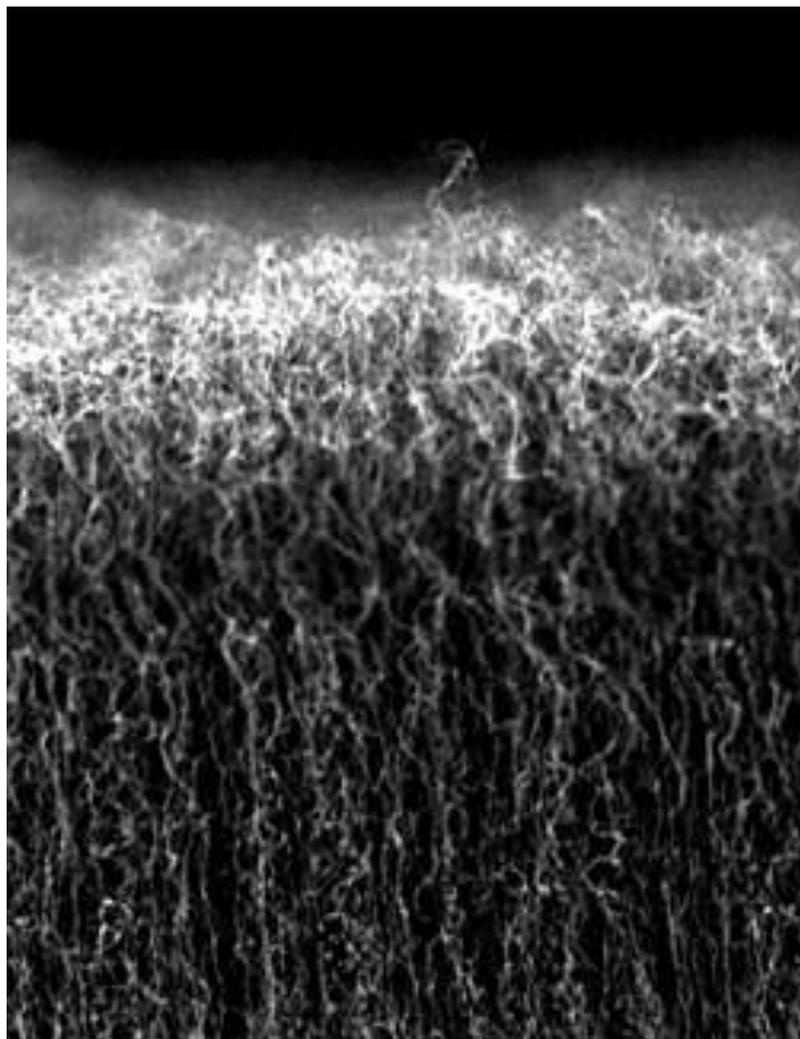
Светильники с разрядными лампами



Лампа фотовспышки



Электролитические конденсаторы



Исследователи из Массачусетского технологического института (МТИ) возлагают надежды на нитевидные частицы, известные как нанотрубки. Их сечение в 30000 раз уступает диаметру человеческого волоса, что позволяет разместить на поверхности огромное количество этих ворсинок. Тем самым площадь, доступная для расположения заряда, многократно возрастает. Удачная ассоциация есть на сайте [Sciencentral](http://www.sciencedirect.com). Проводится параллель между махровым полотенцем, впитывающим влагу лучше, чем обычное, и «мохнатой» обкладкой конденсатора, задерживающей больший заряд, чем гладкая.



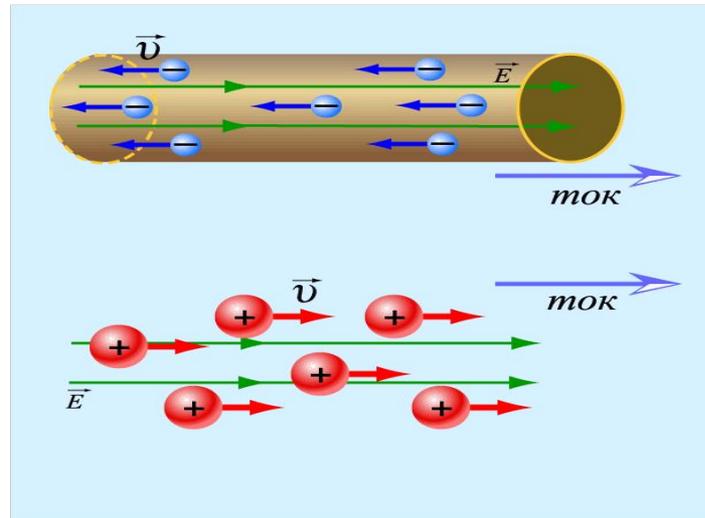


Постоянный электрический ток

Электрический ток – упорядоченное перемещение зарядов одного знака в каком-либо направлении

