

# Лекция 10. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

- 10.1. Причины электрического тока.
- 10.2. Плотность тока.
- 10.3. Уравнение непрерывности.
- 10.4. Сторонние силы и Э. Д. С.

# 10.1. Причины электрического тока

Заряженные объекты являются причиной не только электростатического поля, но еще и электрического тока.

В этих двух явлениях, есть существенное отличие:

Для возникновения электростатического поля требуются неподвижные, каким-то образом зафиксированные в пространстве заряды.

Для возникновения электрического тока, требуется наличие свободных, не закрепленных заряженных частиц, которые в электростатическом поле неподвижных зарядов приходят в состояние *упорядоченного движения вдоль силовых линий поля*.

- ***Упорядоченное движение свободных зарядов вдоль силовых линий поля - электрический ток.***

Распределение **напряженности  $E$**  и **потенциала  $\varphi$**  электростатического поля связано **с плотностью распределения зарядов  $\rho$**  в пространстве **уравнением Пуассона:**

$$\Delta\varphi = \frac{1}{\varepsilon} \rho,$$

и

$$\nabla\mathbf{E} = \frac{1}{\varepsilon} \rho$$

Где  $\rho = \frac{\partial q}{\partial V}$  — объемная плотность заряда.

Если заряды неподвижны, т. е. распределение зарядов в пространстве стационарно, то  $\rho$  не зависит от времени, в результате чего и  $E$ , и  $\varphi$  являются функциями только координат, но не времени. Поэтому поле и называется *электростатическим*.

Наличие свободных зарядов приводит к тому, что  $\rho$  становится функцией времени, что порождает изменение со временем и характеристик электрического поля, появляется электрический ток. Поле перестает быть электростатическим.

**Количественной мерой тока служит  $I$  - заряд, перенесенный через заданную поверхность  $S$  (или через поперечное сечение проводника), в единицу времени, т. е.:**

$$I = \frac{\partial q}{\partial t} \quad (10.1.3)$$

Если, однако, движение свободных зарядов таково, что оно не приводит к перераспределению зарядов в пространстве, то есть к изменению со временем плотности зарядов  $\rho$ , то в этом частном случае электрическое поле – снова статическое.

Этот частный случай есть случай постоянного тока.

***Ток, не изменяющийся по величине со временем – называется постоянным током***

$$I = \frac{q}{t} \quad (10.1.4)$$

- отсюда видна **размерность силы тока** в СИ:

$$1A = \frac{Кл}{с};$$

Как может оказаться, что заряды движутся, а плотность их не меняется, мы разберемся позже.

Сначала **введем количественные характеристики электрического тока.**



## 10.2. Плотность тока

Как известно из курса школьной физики, есть **две основные характеристики электрического тока** – это сила тока  $I$  и плотность тока  $\mathbf{j}$ .

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

Связь между этими двумя физическими величинами такова:

$$I = \int_s \mathbf{j} d\mathbf{S} \quad (10.2.1)$$

Или наоборот, **модуль вектора плотности тока численно равен отношению силы тока через элементарную площадку, перпендикулярную направлению движения носителей заряда, к ее площади:**

$$j = \frac{\partial I}{\partial S_{\perp}}$$

(10.2.2)

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.

Ясно, что **плотность тока  $\mathbf{j}$**  связана с плотностью свободных зарядов  $\rho$  и со скоростью их движения  $\mathbf{v}_{dr}$ :

$$\mathbf{j} = \rho \mathbf{v}_{dr}$$

За направление вектора  $\mathbf{j}$  принимают направление вектора  $\mathbf{v}_{dr}$  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:

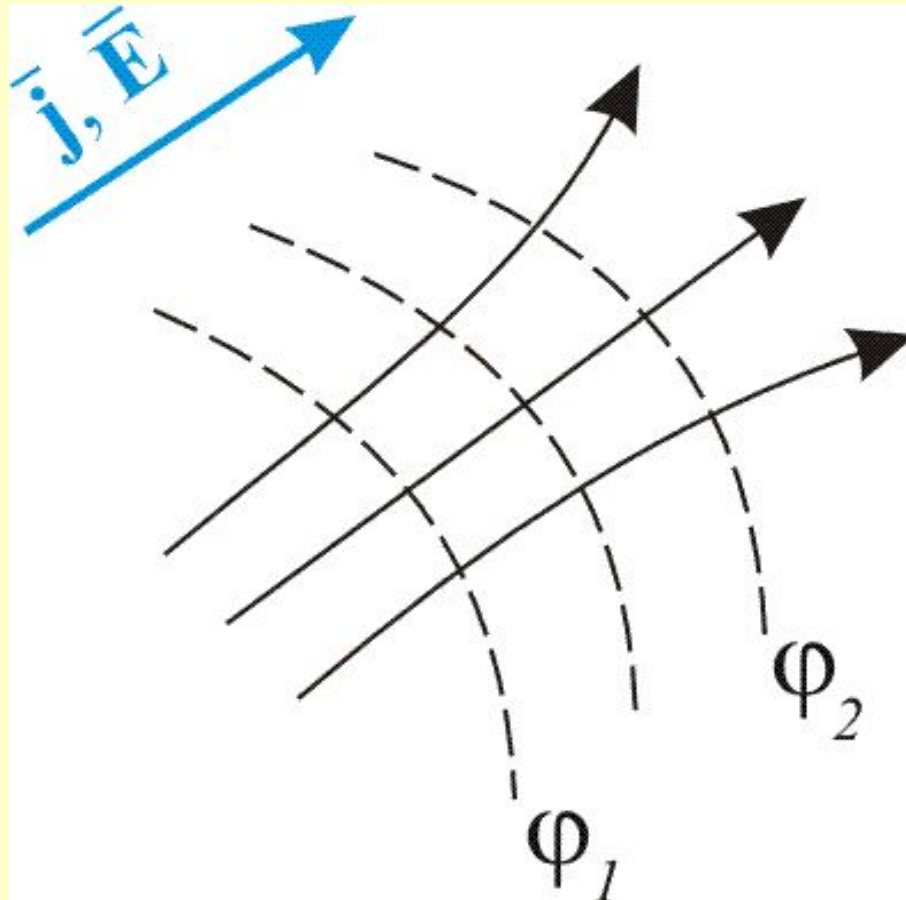
$$\mathbf{j} = q_+ n_+ \mathbf{v}_{dr,+} + q_- n_- \mathbf{v}_{dr,-} \quad (10.2.4)$$

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

Там, где носители только электроны,  
плотность тока определяется  
выражением:

$$\mathbf{j} = en\mathbf{v}_{др}. \quad (10.2.5)$$

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



Зная  $\vec{j}$  в каждой точке интересующей нас поверхности  $S$  можно найти силу тока через эту поверхность, как поток вектора  $\vec{j}$ :

$$I = \oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}. \quad (10.2.6)$$



Сила тока является скалярной величиной и алгебраической, а знак определяется выбором направления нормали к поверхности  $S$ .

## 10.3. Уравнение непрерывности

Представим себе, в некоторой проводящей среде, где течет ток, замкнутую поверхность  $S$ . Для замкнутых поверхностей векторы нормалей, а следовательно, и векторы  $d\mathbf{S}$  принято брать наружу, поэтому **интеграл**

