

*Электроёмкость*

*Конденсаторы*

Если уединенному проводнику, находящемуся далеко от других тел сообщить заряды  $q_1, q_2, \dots$  то после их перераспределения по объему проводника он приобретает потенциалы  $\varphi_1, \varphi_2 \dots$

Отношение  $q_1 / \varphi_1$  для данного проводника постоянно и зависит только от его формы и размеров. Это отношение, которое сохраняется и при бесконечно малых изменениях заряда и потенциала, называется его **электроемкостью**.

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

$$C = \frac{dq}{d\varphi}$$

Понятие электроемкости применимо только к проводникам, т.к. там существует равновесное распределение зарядов по объему, при котором все точки имеют один и тот же потенциал. Если заряд сообщить изолятору, то он по нему не растекается, и потенциал в разных местах изолятора различен.

При наличии вблизи проводника других тел электроемкость будет зависеть также от формы, размеров и относительного расположения соседних тел. То есть, при наличии соседних тел проводник приобретает иной потенциал, чем при их отсутствии.

Емкость уединенного шара радиуса  $r$ , находящегося в диэлектрике с проницаемостью  $\varepsilon$  рассчитывается:

потенциал шара на поверхности и в любой точке объема

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}$$



$$C = \frac{q}{\varphi} = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon \cdot r$$

Понятие емкости применяется и к системе проводников, простейшей из которых является система из двух близкорасположенных проводников, которым сообщаются равные противоположные по знаку заряды  $+q$  и  $-q$ .

Емкостью плоского конденсатора (состоящего из двух близкорасположенных металлических пластинок-обкладок) называют отношение заряда  $q$  на одной обкладке к разности потенциалов между обкладками.

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$$

Пусть  $d$  – расстояние между обкладками мало, и поле однородно. Напряженность поля определяется выражением:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot S}$$

Если двум изолированным друг от друга проводникам сообщить заряды  $q_1$  и  $q_2$ , то между ними возникает некоторая разность потенциалов  $\Delta\varphi$ , зависящая от величин зарядов и геометрии проводников. Разность потенциалов  $\Delta\varphi$  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.

**Электроемкостью системы** 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):

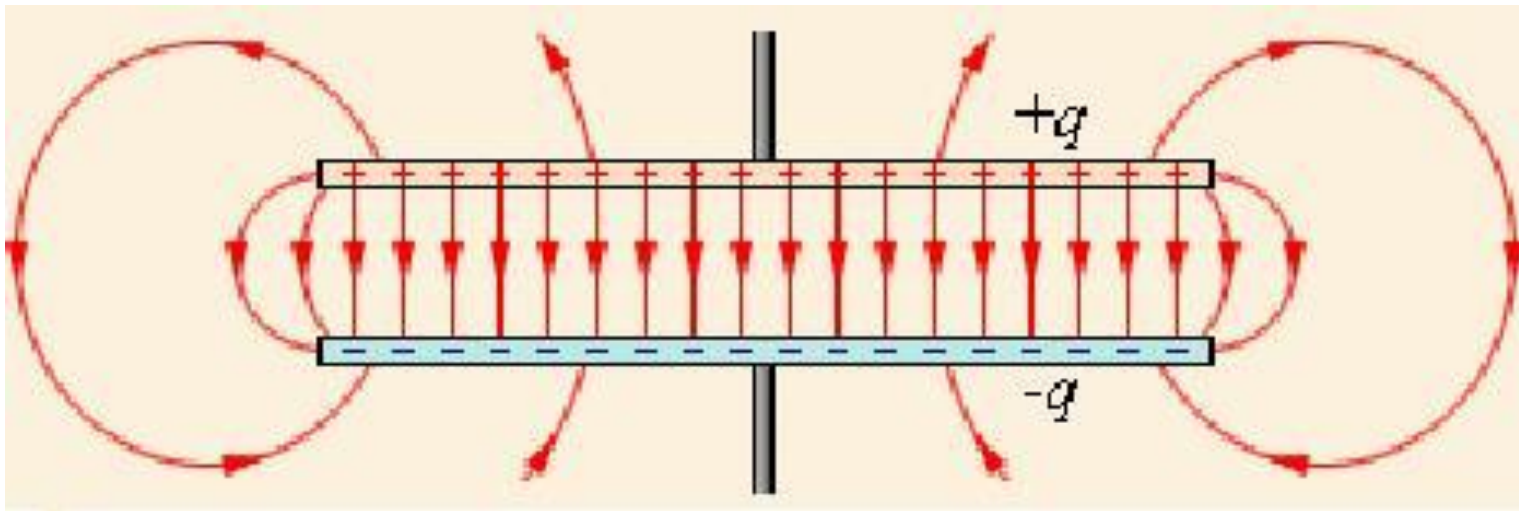
$$1\text{Ф} = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}}$$

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*.

