



**СПбГЭТУ «ЛЭТИ»**

**ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

*2 семестр ФИБС*

**Посредник Олеся Валерьевна**

**Доцент кафедры Физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ»**

**[ovposrednik@etu.ru](mailto:ovposrednik@etu.ru)**

Кафедра физики

# Емкость уединенного проводника

Емкость уединенного проводника зависит от его размеров. Емкость зависит от **диэлектрических свойств среды**, окружающей проводник.

Рассмотрим уединенный проводящий шар радиуса  $R$ , с зарядом  $q$ . Его потенциал  $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$ , отсюда

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R$$

В системе СИ единица емкости – **фарада** – емкость такого уединенного проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда в 1 Кл.

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

Для шара радиуса  $R$   $C = \frac{q}{\varphi} = \frac{q}{\frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R}} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R = 1 \cdot 9 \cdot 10^9 \text{ м} = 9 \cdot 10^6 \text{ км.}$

$$C_{\text{Земли}} = 711 \text{ мкФ} \quad R = 6400 \text{ км.}$$

# Взаимная емкость проводников. Конденсаторы.

$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{C}$ , где  $C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$  – взаимная емкость проводников.

**Плоский конденсатор** – две параллельные металлические пластины с площадью  $S$  каждая на расстоянии  $d$  одна от другой.

Если  $\sqrt{S} \gg d$  и  $\sigma > 0$  и  $-\sigma$ ;  $q = \sigma S$   $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\sigma d}{\epsilon \epsilon_0}$  и  $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$

**Сферический конденсатор:**

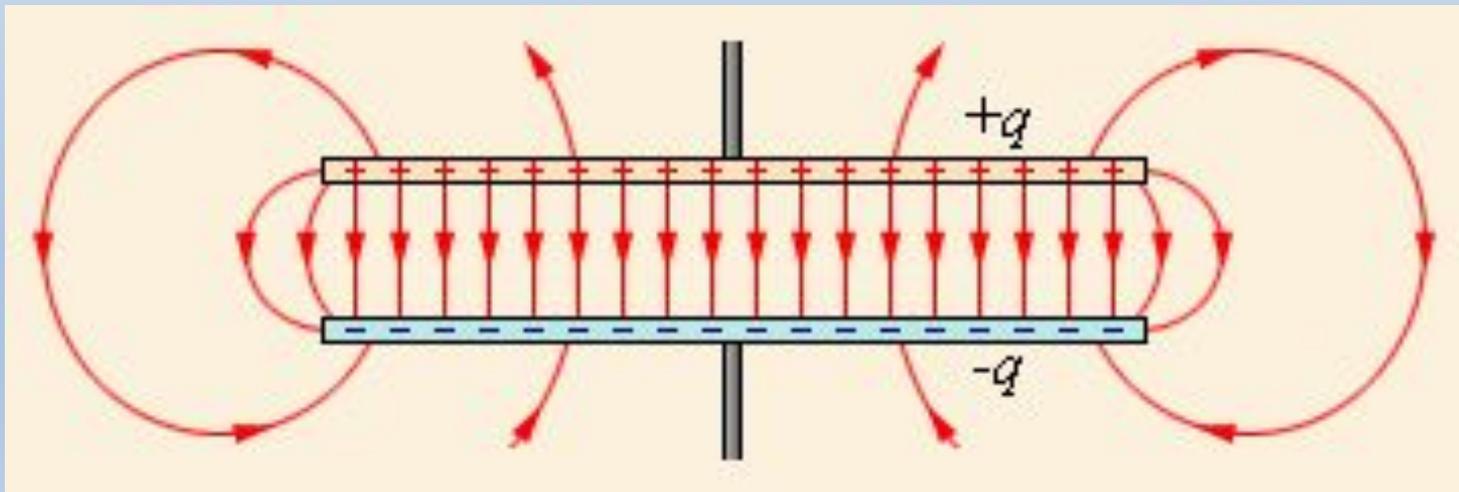
$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right); C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1 r_2}{r_2 - r_1}.$$

**Цилиндрический конденсатор:**

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0 h} \ln \frac{r_2}{r_1}; C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 h}{\ln \frac{r_2}{r_1}}.$$

# Плоский конденсатор

- ❖ 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*.



