

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 φ** электростатического поля связано **с плотностью** **распределения зарядов ρ** 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 ρ не зависит от времени, в результате чего и E , и φ являются функциями только координат, но не времени. Поэтому поле и называется *электростатическим*.

Наличие свободных зарядов приводит к тому, что ρ 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 ρ , 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 ρ 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:

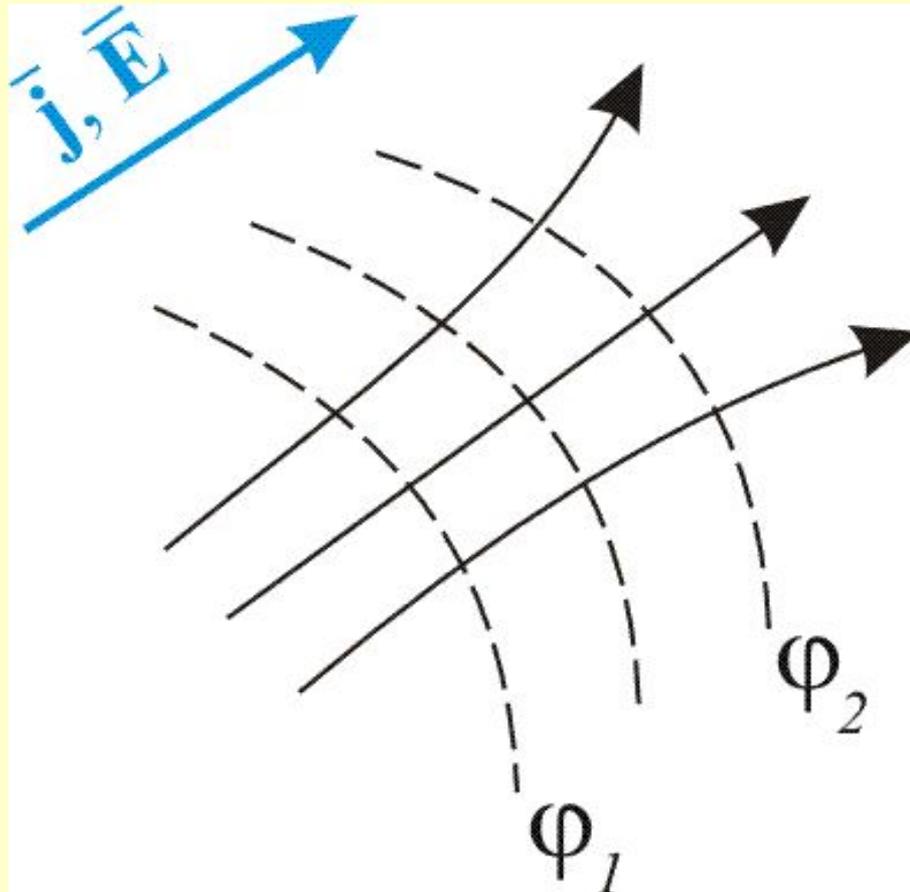
$$\mathbf{j} = q_+ n_+ \mathbf{v}_{dr,+} + q_- n_- \mathbf{v}_{dr,-} \quad (10.2.4)$$

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**

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

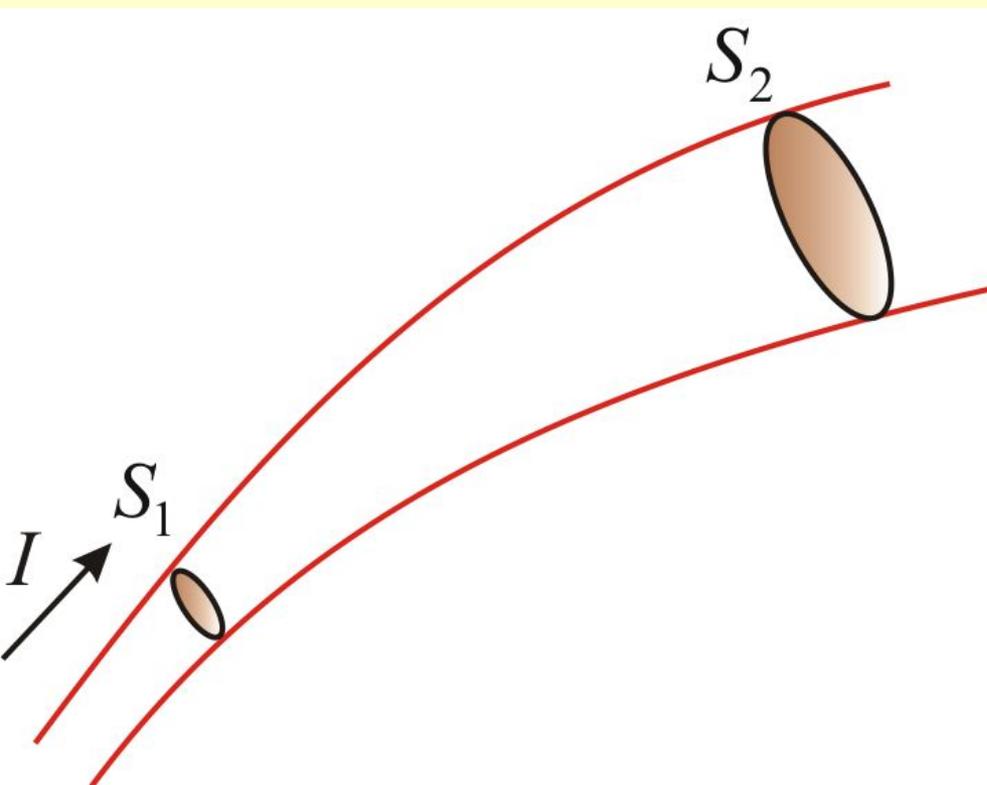
дает **заряд, выходящий в единицу времени наружу из объема V , охваченного поверхностью S .**