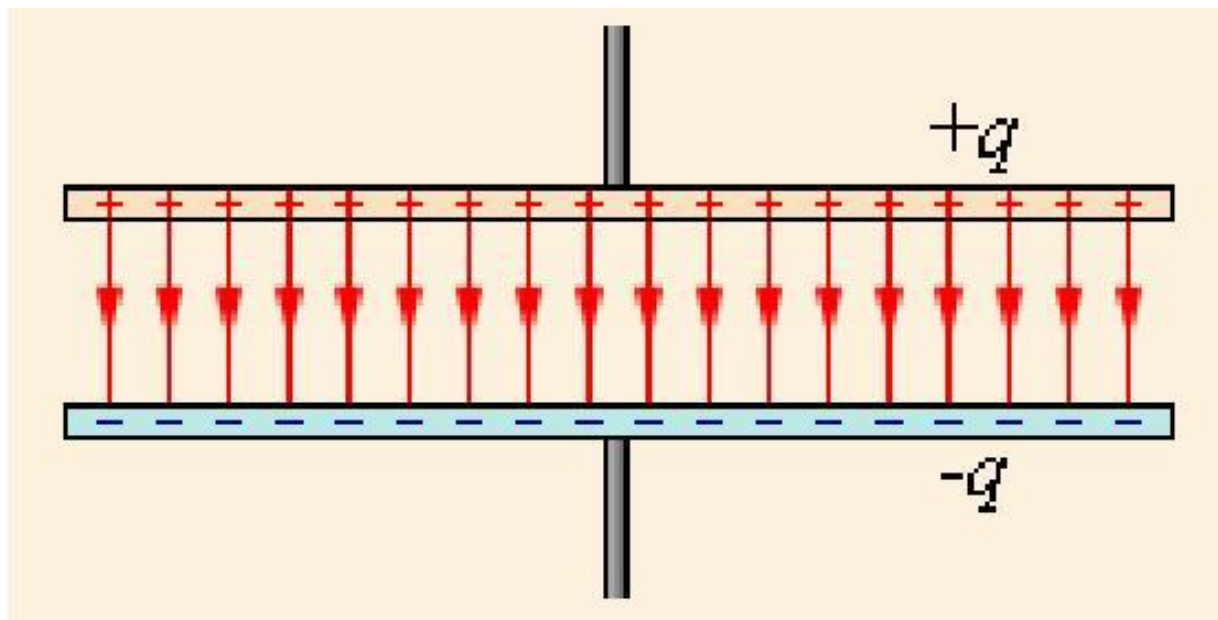
# Вид конденсатора

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**.



Поле плоского конденсатора.

В целом ряде задач можно приближенно пренебрегать полем рассеяния и полагать, что электрическое поле плоского конденсатора целиком сосредоточено между его обкладками. Но в других задачах пренебрежение полем рассеяния может привести к грубым ошибкам, так как при этом нарушается потенциальный характер электрического поля



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

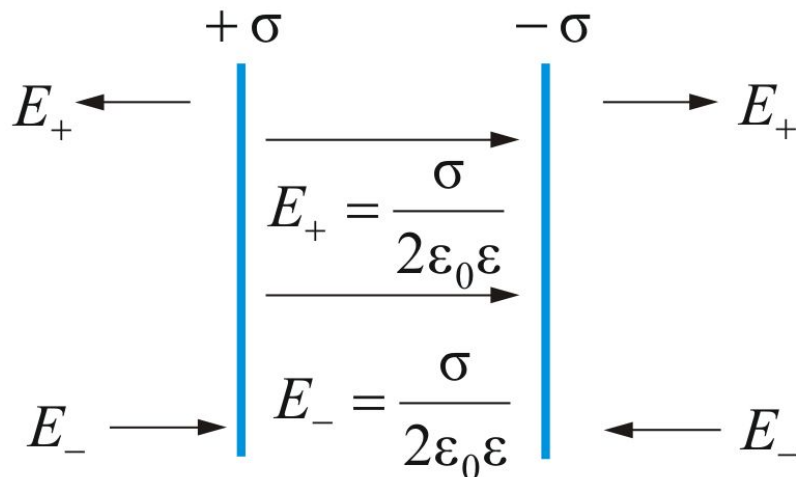


Согласно принципу суперпозиции, напряженность  $\vec{E}$  поля, создаваемого обеими пластинами, равна сумме напряженностей  $\vec{E}^+$  и  $\vec{E}^-$  полей каждой из пластин:

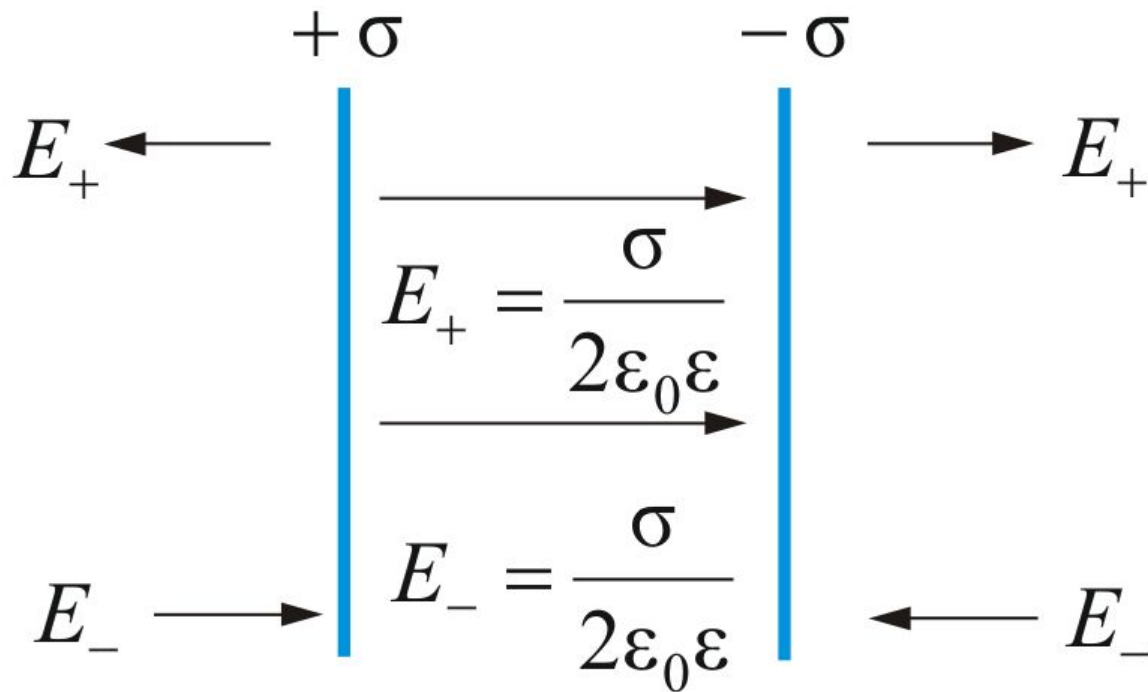
$$\vec{E} = \vec{E}^+ + \vec{E}^-$$

Внутри конденсатора вектора  $\vec{E}^-$  и  $\vec{E}^+$  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  $\sigma$  заряда пластин равна  
где  $q$  – заряд, а  $S$  – площадь каждой пластины.

$$\sigma = \frac{q}{S}$$

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

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

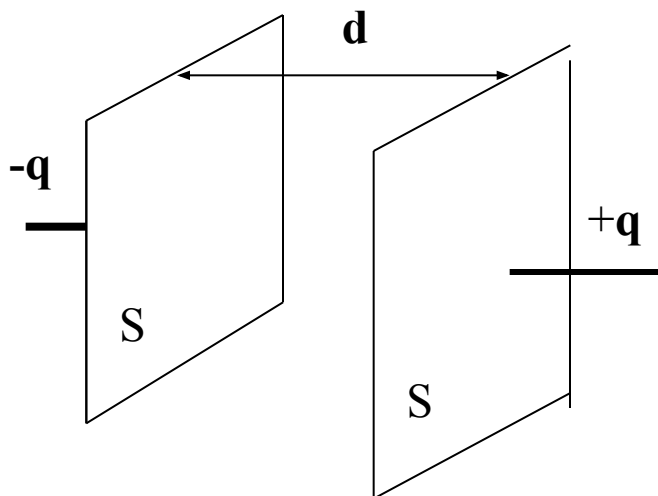
Из этих соотношений можно получить формулу для  
емкости плоского конденсатора,  
где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная.

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{\sigma \cdot S}{E \cdot d} = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$$

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  $\epsilon$  раз:

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

Большой емкостью обладают системы из двух проводников, называемые *конденсаторами*



Плоский  
конденсатор

**Конденсатор** представляет собой два проводника, разделенные слоем диэлектрика. Проводники в этом случае называются *обкладками конденсатора*.

1. Электрическое поле сосредоточено внутри конденсатора.
2. У сферического конденсатора, состоящего из двух concentric сфер, все поле сосредоточено между ними.
3. Под зарядом конденсатора понимают абсолютное значение заряда одной из обкладок.

$$C = \epsilon \epsilon_0 S / d$$
 –емкость плоского конденсатора

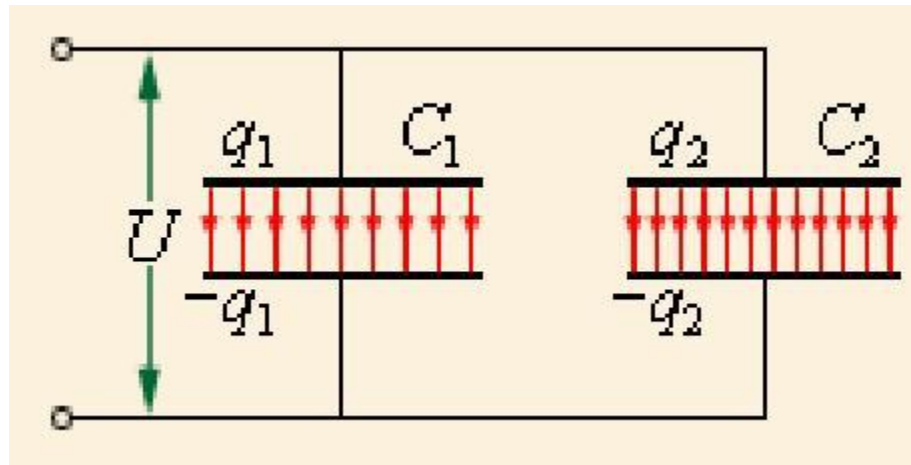
Примерами конденсаторов с другой конфигурацией обкладок могут служить сферический и цилиндрический конденсаторы. *Сферический конденсатор* – это система из двух концентрических проводящих сфер радиусов  $R_1$  и  $R_2$ . *Цилиндрический конденсатор* – система из двух соосных проводящих цилиндров радиусов  $R_1$  и  $R_2$  и длины  $L$ . Емкости этих конденсаторов, заполненных диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , 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  $U$ .