Для получения направленного движения зарядов нужно приложить электрическое поле

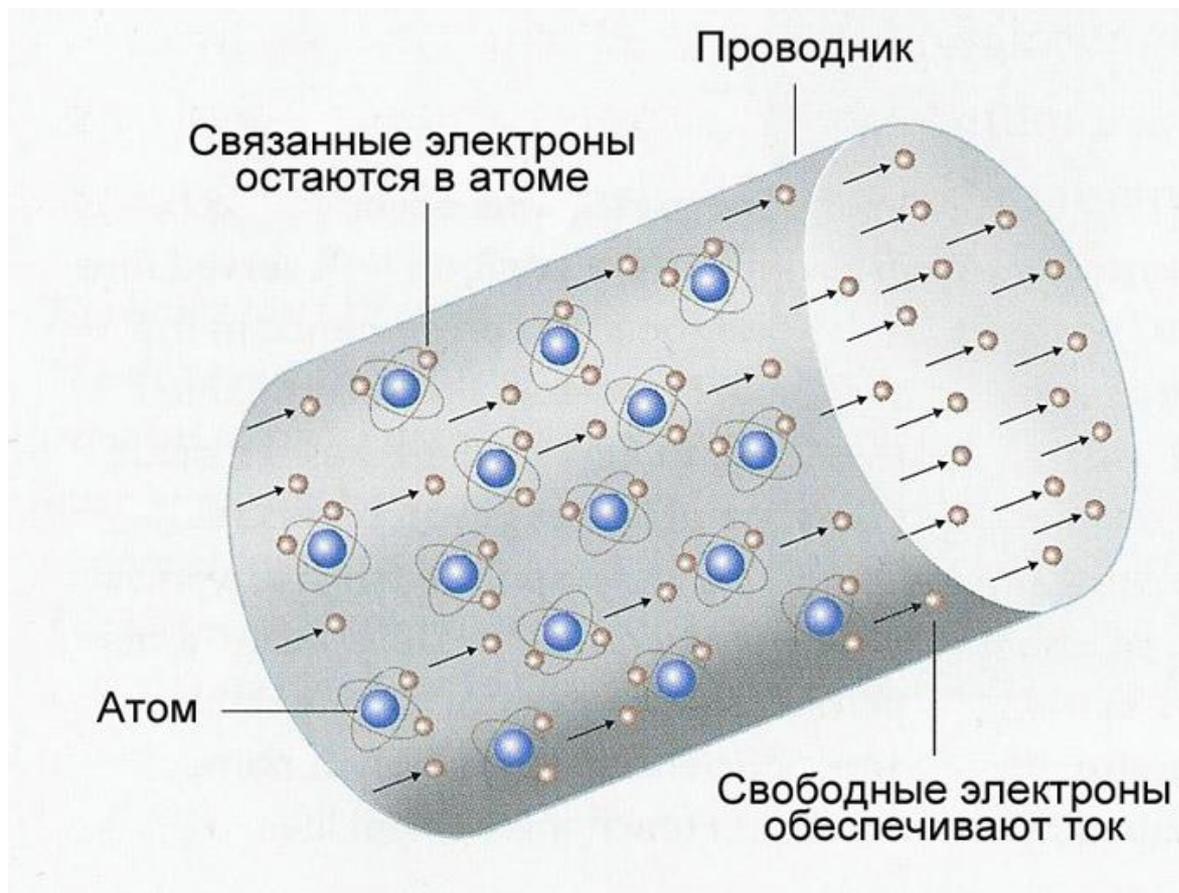
Движение + и – зарядов в противоположных направлениях есть электрический ток одного направления. Условились, что направление тока совпадает с направлением движения положительных зарядов и противоположно направлению движения отрицательных зарядов.



Основным признаком электрического тока является магнитное поле, существующее вокруг движущихся зарядов. Кроме того, при прохождении электрического тока через вещество, наблюдаются тепловые, оптические и химические явления, в которых имеет место превращение электрической энергии в другие виды энергии.



Электрический ток в металлах – это упорядоченное (**направленное**) движение электронов под действием электрического поля.





Электрический ток имеет определённое направление. **За направление тока принимают направление движения положительно заряженных частиц.** Если ток образован движением отрицательно заряженных частиц, то направление тока считают противоположным направлению движения частиц. (Такой выбор направления тока не очень удачен, так как в большинстве случаев ток представляет собой движение электронов – отрицательно заряженных частиц.) Выбор направления тока был сделан в то время, когда о свободных электронах в металлах ещё ничего не знали.

Действие тока



Движение частиц в проводнике мы непосредственно не видим. О наличии электрического тока приходится судить по тем действиям или явлениям, которые его сопровождают.

Во-первых, *проводник, по которому течёт ток, нагревается.*

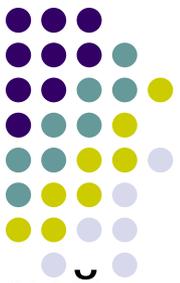
Во-вторых, *электрический ток может изменять химический состав проводника*, например выделять его химические составные части (медь из раствора медного купороса и т.д.).

В-третьих, *ток оказывает силовое воздействие на соседние токи и намагниченные тела.* Это действие тока называется *магнитным*. Так, магнитная стрелка вблизи проводника с током поворачивается. Магнитное действие тока в отличие от химического и теплового является *основным, так как проявляется у всех без исключения проводников.*

 Химическое действие тока наблюдается лишь у растворов и расплавов электролитов, а

 нагревание отсутствует у сверхпроводников.

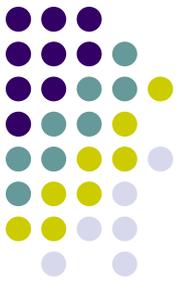
Сила тока



Если в цепи устанавливается электрический ток, то это означает, что через поперечное сечение проводника всё время переносится электрический заряд. Заряд, перенесённый в единицу времени, служит основной количественной характеристикой тока, называемой силой тока. Если через поперечное сечение проводника за время Δt переносится заряд Δq , то сила тока равна:

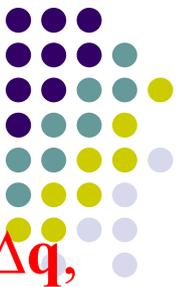
$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}$$



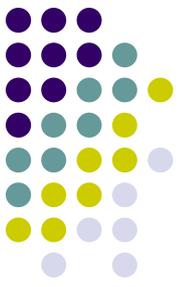
$$1 \text{ Ампер (A)} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}}$$

В проводнике течет ток 1А, если через поперечное сечение проводника за 1 с проходит заряд, величиной 1Кл



Таким образом, сила тока равна отношению заряда Δq , переносимого через поперечное сечение проводника за интервал времени Δt , к этому интервалу времени. Если сила тока со временем не меняется, то ток называют ПОСТОЯННЫМ.

Сила тока, подобно заряду, величина скалярная. Она может быть как положительной, так и отрицательной. Знак силы тока зависит от того, какое из направлений вдоль проводника принять за положительное. Сила тока $I > 0$, если направление тока совпадает с условно выбранным положительным направлением вдоль проводника. В противном случае $I < 0$.



Если предположить, что через элементарную площадку S проходят заряды только одного знака

n - число заряженных частиц в единице объема проводника

v – средняя скорость их упорядоченного движения вдоль проводника

За время Δt через поперечное сечение проводника (площадка S) пройдут все частицы, находящиеся в объеме $S \cdot v \cdot \Delta t$. Если заряд одной частицы e , то за время Δt через площадку S пройдет заряд Δq :

$$\Delta q = e \cdot n \cdot S \cdot v \cdot \Delta t$$

Тогда сила тока через площадку S

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = n \cdot e \cdot v \cdot S$$

Сила тока, приходящаяся на единицу площадки, ориентированной перпендикулярно к направлению тока, называется **плотность тока**.

$$\vec{j} = \frac{I}{S} = n \cdot e \cdot v$$

Вектор \vec{j} ориентирован по направлению тока



В отличие от силы тока, которая есть величина скалярная и направления не имеет, **плотность тока – это вектор.**

Плотность тока \mathbf{j} - есть более подробная характеристика тока, чем сила тока I .

