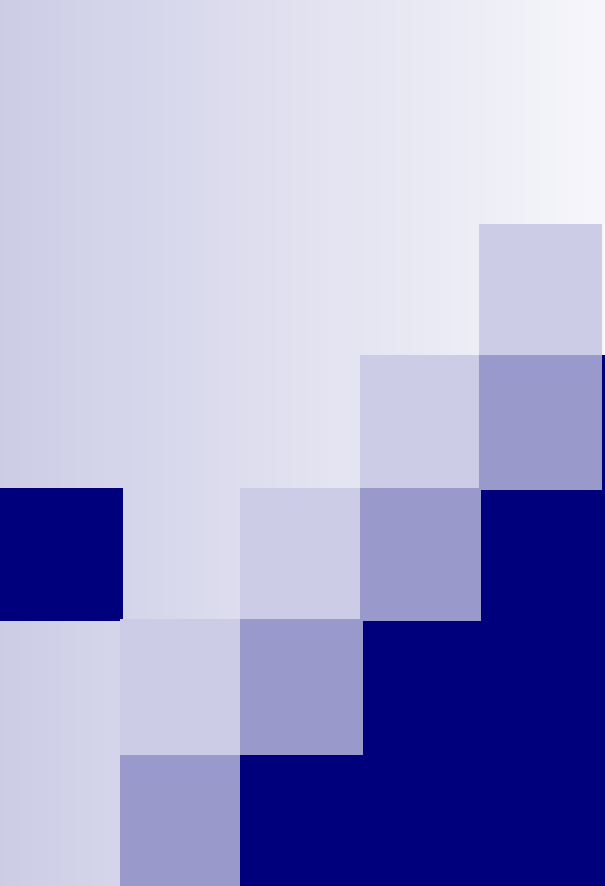


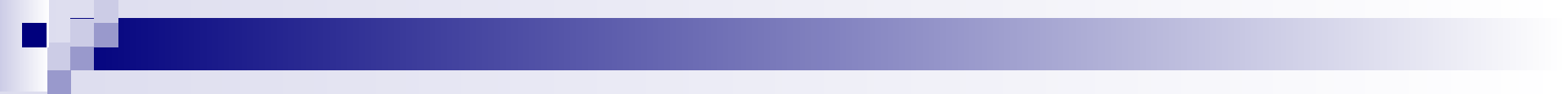


Постоянный электрический ток

Лекция 6

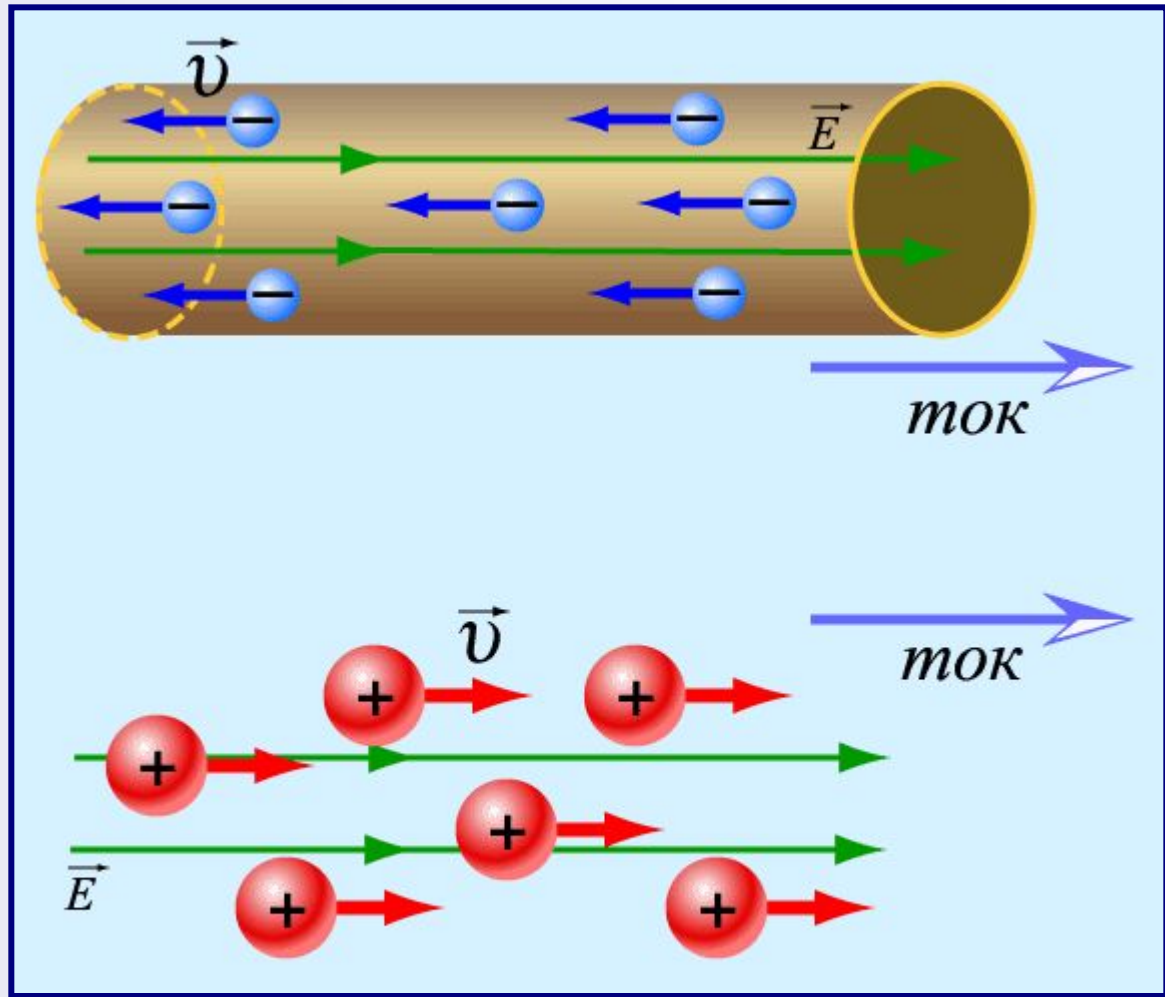
План

- Электрический ток и его характеристики.
- Электродвижущая сила источника тока.
Напряжение.
- Закон Ома для однородного участка цепи.
- Закон Ома в дифференциальной форме.
- Закон Ома для неоднородного участка цепи.



Электрический ток и его характеристики

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов.



Носителями тока могут быть электроны, а также положительные и отрицательные ионы.