# Энергия заряженного конденсатора

Если малое количество заряда  $dq$  проходит между обкладками, то работа электрических сил  $dA$ , равна  $dA = u dq$ .

заряд обкладок  $q = Cu$  тогда  $dA = C u du$ .

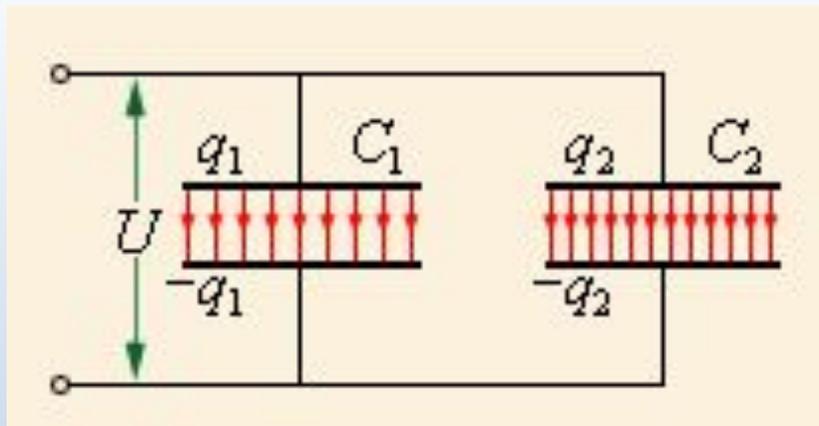
Полную работу, совершенную электростатическими силами за все время разряда, равную энергии конденсатора  $W$ , мы найдем, интегрируя это выражение между значениями напряжения  $U$  (начало разряда) и  $0$  (конец разряда):

$$A = W = C \int_0^U u du = \frac{1}{2} C U^2.$$

Пользуясь соотношением  $q = Cu$ , можно представить выражение для энергии заряженного конденсатора также в любом из следующих видов:

$$W = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2C} q^2 = \frac{1}{2} q U.$$

# Параллельное соединение конденсаторов



$$U_1 = U_2 = U$$

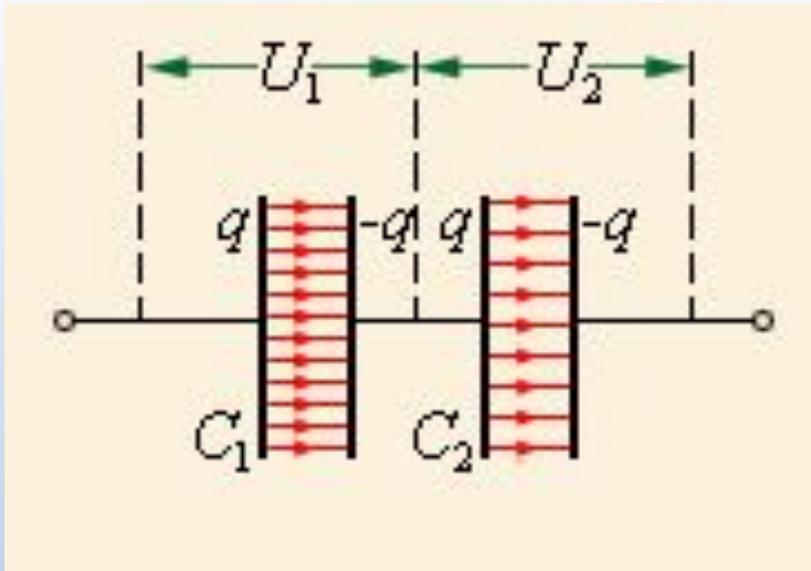
$$q_1 = C_1 U$$

$$q_2 = C_2 U$$

$$q = q_1 + q_2 \quad C = \frac{q_1 + q_2}{U} \quad \rightarrow \quad C = C_1 + C_2$$

**При параллельном соединении электроемкости складываются**

# Последовательное соединение конденсаторов



$$q = q_1 = q_2$$

$$U_1 = q / C_1$$

$$U_2 = q / C_2$$

$$U_1 = U_2 + U \quad C = \frac{q}{U_1 + U_2} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

При последовательном соединении конденсаторов складываются обратные величины емкостей

# Энергия электрического поля

$$W = \frac{1}{2} CU^2 \text{ – энергия конденсатора}$$

Рассмотрим сначала однородное поле, мы получим

$$W = \frac{1}{2} \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} U^2 = \frac{\epsilon \epsilon_0 dS}{2} E^2, \quad E = \frac{U}{d}, \text{ а } d \cdot S \text{ – объем, занимаемый}$$

полем.