\mathbf{j} - характеризует ток локально, в каждой точке пространства,

а I – это интегральная характеристика, привязанная не к точке, а к области пространства, в которой протекает ток.

За направление вектора \mathbf{j} принимают направление вектора скорости V положительных носителей зарядов (раньше не знали о существовании отрицательных носителей зарядов и приняли так).

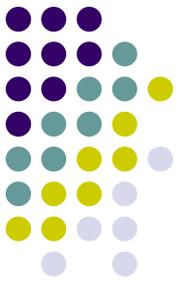
Если носителями являются положительные, так и отрицательные заряды, то плотность тока определяется формулой:



$$\mathbf{j} = q_+ n_+ \mathbf{v}_{dr.+} + q_- n_- \mathbf{v}_{dr.-}$$

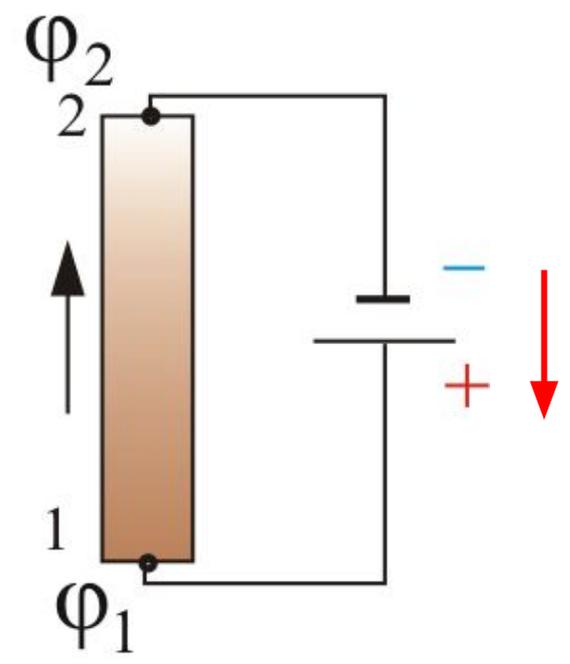
где $q_+ n_+$ и $q_- n_-$ – объемные плотности зарядов.

Сторонние силы и ЭДС



Для того, чтобы поддерживать ток достаточно длительное время, необходимо от конца проводника с меньшим потенциалом непрерывно отводить, а к другому концу – с большим потенциалом – подводить электрические заряды. Т.е. необходим круговорот зарядов.

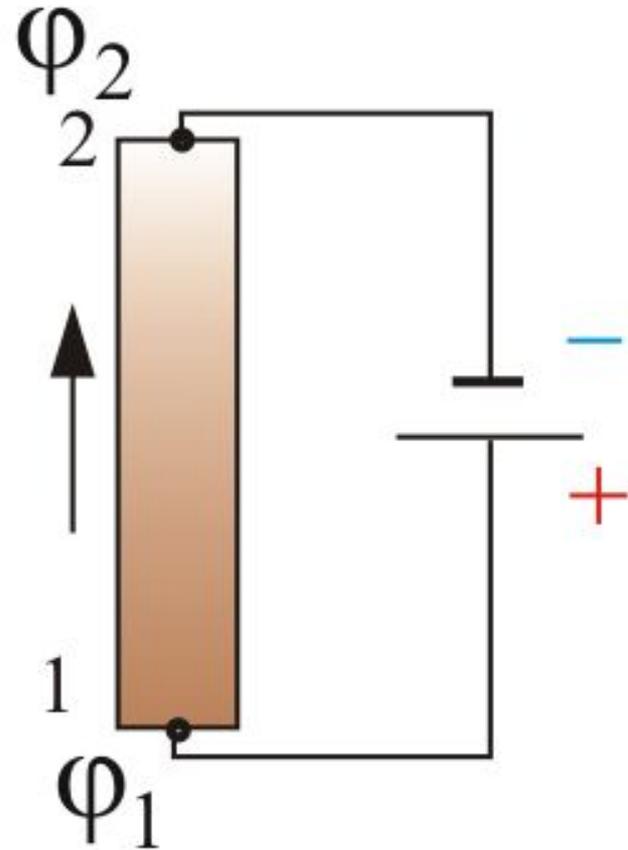
Поэтому в замкнутой цепи, наряду с нормальным движением зарядов, должны быть участки, на которых движение (положительных) зарядов происходит в направлении возрастания потенциала, т.е. против сил электрического поля





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).





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



Величина, равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда в цепи, называется **электродвижущей силой (Э.Д.С.)**, действующей в цепи:

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



*Стороннюю силу, действующую на заряд,
можно представить в виде:*

$$\vec{F}_{\text{ст}} = q \vec{E}_{\text{ст}}, \quad (10.4.2)$$

$\vec{E}_{\text{ст}}$ – напряженность поля сторонних сил.



Работа сторонних сил на участке 1 – 2:

Тогда **Э.Д.С.**

$$A_{12} = \int_1^2 \mathbf{F}_{\text{сТ}} d\mathbf{l} = q \int_1^2 \mathbf{E}_{\text{сТ}} d\mathbf{l},$$

$$\mathcal{E}_{12} = \frac{A_{12}}{q} = \int_1^2 \vec{\mathbf{E}}_{\text{сТ}} d\vec{\mathbf{l}}.$$

Для замкнутой цепи:

$$\mathcal{E} = \sum \mathcal{E}_i = \oint \vec{\mathbf{E}}_{\text{сТ}} d\vec{\mathbf{l}}.$$

$$\mathcal{E} = \sum \mathcal{E}_i = \oint \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l}.$$



Циркуляция вектора напряженности сторонних сил равна Э.Д.С., действующей в замкнутой цепи (алгебраической сумме ЭДС).

При этом необходимо помнить, что поле сторонних сил не является потенциальным, и к нему нельзя применять термин разность потенциалов или напряжение.



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.