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

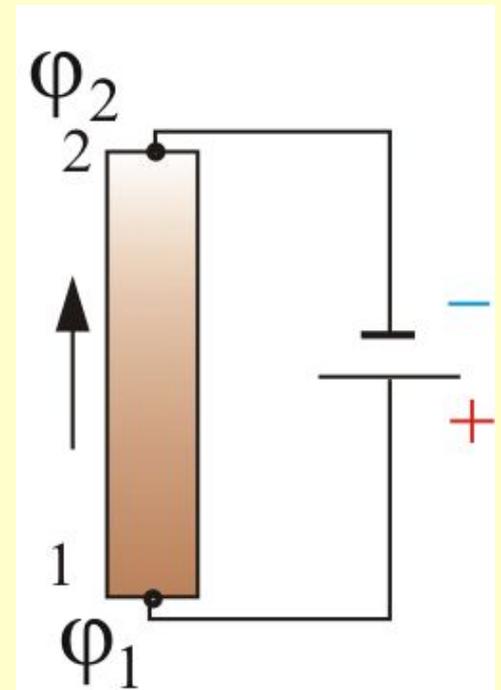
$$\sum q_i = 0.$$

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

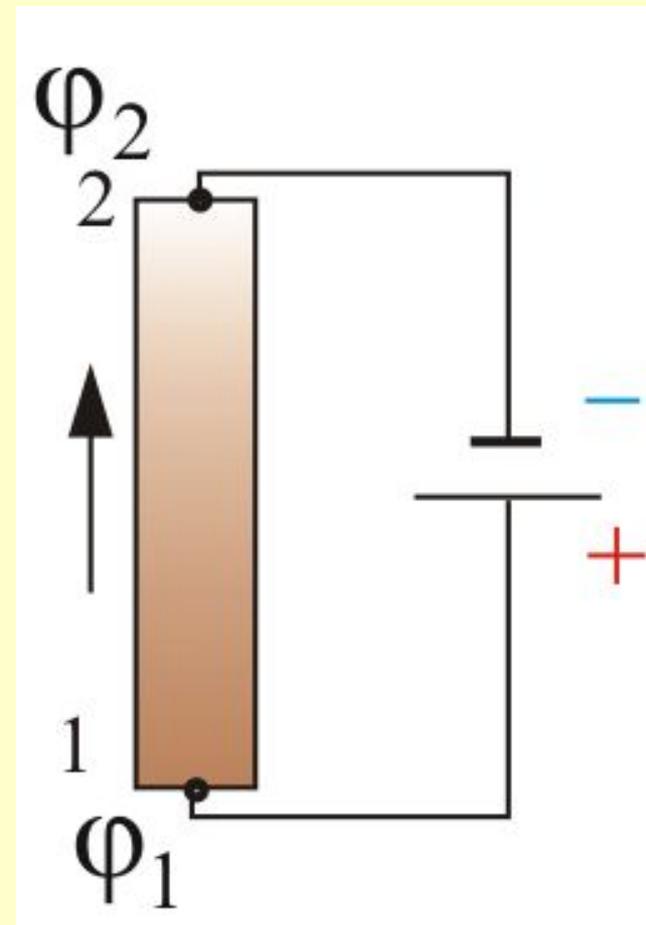
Для того, чтобы поддерживать ток достаточно длительное время, необходимо от конца проводника с меньшим потенциалом непрерывно отводить, а к другому концу – с большим потенциалом – подводить электрические заряды. Т.е. необходим круговорот зарядов.

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.