

Лекция № 6. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК 1

Характеристики тока. Сила и плотность тока. Падение потенциала вдоль проводника с током.

Всякое упорядоченное движение зарядов называется **электрическим током**. Носителями заряда в проводящих средах могут быть электроны, ионы, «дырки» и даже макроскопические заряженные частицы.

За **положительное** направление тока принято считать направление движения **положительных** зарядов. Электрический ток характеризуется **силой тока** – величиной, определяемой количеством заряда, переносимого через воображаемую площадку, за единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Для **постоянного тока** силу тока можно определить как:

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

Размерность силы тока в СИ: $[I] = \frac{Кл}{с} = А$ (ампер).

Кроме этого, для характеристики тока в проводнике применяют понятие **плотности тока** – **векторной величины**, определяемой количеством заряда, переносимого за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную линиям тока (рис.1):

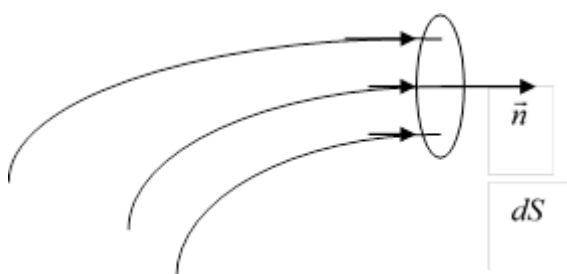


Рис.1

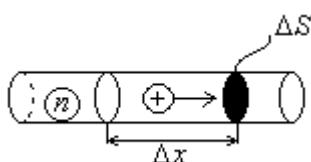
$$\vec{j} = \frac{dI}{dS} \vec{n}$$

Размерность плотности тока в СИ:

$$j = \frac{dI}{dS} = \left[\frac{А}{м^2} \right].$$

Покажем, что плотность тока $\vec{j}$ пропорциональна скорости упорядоченного движения зарядов в проводнике $\vec{v}$. Действительно,

количество заряда, протекающее через поперечное сечение проводника за единицу времени есть (рис.2):



$\Delta q = n \cdot e \cdot \Delta V = n \cdot \Delta S \cdot \Delta x \cdot e$, где n - концентрация зарядов

$$j = \frac{\Delta q}{\Delta S \Delta t} = \frac{e \cdot n \Delta S \Delta x}{\Delta S \Delta t} = n \cdot e \frac{\Delta x}{\Delta t} = nev.$$

Рис.2

Или в векторном виде:

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

Как мы знаем, при равновесии зарядов, то есть при отсутствии тока, потенциал всех точек проводника имеет одно и то же значение, а напряженность электрического поля внутри него равна нулю (рис.3а). При наличии тока электрическое поле внутри проводника отлично от нуля, и вдоль проводника с током имеет место падение потенциала (рис.3б).

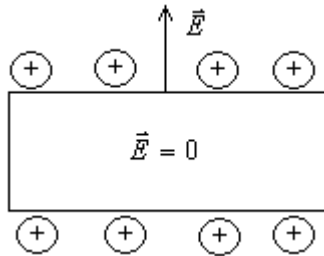


Рис.3а.

Тока нет:

$$\varphi = const$$

Электрическое поле проводника при отсутствии тока.

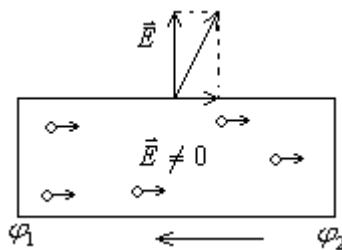


Рис.3б.

Ток есть:

$$E = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\Delta l}$$

$$\varphi_1 > \varphi_2$$

Электрическое поле проводника при наличии тока.

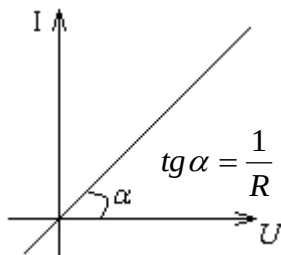
Таким образом, для существования тока в проводнике необходимо выполнение двух условий:

1) наличие носителей заряда и 2) наличие электрического поля в проводнике.