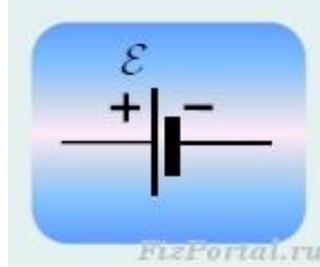
Основной характеристики источника является **электродвижущая сила (ЭДС) – работа, совершаемая сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда**

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

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».

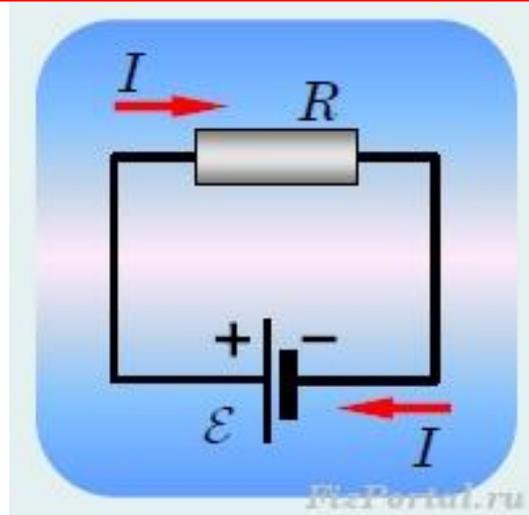
Работа сторонних сил, наоборот, положительна в том случае, если положительные заряды перемещаются от отрицательного полюса к положительному, то есть от «минуса» к «плюсу».

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:

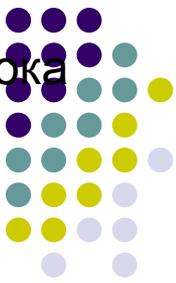
- 1) работы A_{12} против электростатических сил F , действующих внутри источника тока; и
- 2) потери энергии электронов W при их прохождении через источник тока:

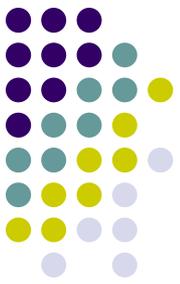
$$A = A_{12} + W$$

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.





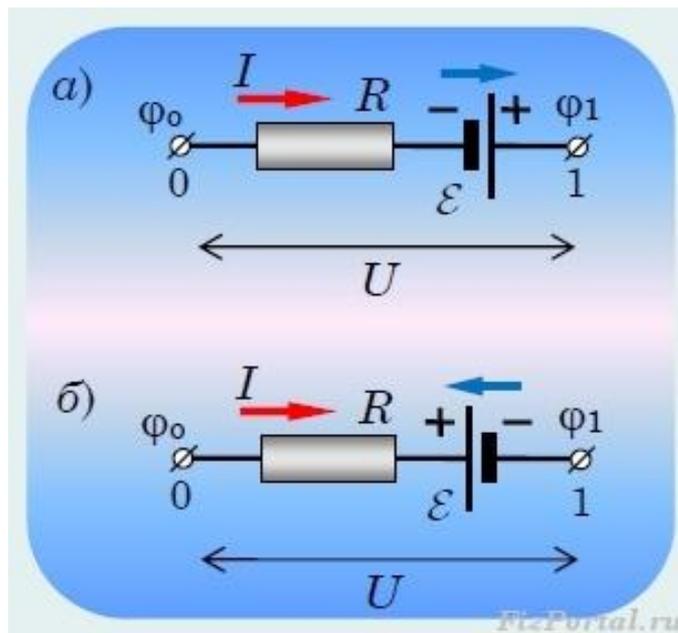
Если на некотором участке электрической цепи помимо электростатических действуют и сторонние силы, то над перемещением зарядов «работают» как электростатические, так и сторонние силы.

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

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

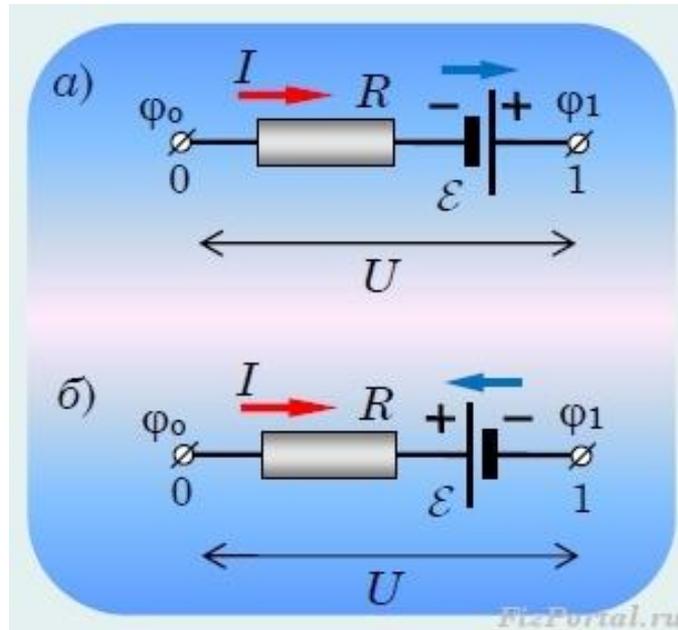
В том случае, когда сторонние силы отсутствуют, электрическое напряжение совпадает с разностью потенциалов электрического поля.

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

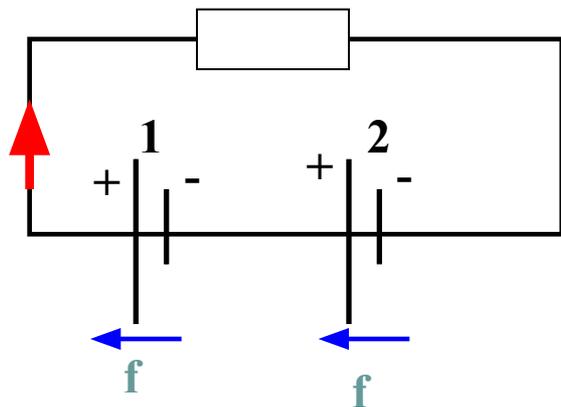
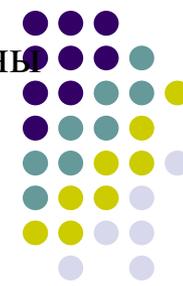
$$\mathcal{E} = \frac{A}{q_0} = \varphi_1^0 - \varphi_2^0$$

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.