За **направление** тока условились принимать направление движения положительных зарядов, образующих этот ток.

Если за время dt через поперечное сечение проводника переносится заряд dq , то сила тока

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1)$$

Ток, не изменяющийся со временем, называется **ПОСТОЯННЫМ**.
Для постоянного тока

$$I = \frac{q}{t} \quad (2)$$

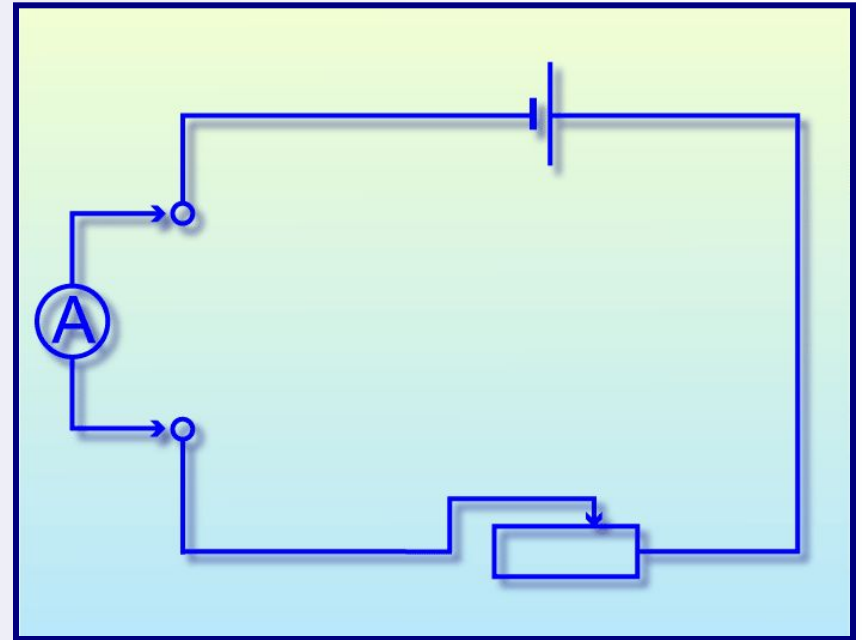
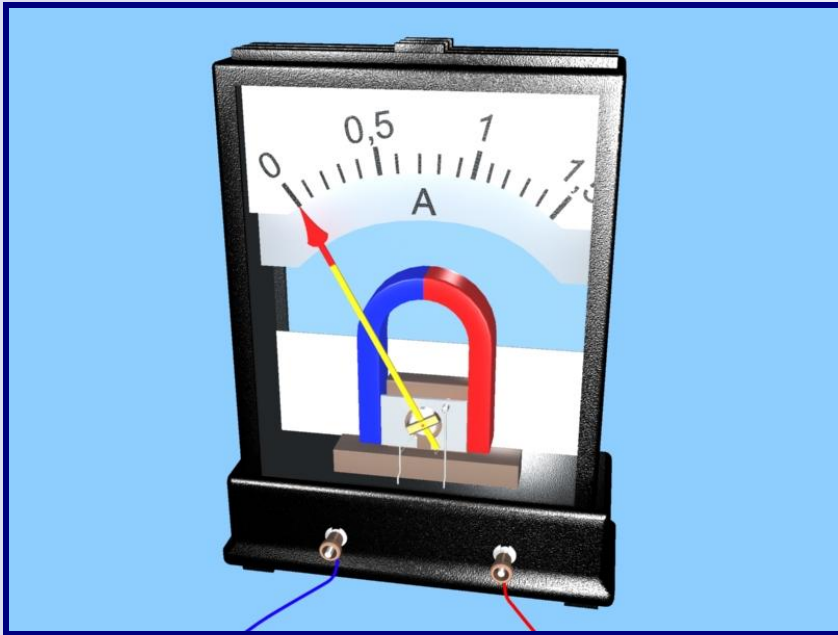


$$I = \frac{q}{t}$$

Единицей силы тока в СИ является **A** – ампер.