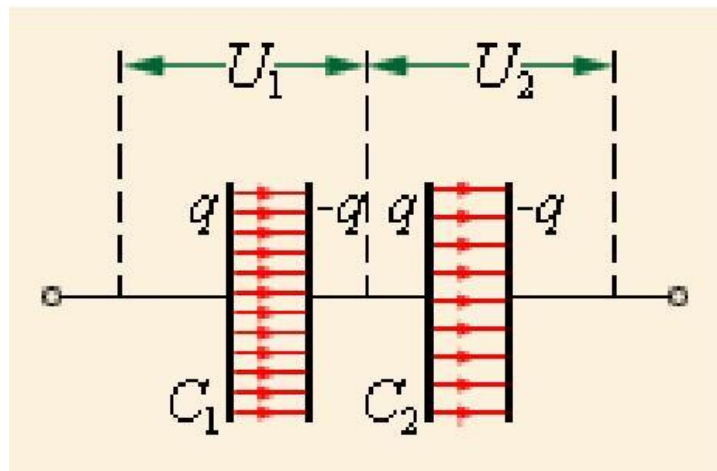
Отсюда следует

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

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

Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор, заряженный зарядом  $q$  при напряжении между обкладками

$$U = U_1 + U_2.$$

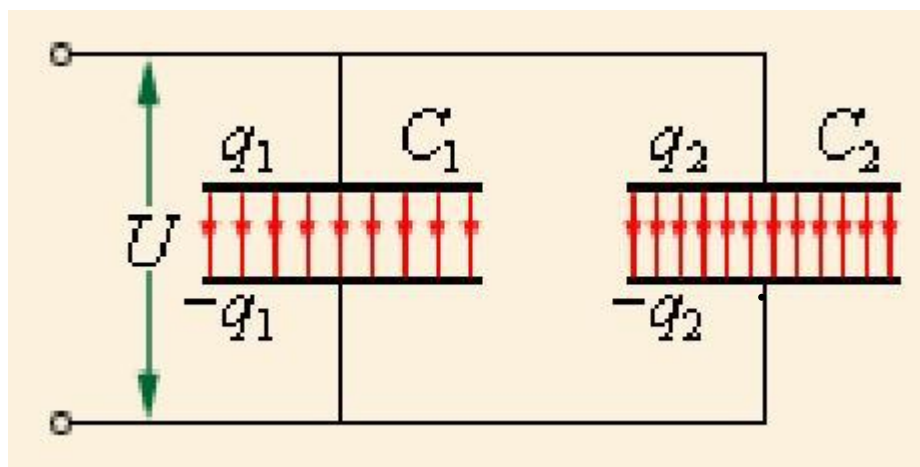
Пластинки соседних конденсаторов, соединенные проводником, имеют одинаковый потенциал. Следовательно,  $U = U_1 + U_2$ .

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

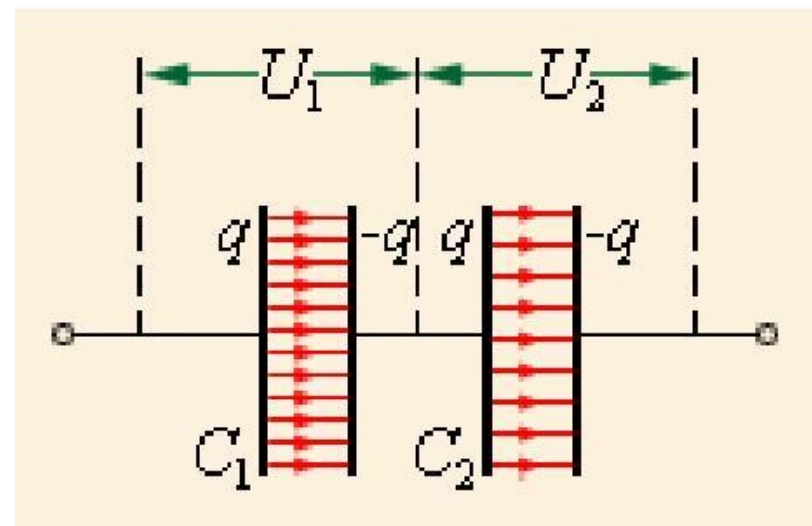
$$U = \frac{q}{C} = \frac{q}{C_1 + C_2} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2}$$