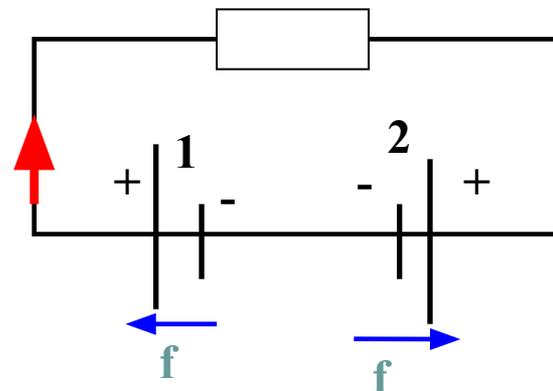


Сторонние силы действуют в направлении движения зарядов.

Работа $A > 0$

$$A = A_1 + A_2$$

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



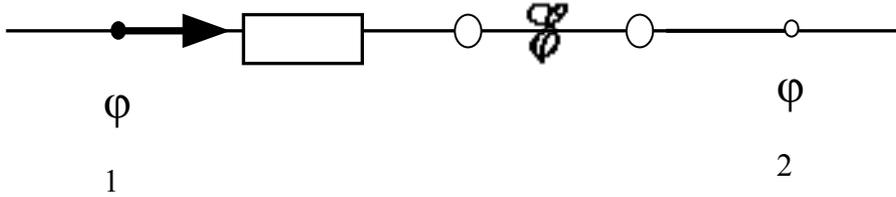
У 1-го источника сторонние силы действуют в направлении движения зарядов $\rightarrow A > 0$.

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

$$A = A_1 - A_2$$

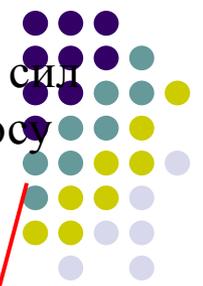
$$\mathcal{E} = \frac{A}{q} = \frac{A_1}{q} - \frac{A_2}{q} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$$

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.

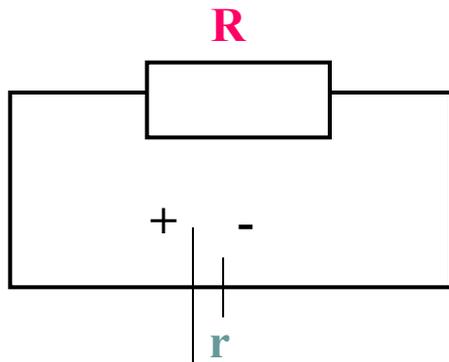
$A_{12} = q \cdot I \cdot R \pm A'' = q \cdot I \cdot R \pm A$, т.к. $A/q = \mathcal{E}$, тогда

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

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

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

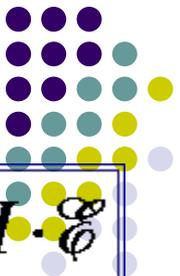
Полезная мощность – только мощность, выделяемая во внешней цепи

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

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

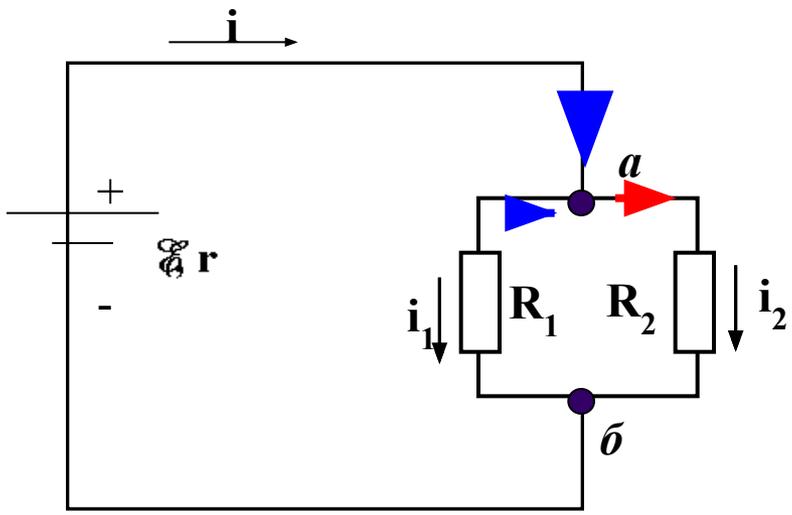
Алгебраическая сумма падений напряжений в замкнутом контуре равна алгебраической сумме ЭДС источников тока, находящихся в этом контуре

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



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

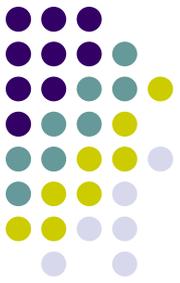
- 1) Токи входящие в точку разветвления берут со знаком «плюс», выходящие из узла - со знаком «минус»



Пусть «+» направление тока – по часовой стрелке.

Для точки *a*) 1-е правило Кирхгофа дает:

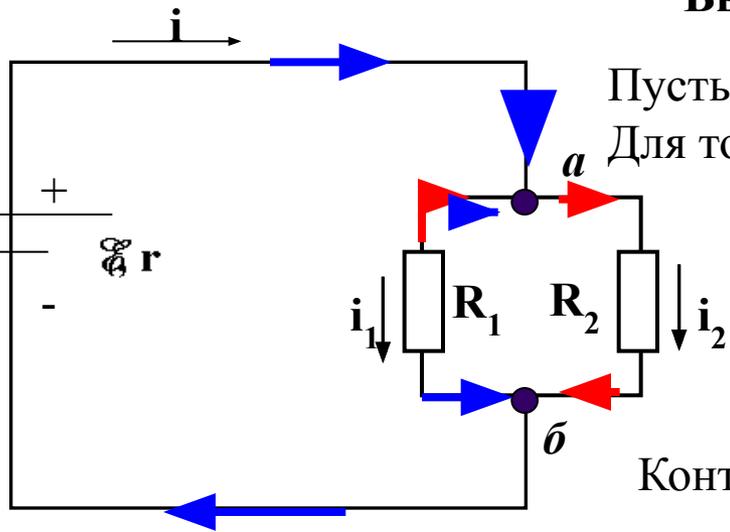
$$i - i_1 - i_2 = 0$$



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 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 *aR₂бR₁a* (обход по часовой стрелке)

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

Контур *aR₁б E a* $ir + R_1 i_1 = E \quad (3)$

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

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

Подставим это выражение в уравнение (3)

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

По закону Ома

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

Тогда получаем

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

или

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

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

Это сопротивление
внешней цепи R

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

Формула для расчета сопротивления в случае
параллельного соединения проводников.