$$[i] = \frac{Kл}{с} = A$$

Ампер (Ampere) Андре-Мари (22.I.1775–10.VI.1836)



Приборы для измерения силы тока называются **амперметрами**.

Идеальный амперметр имеет нулевое внутреннее сопротивление.

Если ток в проводнике создается как положительными, так и отрицательными носителями зарядов одновременно, то

$$I = \frac{dq^+}{dt} + \frac{|dq^-|}{dt} \quad (3)$$

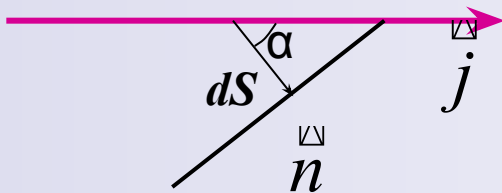
Электрический ток может быть неравномерно распределен по поверхности, через которую он течет.

Более детально электрический ток можно характеризовать с помощью **вектора плотности тока**. Он численно равен отношению силы тока dI через расположенную перпендикулярно направлению тока площадку $dS_{\perp}$ к величине этой площадки, т. е.

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}} \quad (4)$$

$$[j] = \frac{A}{m^2}$$

По направлению вектор плотности тока совпадает с направлением скорости упорядоченного движения положительных зарядов.

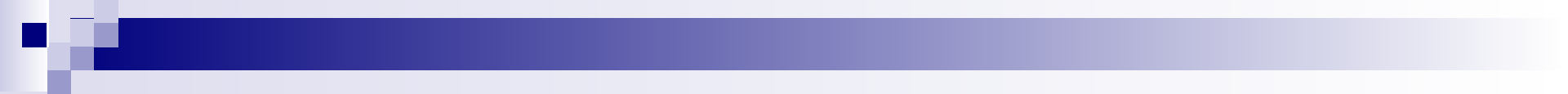


Зная j в каждой точке сечения проводника, можно найти силу тока I через любую поверхность S :

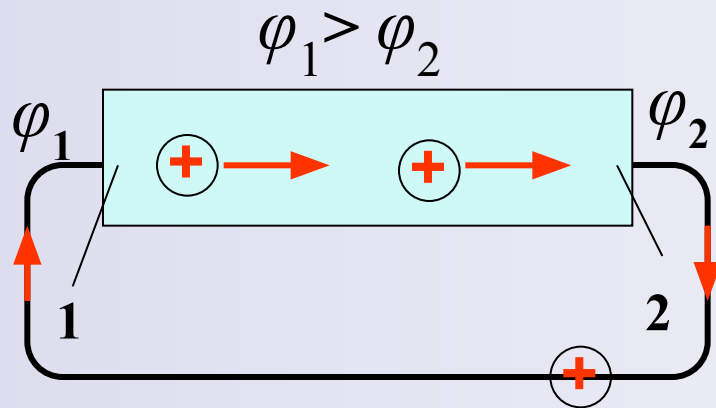
$$I = \int_S \vec{j} dS = \int_S j_n dS \quad (5)$$

где $dS = dS \vec{n}$; $\vec{j} dS = j dS \cos \alpha = j_n dS$,

j_n проекция $\vec{j}$ на $\vec{n}$



Электродвижущая сила источника тока. Напряжение



Если в проводнике создать электрическое поле и затем не поддерживать его неизменным, то за счет перемещения зарядов поле исчезнет и, следовательно, ток прекратится.

Для того чтобы поддерживать ток неизменным необходимо от конца проводника с меньшим потенциалом отводить приносимые туда током заряды и переносить их к началу проводника с большим потенциалом, т.е. необходимо создать круговорот зарядов.

Это возможно лишь за счет **работы сторонних сил** неэлектростатической природы, например, за счет протекания химических процессов в гальванических элементах.

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}$$

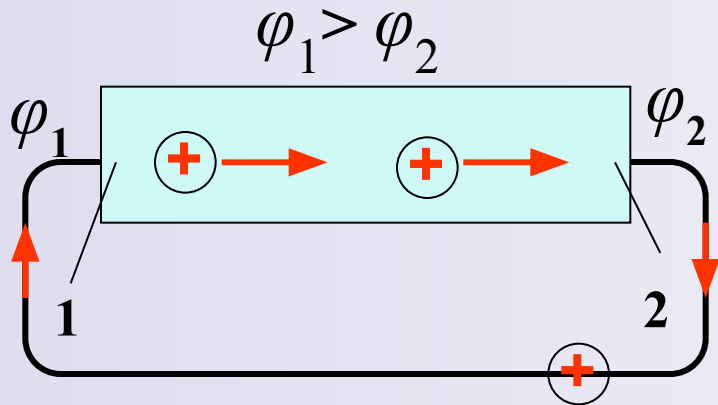
(6)

ЭДС, как и потенциал, в СИ измеряется в вольтах.