Закон Ома для однородного участка цепи. Сопротивление проводников.

Между падением потенциала - напряжением U и силой тока в проводнике I существует функциональная зависимость $I = f(U)$, называемая **вольтамперной характеристикой** данного проводника (ВАХ). Вид этой зависимости для разных проводников и устройств может быть самым разнообразным.

Как показывает опыт, для многих проводящих материалов выполняется зависимость:



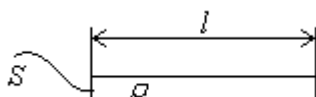
зависимость:

$$U = IR,$$

получившая название **закона Ома** (Ohm G., 1787-1854) для **однородного участка** цепи. (ВАХ приведена на рис.4).

Рис.4. ВАХ проводника, подчиняющегося закону Ома.

Коэффициент пропорциональности R называется **сопротивлением** проводника. Сопротивление **однородного проводника** (рис.5) зависит от материала, из которого он изготовлен, его формы, размеров, а также от температуры.



$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Рис.5. Однородный проводник.

Размерность сопротивления: $[R] = \frac{B}{A} = \text{Ом}$. Кратные единицы измерения:

$1\text{кОм} = 10^3\text{Ом}$; $1\text{Мом} = 10^6\text{Ом}$.

ρ – удельное сопротивление. Размерность ρ в СИ: $[\rho] = \text{Ом}\cdot\text{м}$.

Для многих веществ зависимость сопротивления от температуры в широком интервале температур вблизи $T \approx 300\text{К}$ определяется эмпирической зависимостью от температуры их удельного сопротивления:

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha \cdot t^0\text{C}),$$

где α – температурный коэффициент сопротивления; ρ_0 – значение удельного сопротивления при $t = 0^0\text{C}$.

Для *металлов* $\alpha \approx \frac{1}{273^0\text{C}} > 0$, поэтому сопротивление металлов в указанной области температур пропорционально температуре (рис.6).

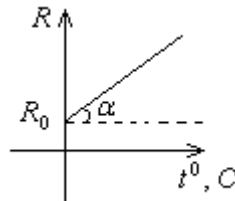


Рис.6. Зависимость сопротивления металлов от температуры.

Для *электролитов* $\alpha < 0$, зависимость их сопротивления от температуры имеет вид, изображенный на рис.7. Для разных электролитов α различно.

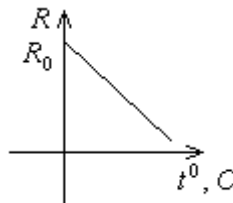
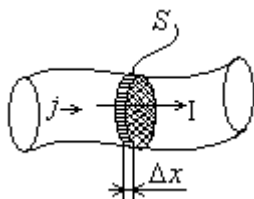


Рис.7. Зависимость сопротивления электролитов от температуры.

Дифференциальная форма закона Ома.

Если проводник неоднороден по своему составу и/или имеет неодинаковое сечение, то для характеристики тока в различных частях проводника используют **закон Ома в дифференциальной форме**. Для его вывода выделим внутри проводника элементарный цилиндрический объем (рис.8) с образующими, параллельными вектору плотности тока $\vec{j}$. Если выделенный объем достаточно мал, его можно считать *однородным* и применить к нему закон Ома:

$$\Delta U = \Delta R \cdot I, \text{ где}$$



$$\Delta R = \rho \frac{\Delta x}{S}$$

$$\Delta U = E \Delta x = \rho \frac{\Delta x}{S} I, \text{ откуда}$$

$$j = \frac{I}{S} = \frac{E}{\rho}, \frac{1}{\rho} = \sigma$$

Рис.8. К выводу закона Ома в дифференциальной форме.

Или в векторном виде:

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho} = \sigma \vec{E}$$

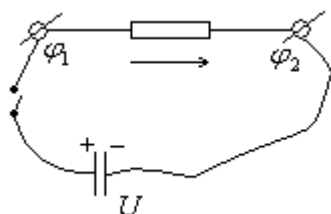
Величина $\sigma = \frac{1}{\rho}$ называется *коэффициентом электропроводности*.