Объемная плотность энергии электрического поля:  $\omega = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2}$ .

Если поле неоднородно, то его всегда можно разбить на элементарные объемы  $dV$  и считать, что в пределах бесконечно малого объема это поле однородно. Поэтому энергия, заключенная в объеме поля  $dV$ , будет  $\omega dV$ . Полная энергия любого электрического поля может быть представлена в следующем виде:

$$W = \frac{\epsilon_0}{2} \int_V \epsilon E^2 dV.$$

# ЛЕКЦИЯ 6

- ❖ Характеристики электрического тока
  - ❖ Уравнение неразрывности
  - ❖ Действие электрического тока
  - ❖ Баллистический гальванометр
- ❖ Постоянный электрический ток. Закон Ома.
  - ❖ Компенсационный метод измерения ЭДС
  - ❖ Сопротивление проводников. Соединение проводников.
    - ❖ Измерение сопротивлений
    - ❖ Напряжение на зажимах источника
- ❖ *Работа и мощность постоянного тока. Закон Джоуля –Ленца*
  - ❖ *Разветвленные цепи. Правила Кирхгофа*

# Характеристики электрического тока

Ток, возникающий в проводнике при создании электрического поля, называется ***током проводимости***.

*Два условия, необходимые для возникновения тока проводимости:*

- 1) Наличие в данной среде носителей заряда, т.е. заряженных частиц, которые способны перемещаться. Это электроны проводимости, положительные и отрицательные ионы в электролитах и т.д.;
- 2) Наличие в данной среде электрического поля, энергия которого затрачивается на перемещение электрических зарядов.

Упорядоченное движение зарядов может осуществляться и другим способом – перемещение в пространстве заряженного тела (проводника или диэлектрика). Такой ток называется ***конвекционным***.

# Характеристики электрического тока (ЭТ)

Линии, вдоль которых движутся заряженные частицы, названы *линиями тока*. Для количественной характеристики ЭТ служат две основные величины: *плотность тока и сила тока*.

*Сила тока  $I$*  в проводнике равна величине  $q$ , проходящего в единицу времени через поперечное сечение проводника:  $I = \frac{dq}{dt}$

*Плотность тока* равна величине заряда, проходящего в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярную линиям тока. Характеризует направление ЭТ в различных точках рассматриваемой поверхности и распределение силы тока по этой поверхности и носит название *вектора плотности тока  $\vec{j}$* .

$$\vec{j} = ne\vec{v},$$

где  $n$  – концентрация заряженных частиц;  $e$  – заряд электрона,  $\vec{v}$  – скорость.  $\vec{v}$  характеризует движение заряженных частиц в данной точке, то и вектор  $\vec{j}$  определяет ЭТ в данной точке проводника.

# Характеристики электрического тока (ЭТ)

Если выделить внутри проводника бесконечно малую площадку  $dS$ , перпендикулярную к вектору  $\vec{j}$ , то величина  $q$ , проходящего через нее за время  $dt$  равна:  $dq = j dS dt$ .

Если  $dS$  не перпендикулярна к  $\vec{j}$ , то в этом выражении вместо  $\vec{j}$  надо взять составляющую плотности тока  $j_n$  перпендикулярную к  $dS$ .

Зная  $\vec{j}$  в каждой точке проводника, можно выразить через нее и силу тока  $I = \int_{(S)} j_n dS$ , где интегрирование производится по всей поверхности любого сечения проводника [А] при  $1\text{А} = 1\text{Кл}/1\text{с}$ ,  $[j] = [\text{А}/\text{м}^2]$ .

Если плотность тока постоянна во времени, то говорят, что в проводнике имеется постоянный, или стационарный, ток.