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

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

$$C = n \cdot C$$

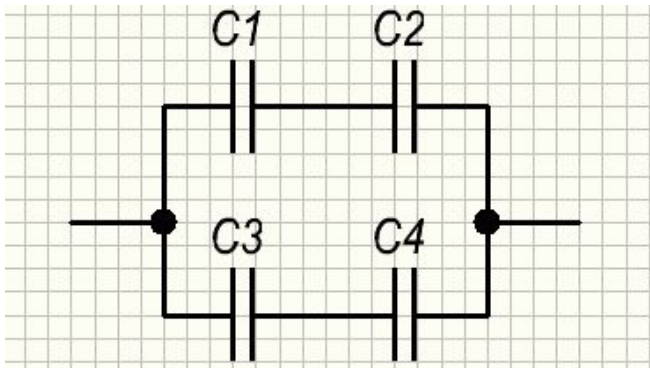
$$C = \frac{C}{n}$$

# 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*



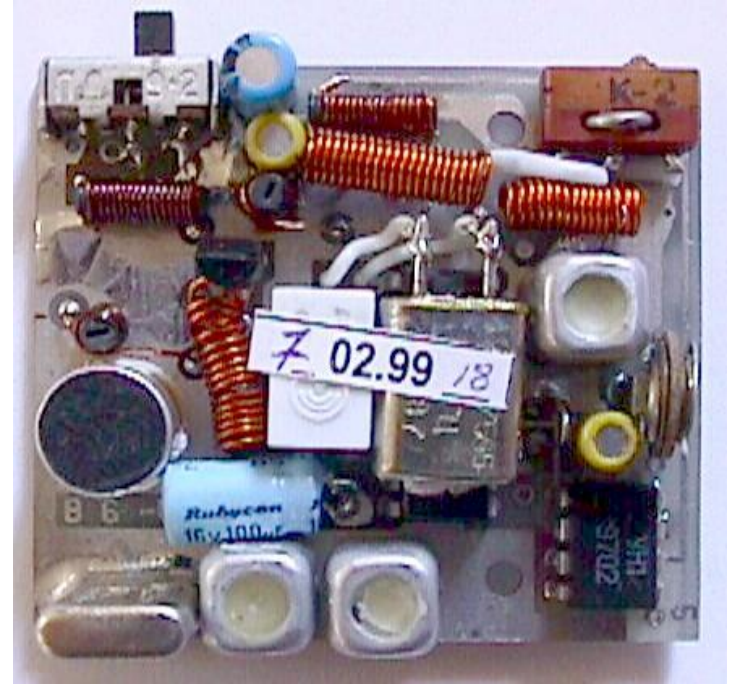
Светильники с разрядными лампами



Лампа фотовспышки



Полимерные конденсаторы с твёрдым электролитом на чипсете



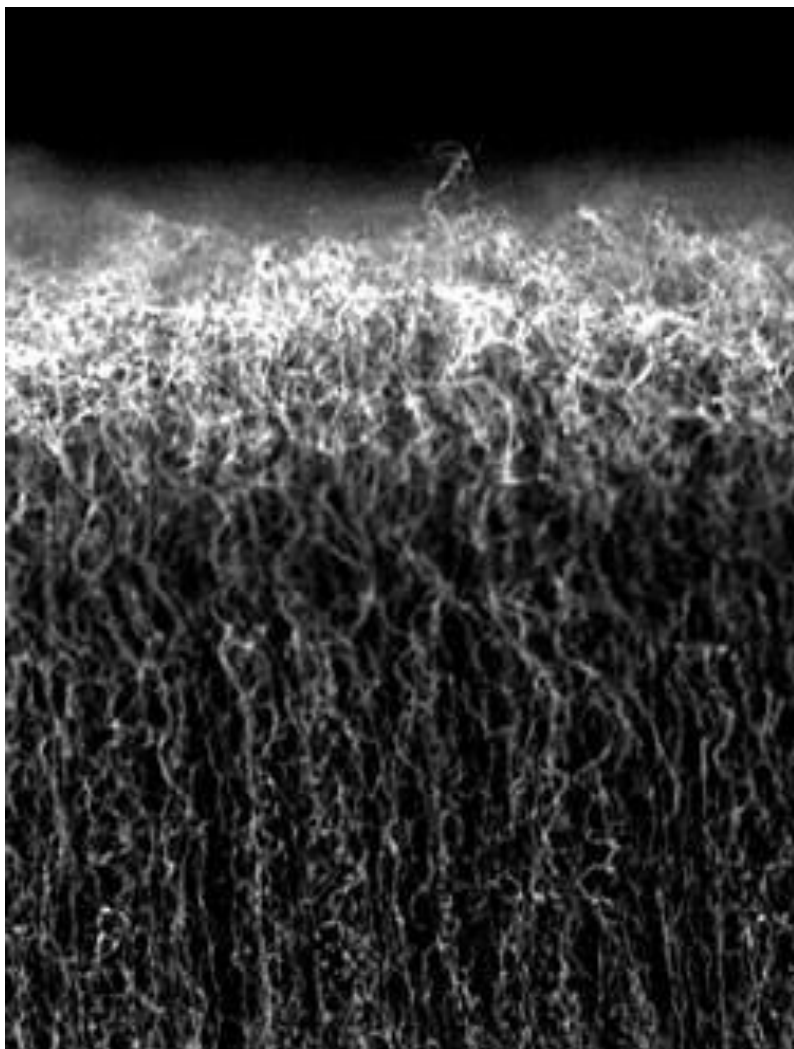
Плато радиостанции буровой



Схема радиоприёмника



# Электролитические конденсаторы



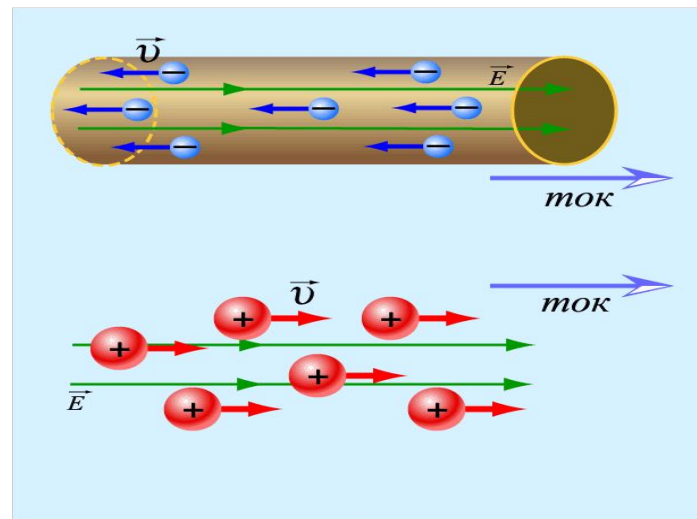
Исследователи из Массачусетского технологического института (МТИ) возлагают надежды на нитевидные частицы, известные как нанотрубки. Их сечение в 30000 раз уступает диаметру человеческого волоса, что позволяет разместить на поверхности огромное количество этих ворсинок. Тем самым площадь, доступная для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