$\mathcal{E}$ – электродвижущая сила
 $A_{ст}$ – работа сторонних сил по перемещению зарядов внутри элемента от одного полюса к другому
 q – перемещаемый заряд

Величина, численно равная работе сторонних сил, по перемещению единичного положительного заряда называется **ЭДС**.

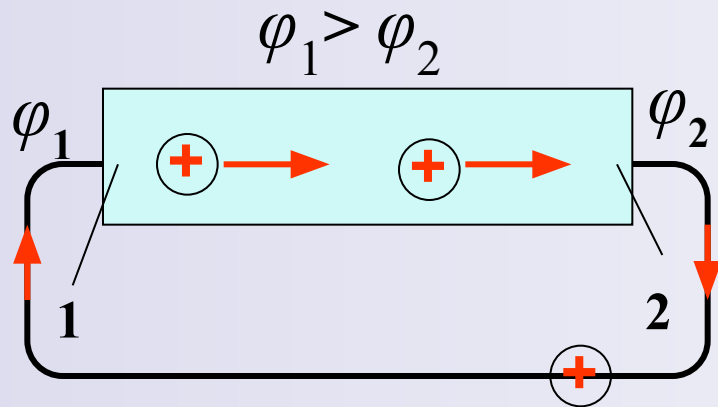
Представим стороннюю силу как



$$\vec{F}_{CT} = q\vec{E}_{CT} \quad (7)$$

Тогда работа сторонних сил на участке 1-2 цепи будет равна

$$A_{12CT} = \int_1^2 \vec{F}_{CT} d\vec{l} = q \int_1^2 \vec{E}_{CT} d\vec{l} \quad (8)$$



ЭДС на этом же участке

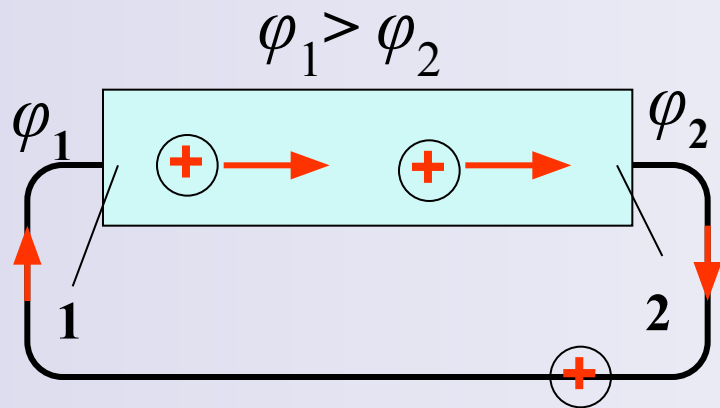
$$\mathcal{E}_{12} = \frac{A_{12CT}}{q} = \int_1^2 \vec{E}_{CT} d\vec{l}$$

где $d\vec{l}$ - элемент длины проводящего участка цепи.

ЭДС, действующая в замкнутой цепи

$$\mathcal{E} = \oint \vec{E}_{CT} d\vec{l} \quad (9)$$

Т.е. **ЭДС равна циркуляции вектора напряженности сторонних сил.**



Однако, кроме сторонних сил, на носители тока действуют силы электростатического поля qE .

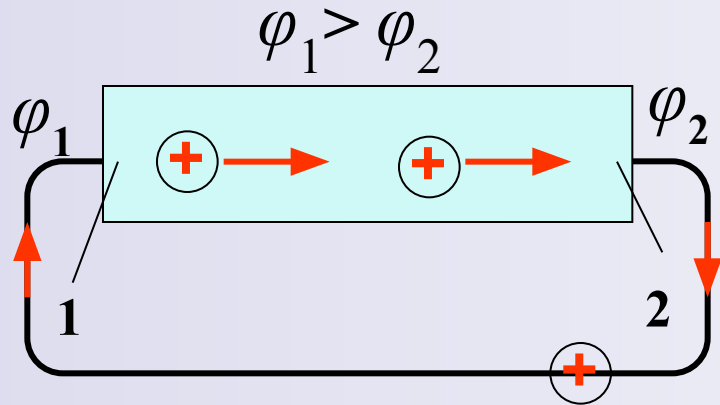
Следовательно, результирующая сила, действующая в каждой точке цепи на заряд

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{E}_{CT}) \quad (10)$$

Работа, совершаемая этой силой над зарядом q на участке 1-2 цепи,

$$A_{12} = \int_1^2 \vec{F} d\vec{l} = q \int_1^2 (\vec{E} + \vec{E}_{CT}) d\vec{l} = q(\varphi_1 - \varphi_2) + q\mathcal{E}_{12}$$

(11)



Величина, численно равная работе, совершаемой электрическими и сторонними силами над единичным положительным зарядом, называется падением напряжения или просто напряжением U на данном участке, т. е.