# Уравнение неразрывности

Рассмотрим внутри проводника с током какую-либо замкнутую поверхность  $S$  и будем понимать под  $j_n$  проекцию вектора плотности тока  $\vec{j}$  на внешнюю нормаль к элементу  $dS$ . Тогда величина положительного заряда, уходящего в единицу времени через всю поверхность  $S$  наружу, есть  $\oint_{(S)} j_n dS$ .

Согласно ЗСЭЗ: заряды только перераспределяются между телами, но полная сумма возникающих  $+q$  и  $-q$  равна нулю. Поэтому,  $\frac{dq}{dt}$  есть изменение за единицу времени  $+q$ , заключенного внутри замкнутой поверхности  $S$ , то

$$-\frac{dq}{dt} = \oint_{(S)} j_n dS - \text{уравнение неразрывности.}$$

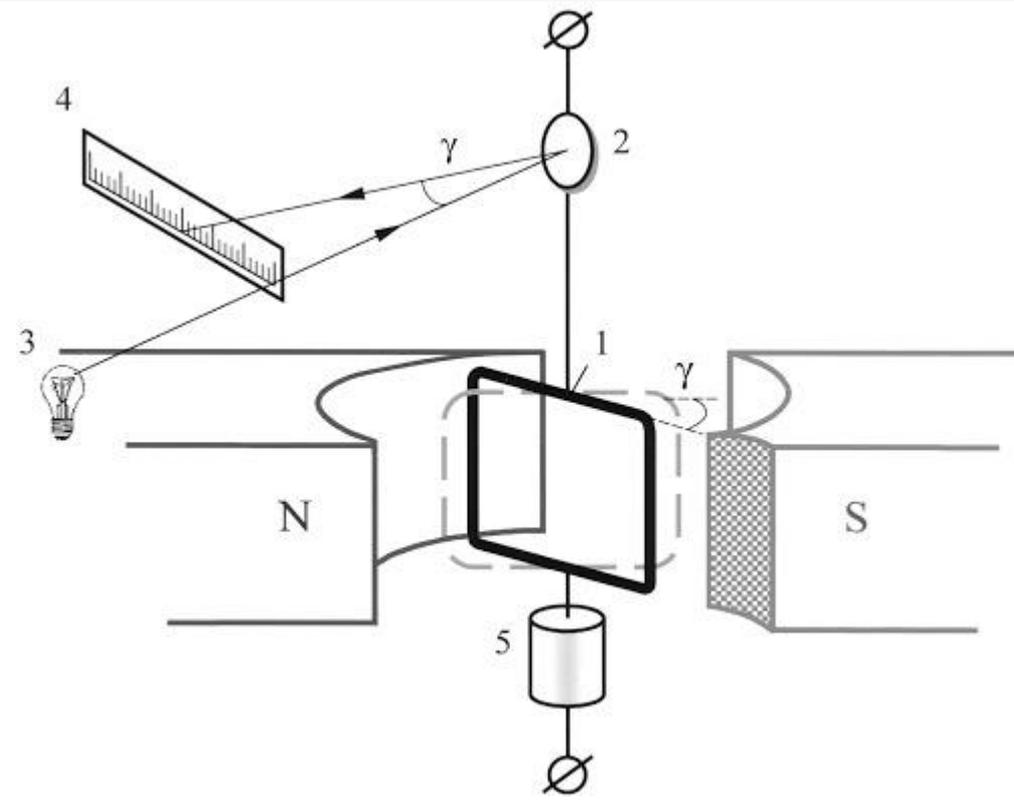
Если токи постоянны, то все величины не зависят от времени, и тогда поток  $\vec{j}$  через любую замкнутую поверхность равен нулю, а, значит, для постоянных токов линии тока непрерывны.

В случае постоянного тока  $\oint_{(S)} j_n dS = 0$

# Действие электрического тока

- 1) *Магнитное действие тока* (ток действует на магнитную стрелку, которая в зависимости от направления тока отклоняется (Профессор Эрстед в 1820 г.));
- 2) *Химическое действие тока* (электрический ток может в некоторых проводниках выделять их химические составляющие);
- 3) *Тепловое действие тока* (при пропускании тока через проводник, то он нагревается.)

# БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ ГАЛЬВАНОМЕТР



$$M_{\Pi} = -f\gamma \quad T = 2\pi \sqrt{I/f}$$

$$M = ai$$

$$\int_{\tau} M dt = a \int_{\tau} i dt = aq,$$

где  $q$  – полный заряд

$$I\omega_0 = aq \text{ и } W_{\text{к}} = \frac{1}{2} I\omega_0^2.$$

$$W_{\Pi} = \frac{1}{2} f\gamma^2,$$

$\gamma_{\text{max}}$  поворот рамки,

$$\text{то } \frac{1}{2} I\omega_0^2 = \frac{1}{2} f\gamma_{\text{max}}^2$$

$$q = \frac{I\omega_0}{a} = \frac{1}{2} \sqrt{fI\gamma_{\text{max}}} = b\gamma_{\text{max}},$$

$b$  – постоянная для данного прибора, называемая баллистической постоянной.

# Постоянный электрический ток. Закон Ома.



*Георг Симон Ом*  
*Georg Simón Alfred Ohm*  
(16 марта 1789 – 6 июля 1854)

**Закон Ома:**

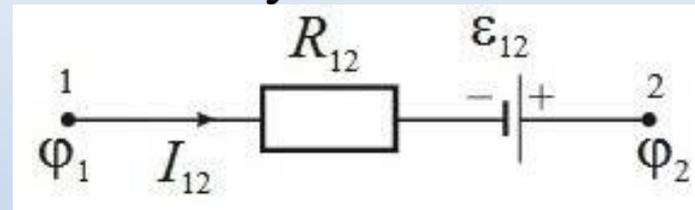
сила тока, текущего по  
однородному металлическому  
проводнику, пропорциональна  
падению напряжения на  
проводнике.

$$I = \frac{1}{R} U$$

# ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

**Падением напряжения** на участке цепи называется физическая величина, численно равная работе, совершаемой суммарным полем кулоновских и сторонних сил при перемещении вдоль цепи единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2:

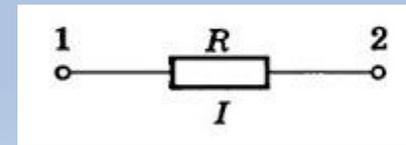
$$U_{12} = \int_1^2 (\vec{E}_{\text{кул}} + \vec{E}_{\text{стор}}) d\vec{l} = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l},$$



так как  $\int_1^2 \vec{E}_{\text{кул}} d\vec{l} = \varphi_1 - \varphi_2$ , а  $\int_1^2 \vec{E}_{\text{стор}} d\vec{l} = \epsilon_{12}$ , то

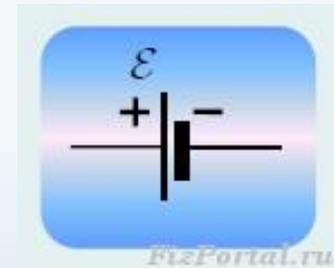
$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \epsilon_{12}.$$

**Однородным** называется проводник, в котором не действуют сторонние силы. Тогда  $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ , т.е. падение напряжения совпадает с разностью потенциалов на концах проводника.



# ЭДС

Для обозначения источников тока на электрических схемах используется специальное обозначение



Электростатическое поле совершает положительную работу по перемещению  $+q$  в направлении уменьшения потенциала поля. Источник тока проводит разделение электрических зарядов – на одном полюсе накапливаются  $+q$ , на другом –  $q$ .

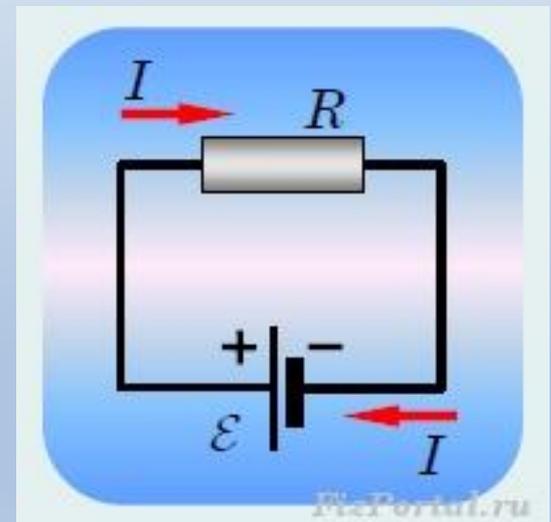
Напряженность электрического поля в источнике направлена от положительного полюса к отрицательному, поэтому работа электрического поля по перемещению положительного заряда будет положительной при его движения от «плюса» к «минусу».