# *Электрический ток*

Для получения направленного движения зарядов нужно приложить электрическое поле

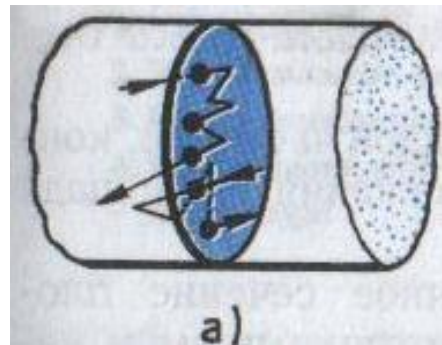
Электрический ток – упорядоченное перемещение зарядов одного знака в каком-либо направлении

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.

При движении заряженных частиц в проводнике происходит перенос электрического заряда с одного места в другое. Однако если заряженные частицы совершают беспорядочное тепловое движение, как например, **свободные электроны в металле**, то переноса заряда не происходит.

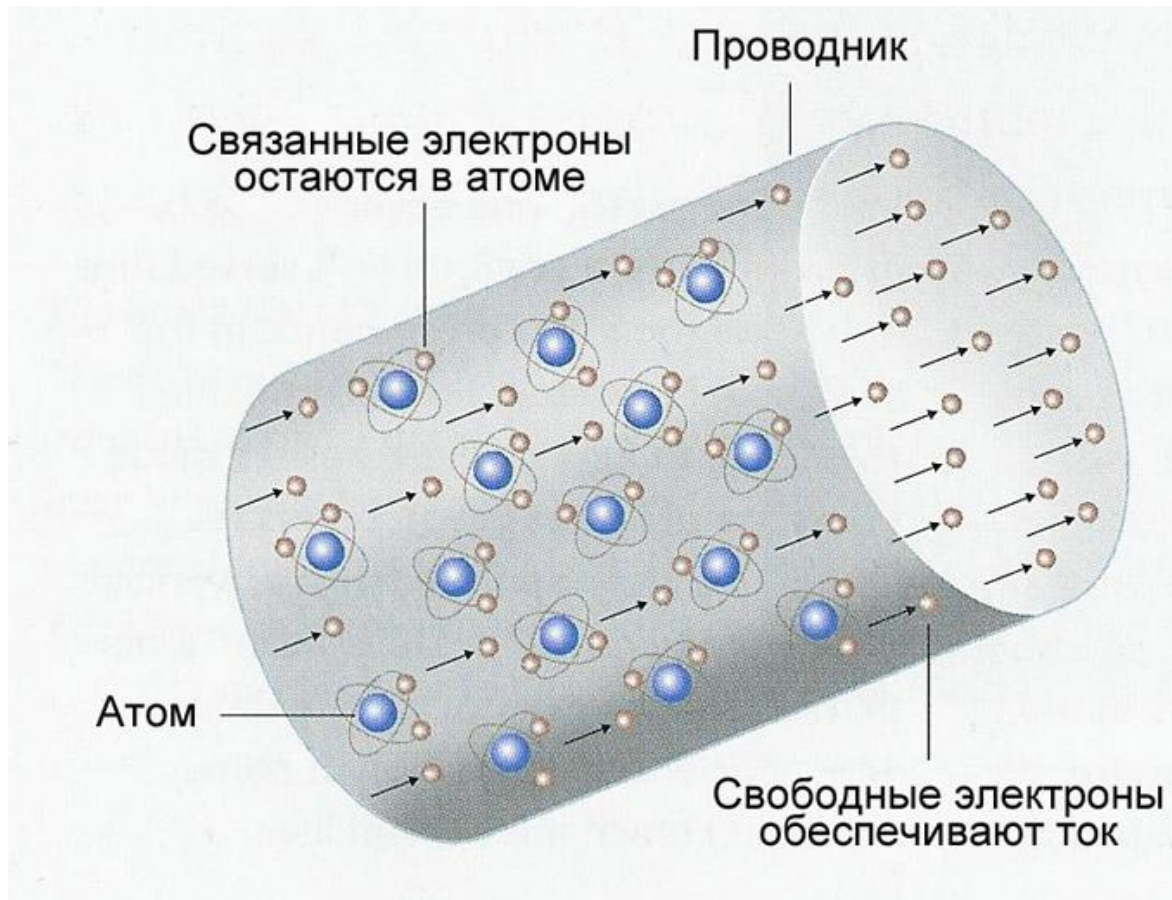


Электрический заряд перемещается через поперечное сечение проводника лишь в том случае, если наряду с беспорядочным движением электроны учувствуют в упорядоченном движении.