$$\oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S}$$

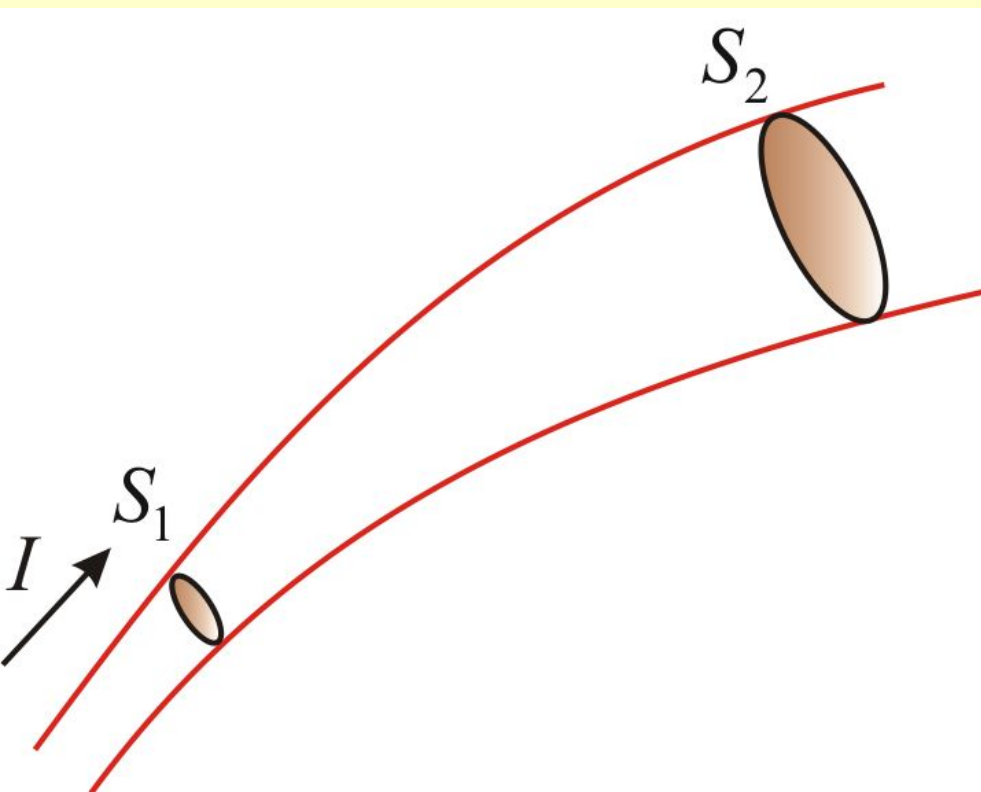
дает **заряд, выходящий в единицу времени наружу из объема  $V$ , охваченного поверхностью  $S$ .**

Мы знаем, что **плотность постоянного электрического тока одинакова по всему поперечному сечению  $S$  однородного проводника.**

Поэтому **для постоянного тока в однородном проводнике с поперечным сечением  $S$  сила тока:**

$$I = \mathbf{j} \cdot \mathbf{S} \quad (10.3.1)$$

Из этого следует, что **плотности постоянного тока в различных поперечных сечениях 1 и 2 цепи обратно пропорциональны площадям  $S_1$  и  $S_2$  этих сечений :**



$$j_2 / j_1 = S_1 / S_2$$

Пусть  $S$  – замкнутая поверхность, а векторы  $d\mathbf{S}$  всюду проведены по внешним нормалям  $\mathbf{n}$ . Тогда поток вектора  $\mathbf{j}$  сквозь эту поверхность  $S$  равен электрическому току  $I$ , идущему вовне из области, ограниченной замкнутой поверхностью  $S$ . Следовательно, согласно закону сохранения электрического заряда, суммарный электрический заряд  $q$ , охватываемый поверхностью  $S$ , изменяется за время  $dt$  на  $dq = -Idt$ , тогда в интегральной форме можно записать:

$$\oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{dq}{dt} \quad . \quad (10.3.3)$$

В интегральной форме можно записать:

$$\oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{dq}{dt}$$

Это соотношение называется **уравнением непрерывности**. Оно является, по существу, выражением **закона сохранения электрического заряда**.

**Дифференциальная форма записи уравнения непрерывности**

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = -\frac{d\rho}{dt}$$

В случае **постоянного тока**, распределение зарядов в пространстве должно оставаться неизменным:

$$\frac{dq}{dt} = 0,$$

следовательно,

$$\oint \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = 0, \quad (10.3.5)$$

это **уравнение непрерывности для постоянного тока** (в интегральной форме).

Линии  $\vec{j}$  в случае постоянного тока  
нигде не начинаются и нигде не  
заканчиваются.

Поле вектора  $\vec{j}$  не имеет источника.