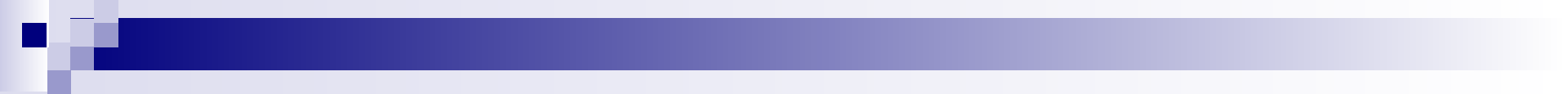
$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}. \quad (12)$$

Участок цепи, на котором не действуют сторонние силы, называется **однородным**. Для него

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (13)$$

Участок цепи, на котором действуют сторонние силы, называется **неоднородным**.

Для замкнутой цепи $(\varphi_1 - \varphi_2) = 0$ и поэтому $U = \mathcal{E}$.



Закон Ома для однородного участка цепи (не содержащего источника тока)

Ом в 1826 г. экспериментально установил закон, который называется законом Ома для однородного участка цепи:

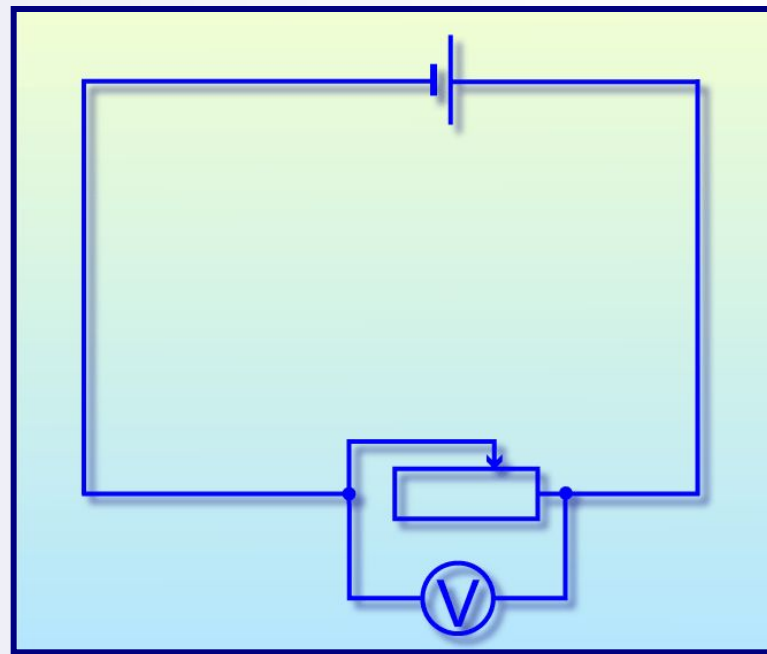
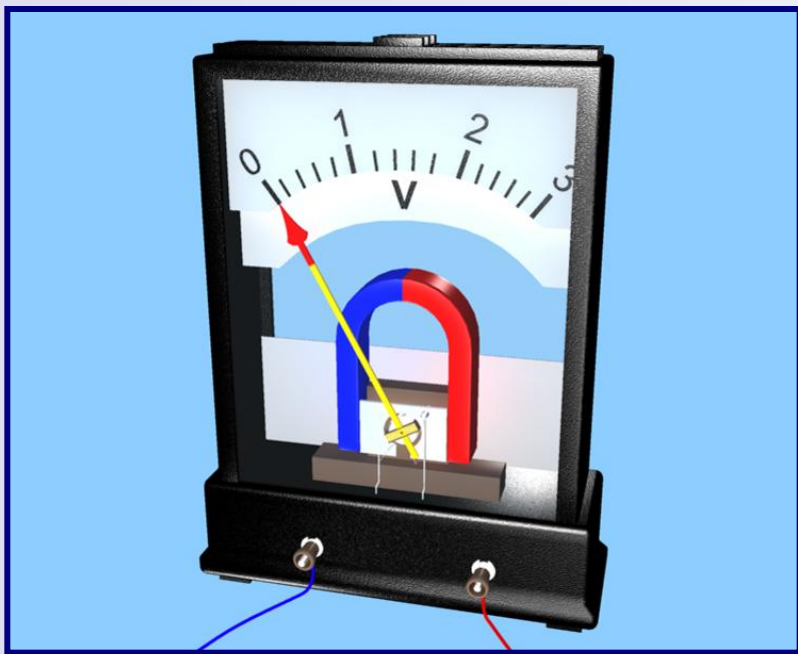
$$I = \frac{U}{R}$$