В случае соединения **n**
одинаковых проводников

Законы параллельного соединения проводников

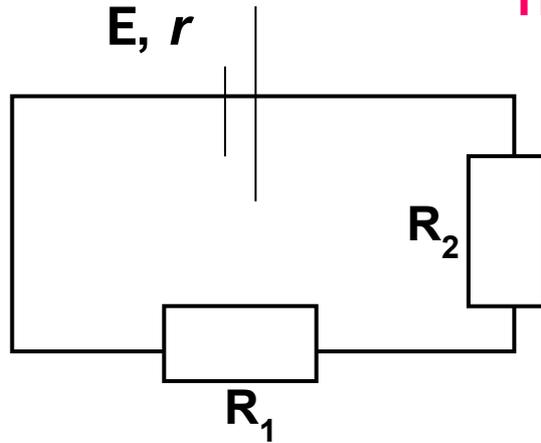


1. $U_1 = U_2 = U$

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

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

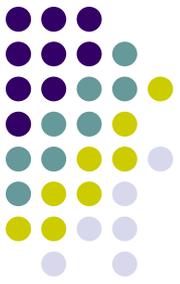
тогда получаем

$$R = R_1 + R_2$$

В случае соединения n одинаковых проводников

$$R = nR_i$$

Законы последовательного соединения



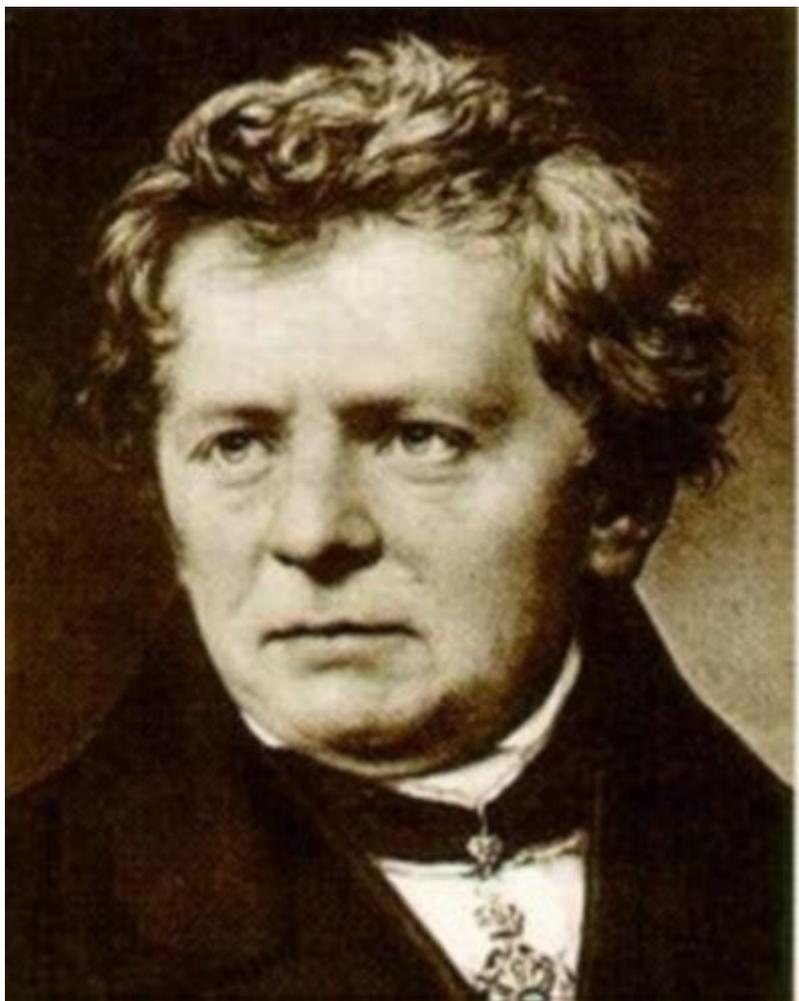
$$1. \quad U_1 + U_2 = U$$

$$2. \quad I = I_1 = I_2$$

$$3. \quad R_1 + R_2 = R$$



Работа этермпуьескозо мока



Георг Ом

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

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

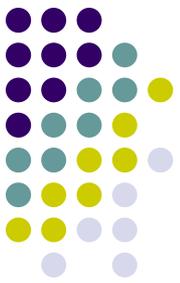
Закон Ома в интегральной форме

$$j = \gamma E$$

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 металлов от 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 .

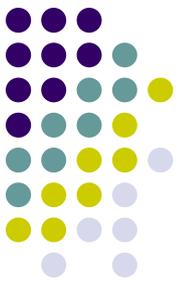
Это объясняется следующим образом

1. С ростом T концентрация электронов в металлах не меняется, т. к. у металлов ширина запрещенной зоны $E_g = 0$.
2. С ростом T увеличивается количество столкновений электронов друг с другом и с атомами решетки, вследствие увеличения **ангармонизма** колебаний решетки. В результате, *с ростом T уменьшается длина свободного пробега электрона λ .*

Следовательно,
удельная электропроводность γ – уменьшается,
т.е. удельное сопротивление $\rho = 1/\gamma$ – растет

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{ne^2}{m} \frac{\lambda}{U} E$$

полупроводников (и диэлектриков) от температуры



Сопротивление полупроводников экспоненциально уменьшается с ростом температуры по формуле:

$$R = R_0 \exp(-E_g / T)$$

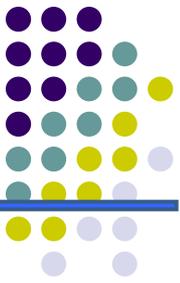
Это объясняется следующим образом

1. С ростом T концентрация n электронов в полупроводниках экспоненциально увеличивается, т.к. у полупроводников ширина запрещенной зоны $E_g \neq 0$.
2. С ростом T увеличивается количество столкновений электронов друг с другом и с атомами решетки, вследствие увеличения **ангармонизма** колебаний решетки. В результате, **с ростом T уменьшается длина свободного пробега электрона λ .**