Величина обратная сопротивлению $G = \frac{1}{R}$ называется *проводимостью*

материала и измеряется в $[G] = \frac{1}{\text{Ом}} = \text{См}$ (сименс). Тогда единицей измерения σ в СИ является $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1} = \text{См/м}$.

Сторонние силы. ЭДС источника тока. Закон Ома для неоднородного участка цепи и для замкнутой цепи.

Для протекания электрического тока в проводнике необходимо, чтобы на его концах поддерживалась разность потенциалов. Очевидно, для этой цели не может быть использован заряженный конденсатор. Действительно, если включить в цепь проводника заряженный конденсатор (рис.9) и замкнуть цепь, то под действием сил электростатического поля заряды придут в движение, возникнет кратковременный ток, после чего установится равновесное распределение зарядов, при котором потенциалы концов проводника выравниваются и ток прекращается. Другими словами, электростатическое поле конденсатора не может осуществить постоянную циркуляцию зарядов в цепи (то есть электрический ток), что является следствием потенциальности электростатического поля – равенства нулю работы сил электростатического поля по замкнутому контуру. Таким образом, для поддержания постоянного тока в замкнутой цепи необходимо действие **сторонних сил** *неэлектростатического* происхождения и не являющихся *потенциальными* силами.



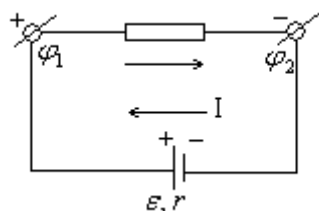
Эти силы могут быть обусловлены *химическими* процессами, *диффузией* носителей заряда через границу двух разнородных

проводников, магнитными полями, другими причинами.

Рис.9. Заряженный конденсатор не может служить источником постоянного тока.

Сторонние силы можно охарактеризовать работой, которую они совершают по перемещению зарядов в замкнутой цепи. Величина, равная работе сторонних сил A_{cm} , отнесенная к единице положительного заряда, называется **электродвижущей силой** (ЭДС). Единицей измерения ЭДС в СИ (как и напряжения) является В (Вольт).

Работа сторонних сил по замкнутому контуру не равна нулю (рис.10):

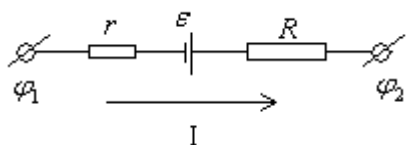


$$\vec{F}_{cm} = q\vec{E}_{cm}$$

$$A_{cm} = \oint_l (\vec{F}_{cm} d\vec{l}) = \oint_l q(\vec{E}_{cm} d\vec{l}) = q\varepsilon \neq 0.$$

Рис.10. Источник электродвижущей силы в замкнутой цепи.

Участок цепи, содержащий источник ЭДС, называется **неоднородным** (рис.11). Всякий источник ЭДС характеризуется величиной ЭДС ε и внутренним сопротивлением r .



$\varphi_1 - \varphi_2 = U$ - напряжение на концах участка цепи.

Рис.11. Неоднородный участок цепи.

Закон Ома для неоднородного участка цепи имеет вид:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon}{R + r},$$

где R - внешнее сопротивление, r - внутреннее сопротивление источника ЭДС.

При соединении концов неоднородного участка цепи идеальным проводником образуется замкнутая цепь, в которой потенциалы φ_1 и φ_2 выравниваются и мы приходим к **закону Ома** для замкнутой (или **полной**) цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

Если сопротивление внешней цепи $R = 0$, то имеем случай **короткого замыкания**. В этом случае в цепи течет **максимальный ток**:

$$I_{\max} = \frac{\varepsilon}{r}$$

При $R = \infty$ имеем **разомкнутую цепь**. В этом случае ток в цепи равен нулю:

$$I = 0$$