*В дифференциальной форме уравнение  
непрерывности для постоянного  
тока:*

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0$$



**Если ток постоянный, то избыточный заряд внутри однородного проводника всюду равен нулю.**

Докажем это: т.к. для постоянного тока справедливо уравнение

$$\oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

отсюда

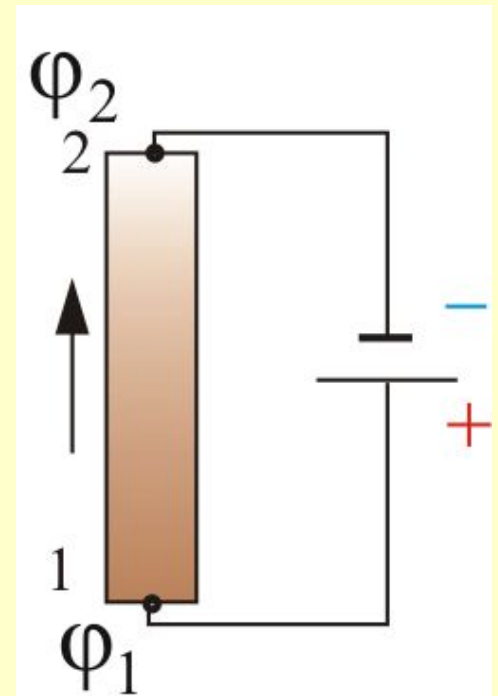
$$\sum q_i = 0.$$

Избыточный заряд может появиться только на поверхности проводника в местах соприкосновения с другими проводниками, а также там, где проводник имеет неоднородности.

## 10.4. Сторонние силы и ЭДС

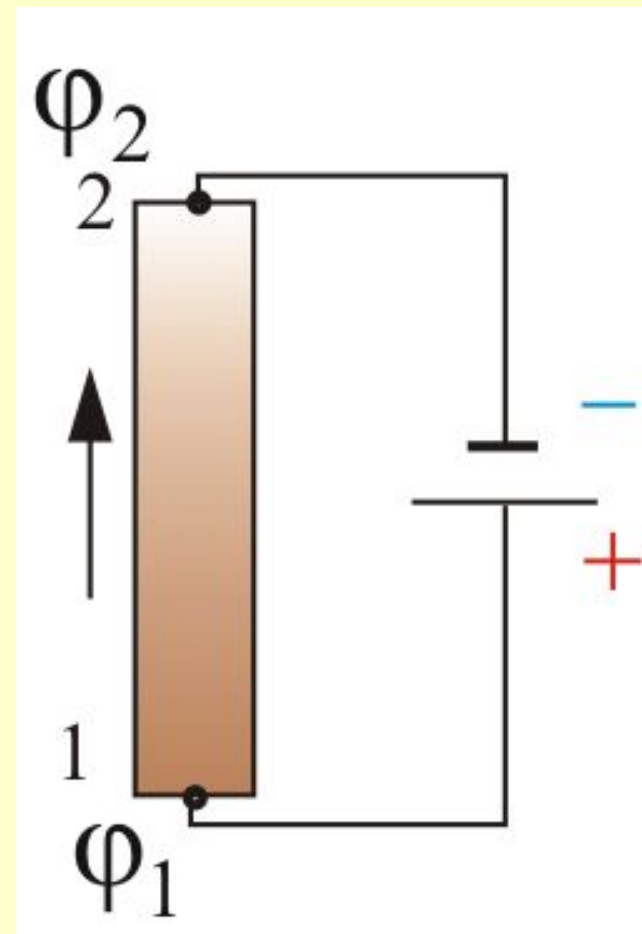
Для того, чтобы поддерживать ток достаточно длительное время, необходимо от конца проводника с меньшим потенциалом непрерывно отводить, а к другому концу – с большим потенциалом – подводить электрические заряды. Т.е. необходим круговорот зарядов.

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:*

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

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

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

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

**Работа сторонних сил на участке 1 – 2:**

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

Тогда **Э.Д.С.**

$$\varepsilon_{12} = \frac{A_{12}}{q} = \int_1^2 \mathbf{E}_{\text{ст}} d\Gamma. \quad (10.4.3)$$

**Для замкнутой цепи:**

$$\varepsilon = \sum_i \varepsilon_i = \oint \mathbf{E}'_{\text{ст}} d\Gamma. \quad (10.4.4)$$



$$\mathcal{E} = \sum_i \mathcal{E}_i = \oint_{\text{ст}} \mathbf{E} \, d\Gamma.$$

**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.