**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 принципиальная разница  $\Delta\varphi$  и  $\varepsilon$ .**

# 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.



# ЭДС

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:

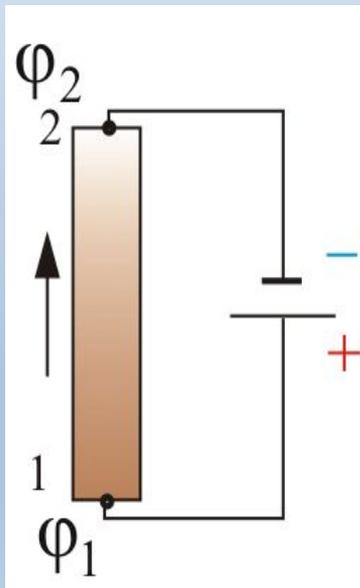
$$A = A_{12} + W$$

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  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  постоянными, источник тока должен непрерывно совершать работу  $A_{12}$ , компенсирующую потерю энергии во внешней цепи.

# ЭДС

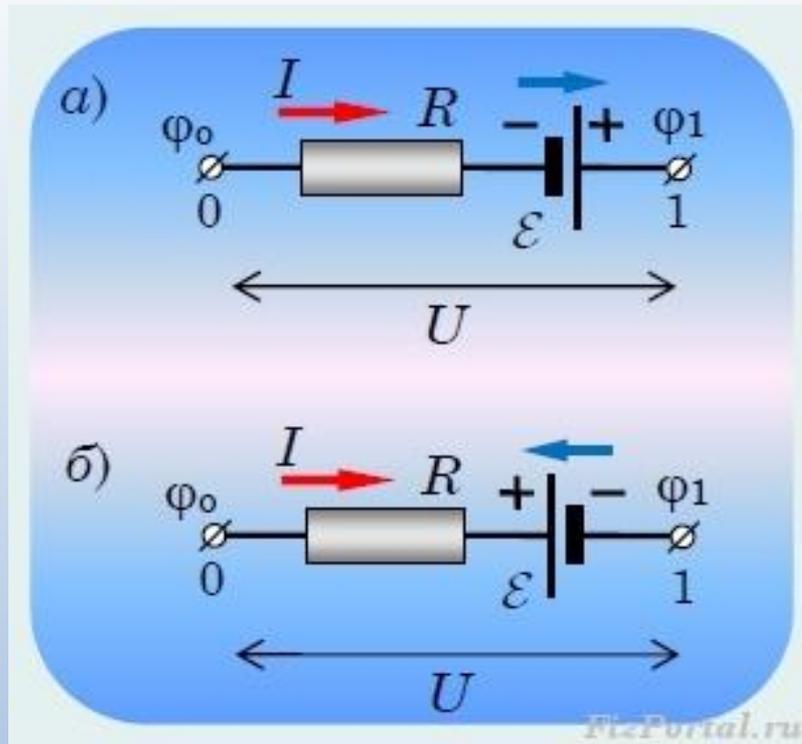
❖ Рассмотрим проводник длиной  $l$ , на концах проводника создана разность потенциалов  $\Delta\varphi$ , под действием которой заряд перемещается по проводнику. Пусть  $\varphi_1 > \varphi_2$ , тогда положительные заряды будут двигаться от точки 1 к точке 2. Чтобы поддерживать постоянный ток, надо положительные заряды перемещать против поля в точку 1.