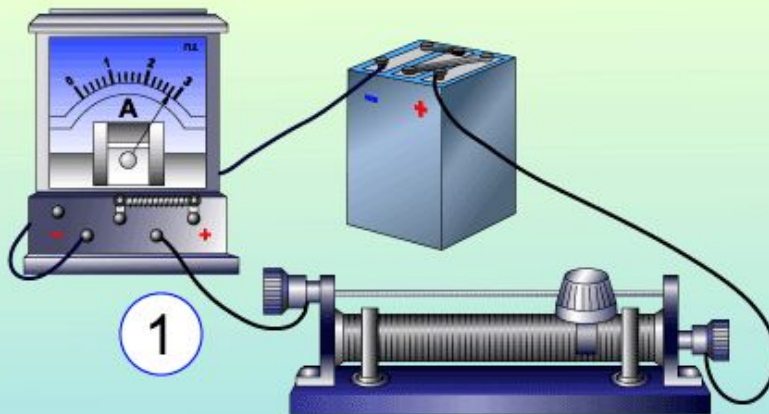
(14)

I – сила тока в проводнике
 U – напряжение на концах проводника
 R – сопротивление проводника

$$[R] = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}} = 1 \text{Ом}$$

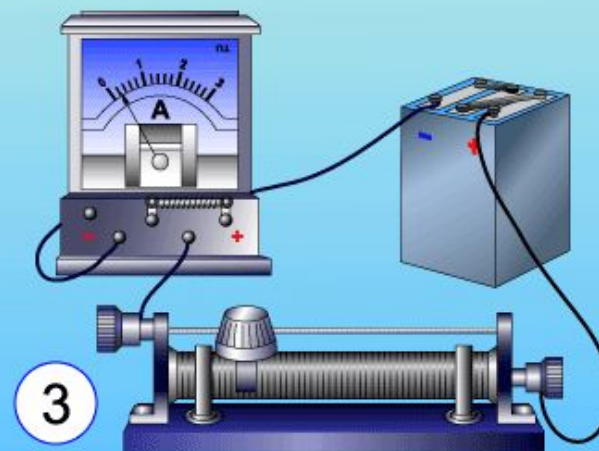
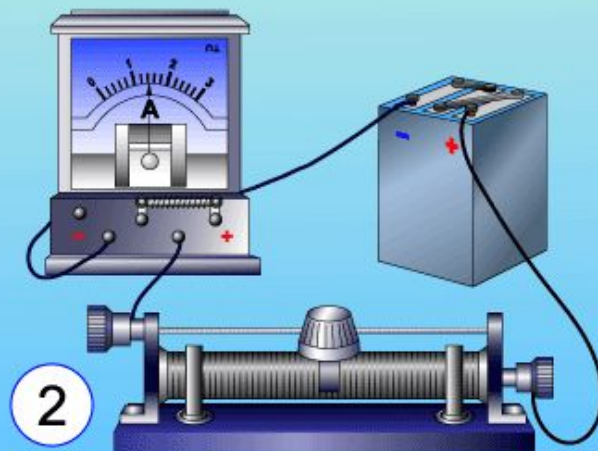
СИЛА ТОКА, ТЕКУЩЕГО ПО ОДНОРОДНОМУ МЕТАЛЛИЧЕСКОМУ ПРОВОДНИКУ, ПРЯМО ПРОПОРЦИОНАЛЬНА ПАДЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПРОВОДНИКЕ И ОБРАТНО ПРОПОРЦИОНАЛЬНА СОПРОТИВЛЕНИЮ ПРОВОДНИКА.





$$I_1 > I_2 > I_3$$

$$R_1 < R_2 < R_3$$



С помощью опыта видим, что $I \sim \frac{1}{R}$

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (15)$$

R – сопротивление проводника

ρ – удельное сопротивление проводника

l – длина проводника

S – площадь поперечного сечения проводника

$$[\rho] = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

С ростом температуры сопротивление металлических проводников увеличивается.