Но, так как n растет намного быстрее, чем уменьшается λ , то удельная электропроводность γ — **растет**, т.е. удельное сопротивление $\rho = 1/\gamma$ — **уменьшается**

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{ne^2}{m} \frac{\lambda}{U} E$$

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

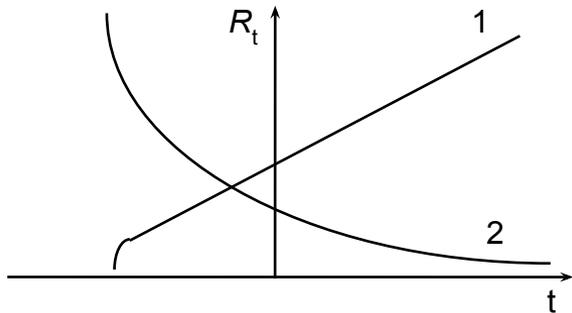
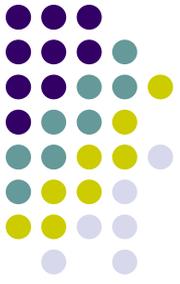


Рис. Зависимость сопротивления от температуры: (1) - для терморезисторов, (2) - для термисторов.

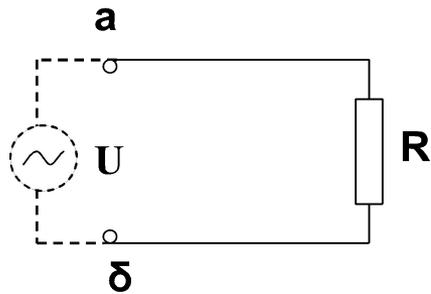
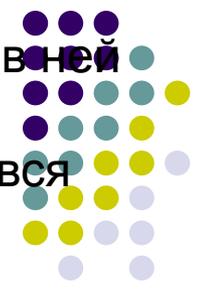
Датчики температуры на основе металлических проводников носят название **терморезисторы**. Датчики на основе полупроводников носят название **термисторы**.



Переменный ток: работа и мощность тока

Рассмотрим чему равна работа, совершаемая в цепи при протекании **в ней** переменного тока.

Пусть в цепи имеется только активное сопротивление. В этом случае **вся** работа тока превращается в тепло.



$$U = U_0 \cdot \sin \omega t$$

$$I = I_0 \cdot \sin \omega t$$

В течение малого промежутка времени переменный ток можно рассматривать как ток постоянный, и поэтому мгновенная мощность переменного тока равна:

$$P_t = I \cdot U = I_0 \cdot U_0 \cdot \sin^2 \omega t$$

Обычно нужно знать не мгновенное значение мощности, а ее среднее значение за большой период времени. Для этого достаточно усреднить значение мощности за один период.

Работа переменного тока

$$\cos 2\alpha = 1 - 2 \sin^2 \alpha$$

За малое время dt :

$$P_t dt = I_0 \cdot U_0 \cdot \sin^2 \omega t \cdot dt$$

за время полного периода колебаний T

$$A_T = I_0 \cdot U_0 \int_0^T \sin^2 \omega t \cdot dt = \frac{I_0 U_0}{2} \int_0^T (1 - \cos \frac{4\pi}{T} t) dt = \frac{I_0 U_0}{2} \left[\int_0^T dt - \int_0^T \cos \frac{4\pi}{T} t dt \right] = \frac{I_0 U_0}{2} T$$

Тогда для средней мощности за период получаем:

$$P = A_T/T = I_0 \cdot U_0/2.$$

$$U_0 = I_0 \cdot R$$



$$P = \frac{1}{2} I_0 \cdot U_0 = \frac{1}{2} R \cdot I_0^2 = \frac{1}{2} \frac{U_0^2}{R}$$



т.е. это в 2 раза меньше, чем мощность, выделяющаяся на постоянном токе

Обозначим через $I_{\text{э}}$ и $U_{\text{э}}$ силу и напряжение постоянного тока, который выделяет в сопротивление R такое же количество тепла, что и данный переменный ток.

тогда:

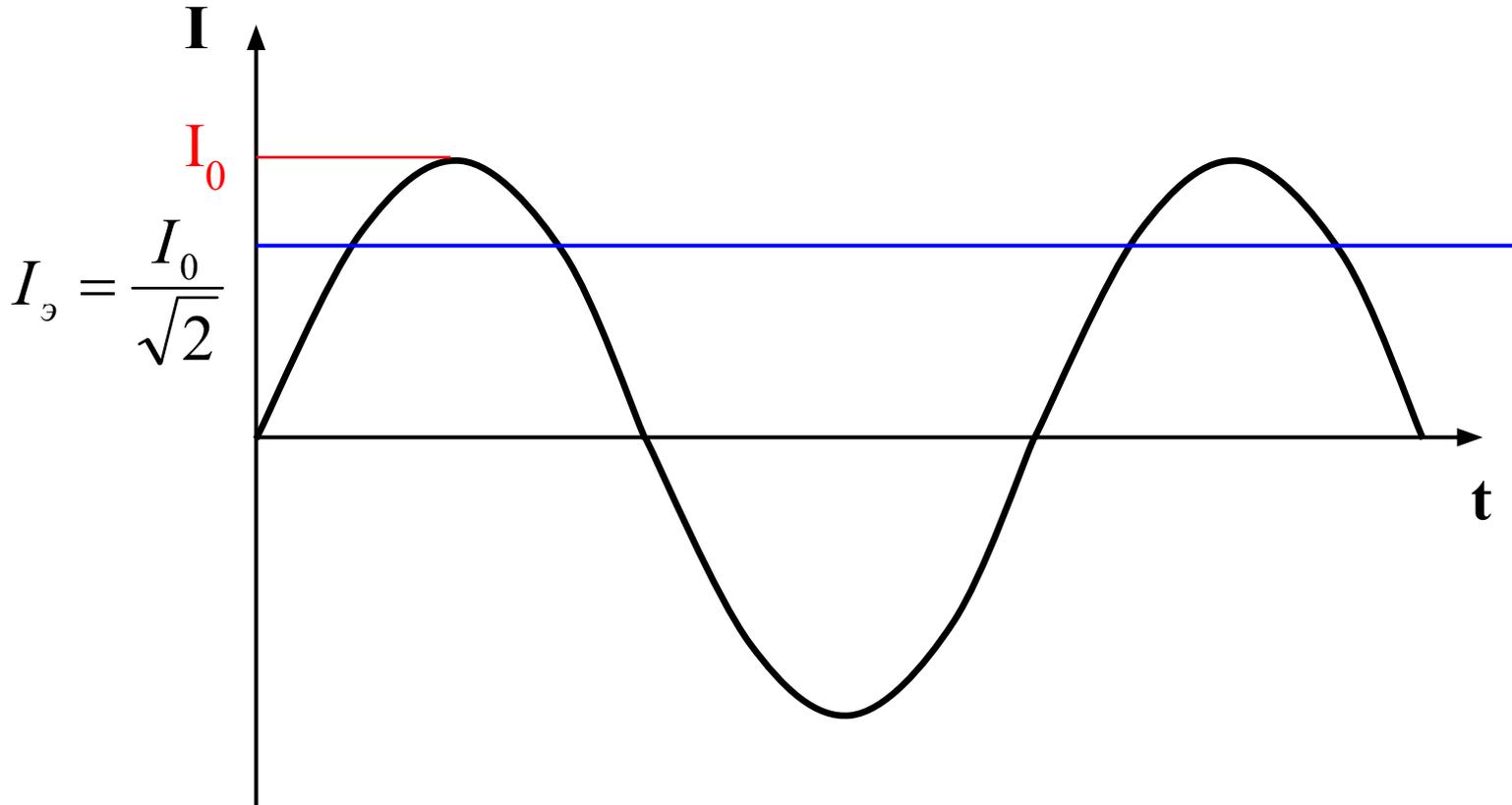
$$P = I_{\text{э}} \cdot U_{\text{э}} = R \cdot I_{\text{э}}^2 = U_{\text{э}}^2/R$$