В это случае говорят, что в проводнике устанавливается **электрический ток**.

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





# ***Электрический ток***

**Электрический ток возникает при упорядоченном перемещении свободных электронов и ионов.**

**Если перемещать нейтральное в целом тело, то, несмотря на упорядоченное движение огромного числа электронов и атомных ядер, электрический ток не возникает. Полный заряд, переносимый через любое сечение проводника, будет при этом равным нулю, так как заряды разных знаков перемещаются с одинаковой средней скоростью.**

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  $\Delta t$  переносится заряд  $\Delta q$ , то сила тока равна:

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

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

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

Таким образом, сила тока равна отношению заряда  $\Delta q$ , переносимого через поперечное сечение проводника за интервал времени  $\Delta t$ , 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

За время  $\Delta t$  через поперечное сечение проводника (площадка  $S$ ) пройдет заряд  $\Delta q$ :

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

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**.

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

Вектор  $\mathbf{j}$  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).

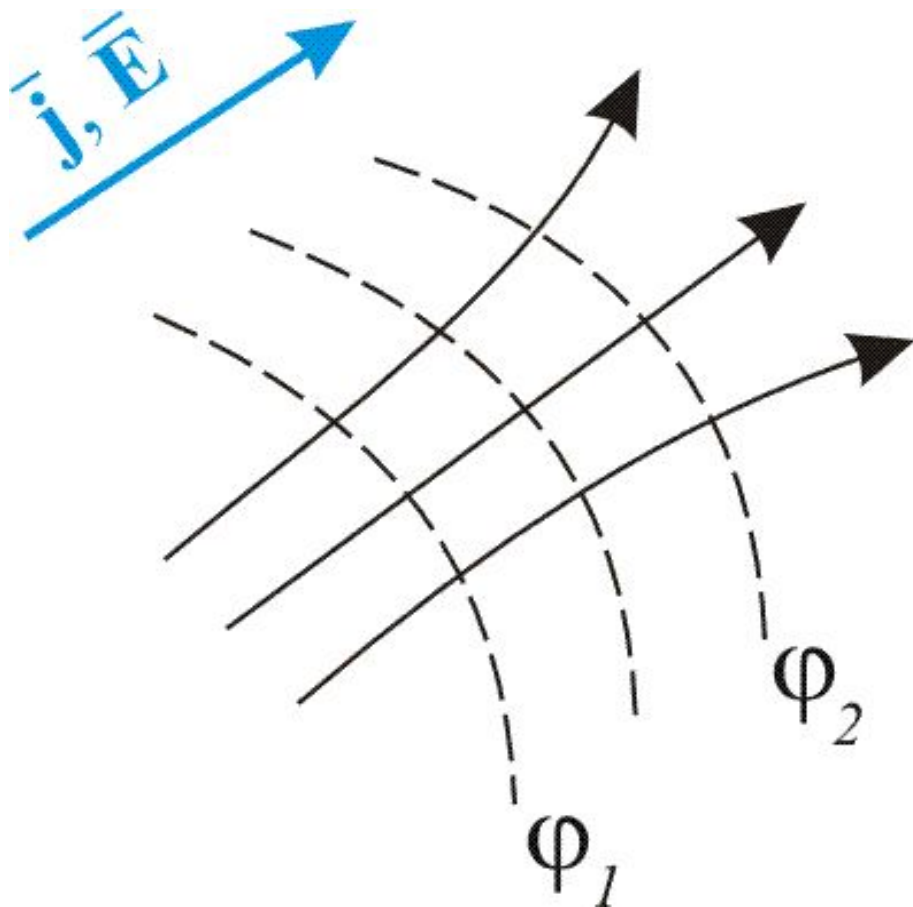


**Если носителями являются как положительные, так и отрицательные заряды, то плотность тока определяется формулой:**

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

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

**Поле вектора**  $\vec{j}$  можно изобразить графически с помощью **линий тока**, которые проводят так же, как и линии вектора напряженности  $\vec{E}$



## Электронная теория проводимости металлов

Носители заряда – электроны. Друде предположил, что электроны в металле ведут себя подобно молекулам идеального газа – могут свободно перемещаться.

На электрон действует поле с напряженностью  $E$  с силой  $F = e \cdot E$  и сообщает ускорение  $a = F/m = e \cdot E/m$

Скорость электронов  $V = at$  не возрастает бесконечно, т.к. происходят столкновения и электроны отдают часть кинетической энергии.

При постоянном токе средняя скорость упорядоченного движения электронов остается во времени неизменной. Вся энергия, полученная электронами под действием электрического поля, должна быть передана атомам вещества.

Пусть при каждом столкновении электрон полностью теряет ту энергию, которую он получил под действием силы  $F = e \cdot E$  за время свободного пробега  $\tau$  от одного столкновения до другого. Это означает, что вначале пробега он имеет скорость только своего теплового движения  $v$ , а в конце пробега его скорость увеличивается на величину  $U_1$ .