$$R = R_0 \alpha T$$

$$R = R_0 (1 + \alpha t) \quad (16)$$

$$\rho = \rho_0 \alpha T$$

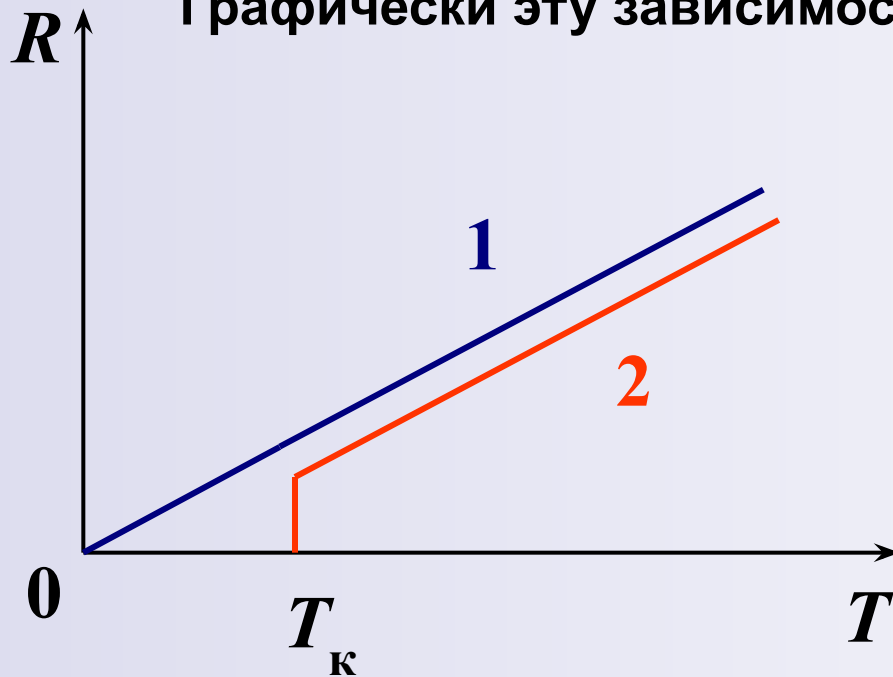
$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t) \quad (17)$$

ρ_0 — удельное сопротивление при температуре $t = 0^\circ\text{C}$;

α — температурный коэффициент сопротивления, для большинства металлов близкий к $1/273 \text{ K}^{-1}$ при не очень низких температурах;

T — термодинамическая температура.

Графически эту зависимость можно представить в виде:

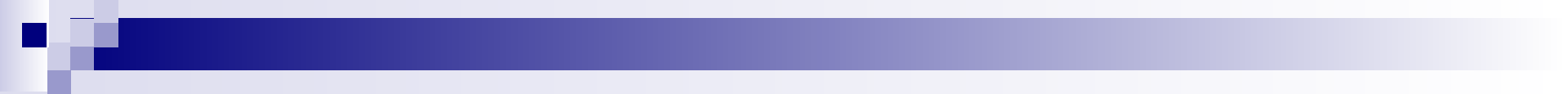


1 — качественная прямая.

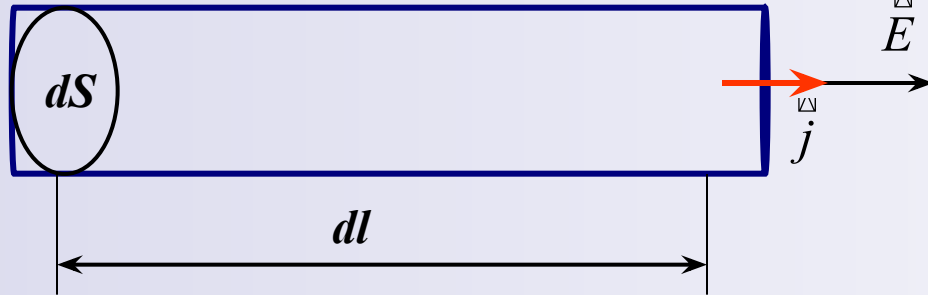
В 1911 г. впервые было обнаружено явление **сверхпроводимости**.

У многих металлов и сплавов (Al, Pb, Zn, ...) при охлаждении ниже критической температуры T_K (характерной для данного проводника) электрическое сопротивление скачком падает до нуля, т.е. металл становится **абсолютным проводником**.

T_K для металлов составляет 1–20 К.



Закон Ома для однородного участка цепи в дифференциальной форме



Найдем связь между векторами $\vec{E}$ и $\vec{j}$.

Для этого мысленно выделим в окрестности некоторой точки проводника элементарный цилиндрический объем с образующими, параллельными векторам $\vec{j}$ и $\vec{E}$.

Между концами проводника длиной dl напряжение $U = Edl$, под действием которого через его поперечное сечение площадью dS течет ток $I = jdS$.

Сопротивление цилиндрического проводника, в нашем случае, равно

$$R = \rho \frac{dl}{dS}$$

Используя закон Ома для участка цепи:

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

находим:

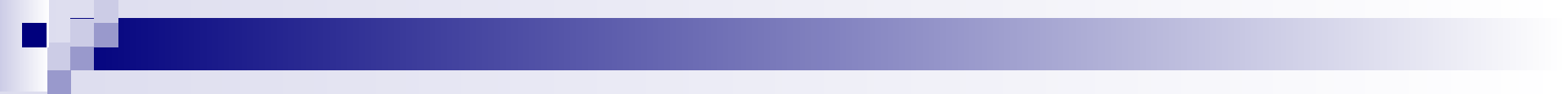
$$jdS = \frac{Edl}{\rho \frac{dl}{dS}}$$

$$jdS = \frac{Edl}{\rho \frac{dl}{dS}} \Rightarrow \vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = \gamma \vec{E} \quad (18)$$

Закон Ома для
однородного участка
цепи в
дифференциальной
форме

$\gamma = \frac{1}{\rho}$ — удельная электрическая проводимость.