$$I_{\text{э}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad \text{— эффективная сила переменного тока}$$

$$U_{\text{э}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \quad \text{— эффективное напряжение переменного тока}$$

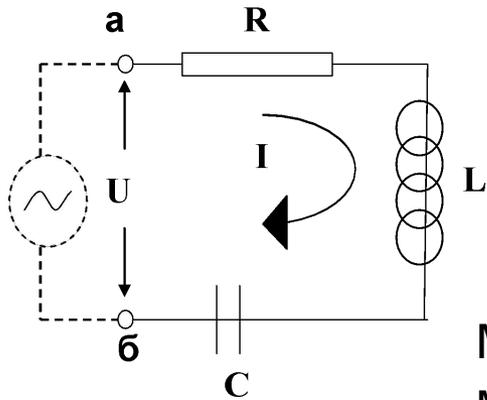
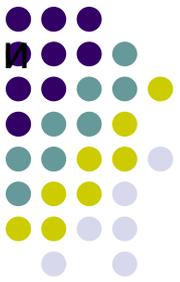
это значения I и U такого постоянного тока, который выделяет в сопротивление R такое же количество тепла, что и данный переменный ток.

Все приборы показывают эффективные значения переменного тока.



переменный ток (и переменное напряжение) характеризуются **тремя** значениями: *мгновенное, амплитудное (I_0) и эффективное ($I_{\text{э}}$)* .

Рассмотрим теперь случай, когда цепь содержит не только активные, но и реактивные сопротивления – индуктивность и емкость



$$U = U_0 \cdot \cos \omega t$$

$$I = I_0 \cdot \cos(\omega t - \varphi)$$

$\varphi > 0$ при индуктивной нагрузке,
 $\varphi < 0$ при емкостной нагрузке.

Мгновенное значение мощности равно произведению мгновенных значений напряжения U и тока I .

$$P(t) = U(t) \cdot I(t) = U_0 \cdot \cos \omega t \cdot I_0 \cdot \cos(\omega t - \varphi)$$

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = 1/2 \cos(\alpha - \beta) + 1/2 \cos(\alpha + \beta)$$



$$P(t) = 1/2 U_0 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi + 1/2 U_0 \cdot I_0 \cdot \cos(2\omega t - \varphi)$$



Практический интерес представляет среднее по времени значение мощности. Так как процесс периодический берем среднее значение за период. При этом среднее значение

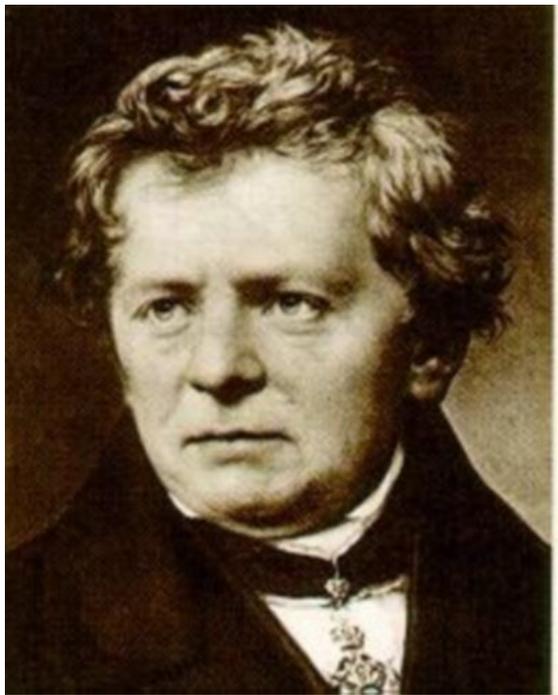
$$\cos(2\omega t - \varphi) = 0$$

$$P(t) = 1/2 U_0 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi = U_{\text{Э}} \cdot I_{\text{Э}} \cdot \cos \varphi$$

$$\cos \varphi = \frac{U_{0R}}{U_0} = \frac{I_0 R}{I_0 Z} = \frac{R}{Z}$$

= коэффициент
мощности.

$$P = \frac{U_0 \cdot I_0 R}{2 Z} = \frac{I_0^2}{2} R = I_{\text{Э}}^2 \cdot R$$



Георг Ом

4 формы закона Ома

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

1. В интегральной форме:

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

2. В дифференциальной форме:

$$j = \gamma E$$

3. Закон Ома для неоднородного участка цепи (содержащего источник тока)

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

4. Закон Ома для переменного тока

$$U_0 = I_0 \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = I_0 \cdot Z$$