Считаем, что  $U_0 = 0$ , а  $U_{\text{кон}} = U_1$ .

$$U_1 = a \cdot \tau = \tau \cdot e \cdot E / m$$

Средняя скорость направленного движения

$$U = (U_0 + U_1) / 2 = \frac{1}{2} U_1 = \frac{1}{2} \frac{e}{m} E \cdot \tau$$

Время  $\tau$  свободного пробега определяется средней скоростью беспорядочного теплового движения  $V$  и средней длиной свободного пробега  $\lambda$ .  $\tau = \lambda / V$  Тогда плотность тока в металлическом проводнике ...

$$j = n \cdot e \cdot v = \frac{1}{2} \frac{ne^2}{m} \frac{\lambda}{U} E$$

Перепишем выражение в виде

$$j = \gamma E$$

Это закон Ома в дифференциальной форме.

Величина  $\gamma$  характеризует свойства проводников – **удельная электропроводность**

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

Энергию  $w_1$ , приобретаемую одним электроном за время  $t$  под действием силы  $F = eE$  можно рассчитать, умножив  $mU_1^2/2$  на число свободных пробегов за время  $t$ , т.е. на  $t/\tau$ :

$$W_1 = \frac{mv^2}{2} \frac{t}{\tau} = \frac{m}{2} \left( \frac{eE}{m} \tau \right)^2 \frac{t}{\tau} = \frac{e^2}{2m} \tau E^2 t$$

При постоянном токе вся эта энергия передается веществу и переходит в тепловое движение его атомов. В единицу времени единице объема передается энергия

$$W = \frac{nW_1}{t} = \frac{1}{2} \frac{ne^2}{m} \tau E^2 = \gamma E^2$$

Это закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме.

Удельная электропроводность  $\gamma \sim n$ , однако, от числа свободных электронов в металле  $n$  зависит и теплопроводность металла. Измерения показывают, что отношение коэффициента теплопроводности к электропроводности  $\gamma$  для всех металлов пропорционально температуре.

$$\frac{\kappa}{\gamma} = \text{const} \cdot T$$

Закон Видемана-Франца

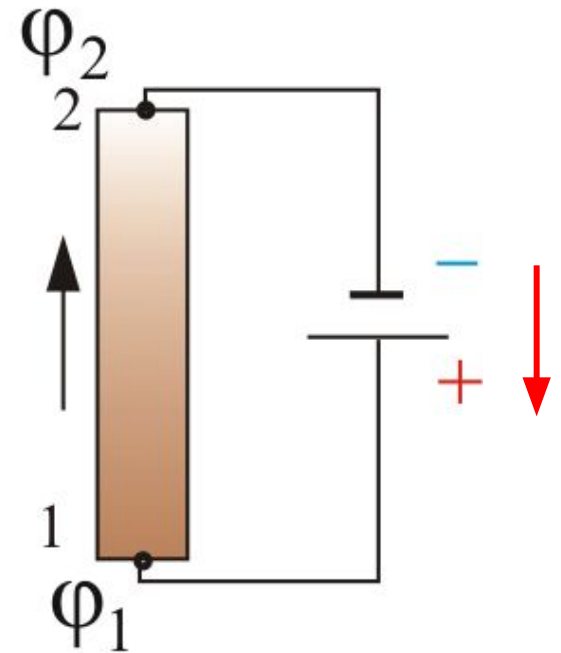


## 10.4. Сторонние силы и ЭДС

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.

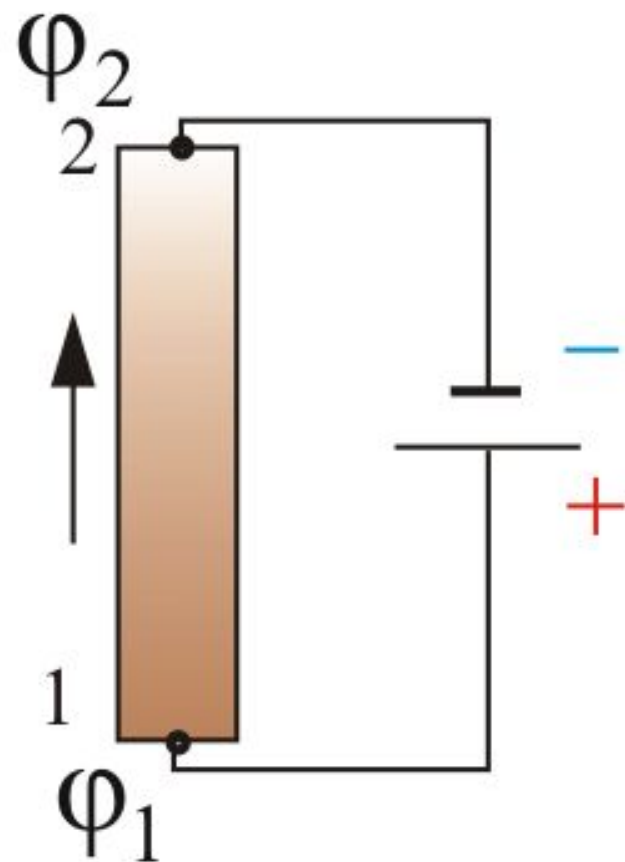


Поэтому в замкнутой цепи, наряду с нормальным движением зарядов, должны быть участки, на которых движение (положительных) зарядов происходит в направлении возрастания потенциала, т.е. против сил электрического поля



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:**

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

Тогда **Э.Д.С.**

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

**Для замкнутой цепи:**

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

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

***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.