$1 / (\text{Ом} \cdot \text{м}) = 1 \text{ См} / \text{м}$, где $1 \text{ См} = 1 / \text{Ом}$ - это единица измерения электропроводности в СИ, называемая **сименс** (См).



Закон Ома для неоднородного участка цепи

На неоднородном участке цепи плотность тока пропорциональна сумме напряженностей электростатического поля и поля сторонних сил, т.е.

$$\vec{j} = \gamma(\vec{E} + \vec{E}_{CT}) \quad (19)$$

Рассмотрим цилиндрический проводник длиной l с площадью поперечного сечения S . Умножим обе части равенства (19) на перемещение $d\vec{l}$ вдоль оси проводника и проинтегрируем получившееся соотношение по длине проводника от 0 до l :

$$\int_0^l \vec{j} d\vec{l} = \gamma \left(\int_0^l \vec{E} d\vec{l} + \int_0^l \vec{E}_{CT} d\vec{l} \right), \quad \text{откуда}$$

$$j \cdot l = \gamma(\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}) \quad (20)$$

Учитывая, что

$$j = \frac{I}{S}$$

и

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

из (20) получим

$$I \frac{\rho l}{S} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}$$

Откуда

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}}{R_{12}} \quad (21)$$

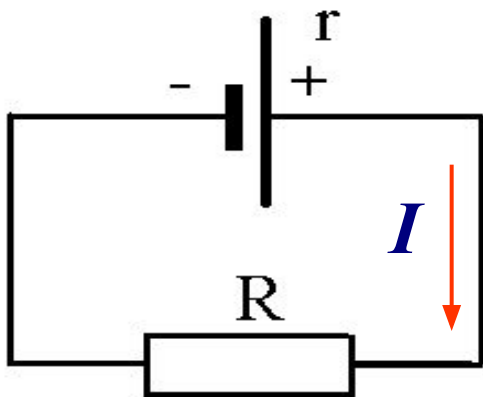
**Закон Ома для
неоднородного участка
цепи**

где R_{12} - сопротивление участка цепи 1-2.

Для замкнутой цепи $(\varphi_1 - \varphi_2) = 0$
и поэтому формула (21)
запишется в виде:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\Sigma}} \quad (22)$$

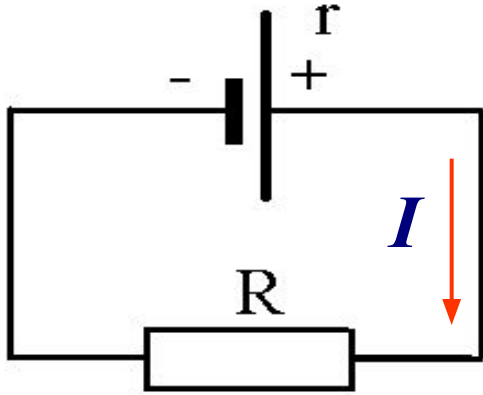
R_{Σ} — суммарное сопротивление всей цепи; $\mathcal{E}$ — ЭДС источника.



Пусть замкнутая цепь состоит из источника электрической энергии с ЭДС и внутренним сопротивлением r , а также внешней цепи потребителя, имеющей сопротивление R .

Согласно (22)

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} \quad (23)$$



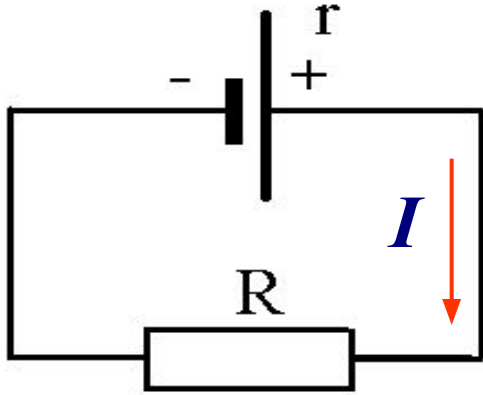
Разность потенциалов на электродах источника равна напряжению на внешнем участке цепи:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = IR = \mathcal{E} - Ir \quad (24)$$

Если цепь разомкнуть, то ток в ней прекратится и напряжение на зажимах источника станет равным его ЭДС, т.е. $U = \mathcal{E}$.

Таким образом, напряжение на внешнем участке цепи будет равно

$$U = IR = \mathcal{E} R / (R + r) \quad (25)$$



Рассмотрим предельные случаи:

1. $R \rightarrow \infty$ ($R \gg r$). Это бывает при разомкнутой цепи.

Тогда *напряжение на полюсах разомкнутого источника тока равно его ЭДС.*

2. $R \rightarrow 0$ (источник тока замкнут накоротко), в этом случае, в соответствии с (23), сила тока максимальна:

$$I_{\max} = I_{\text{кз}} = \frac{\varepsilon}{r} \quad (26)$$

А напряжение во внешней цепи равно нулю.



**Лекцию подготовила к.п.н.
доцент Симдянкина Е.Е.**