❖ Такое перемещение осуществляют источники тока (или ЭДС). В источнике разделение зарядов происходит под действием сил неэлектрического происхождения — эти силы называются сторонними (химического, механического, магнитного происхождения)

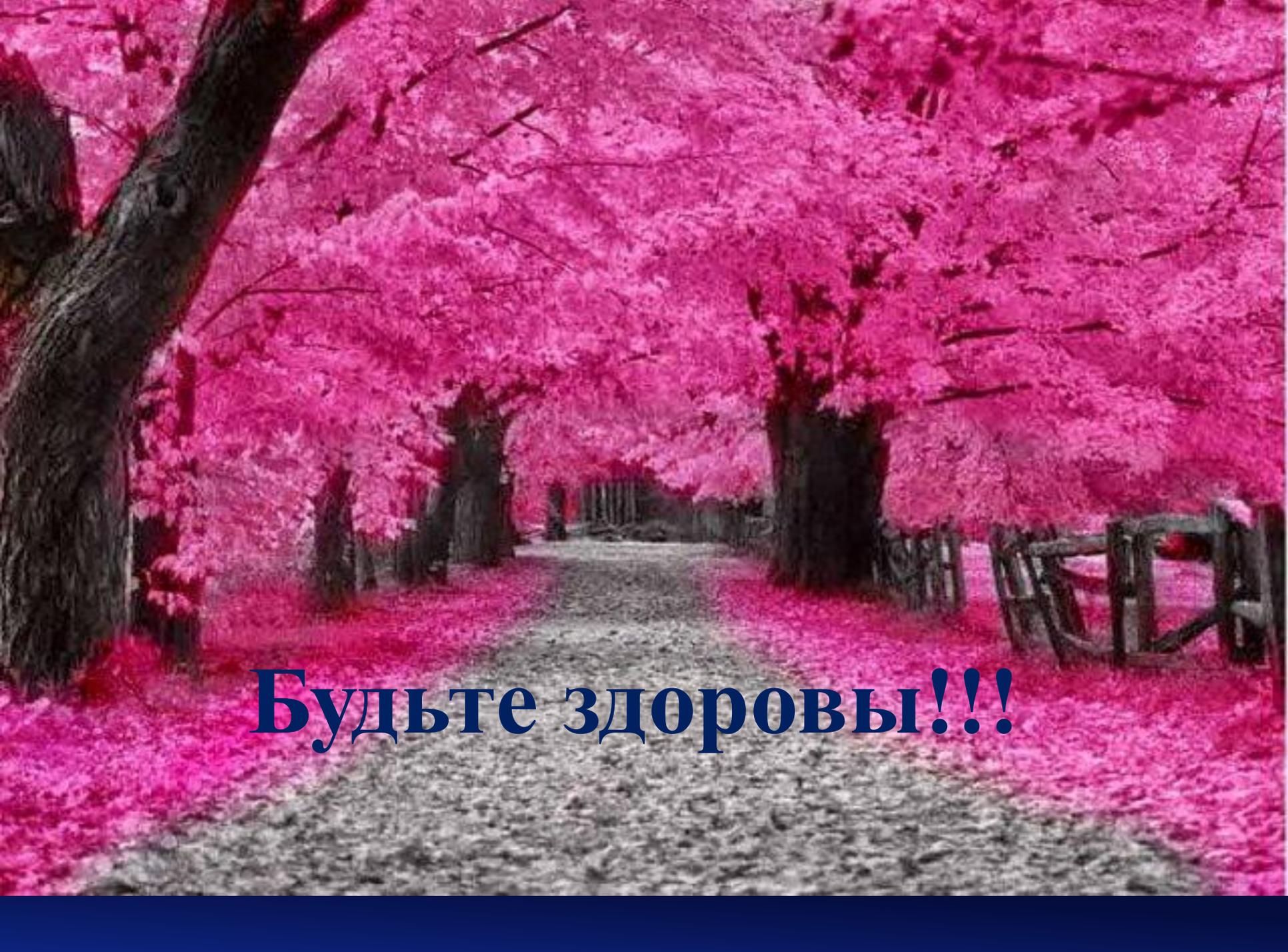
$$\text{❖ } \vec{F}_{\text{стор}} = q\vec{E}_{\text{стор}}$$

# ЭДС



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

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

A vibrant pink cherry blossom tree tunnel. The path is covered in fallen pink petals. A wooden fence runs along the right side of the path. The trees are in full bloom, creating a dense canopy of pink. The scene is bright and cheerful.

**Будьте здоровы!!!**