

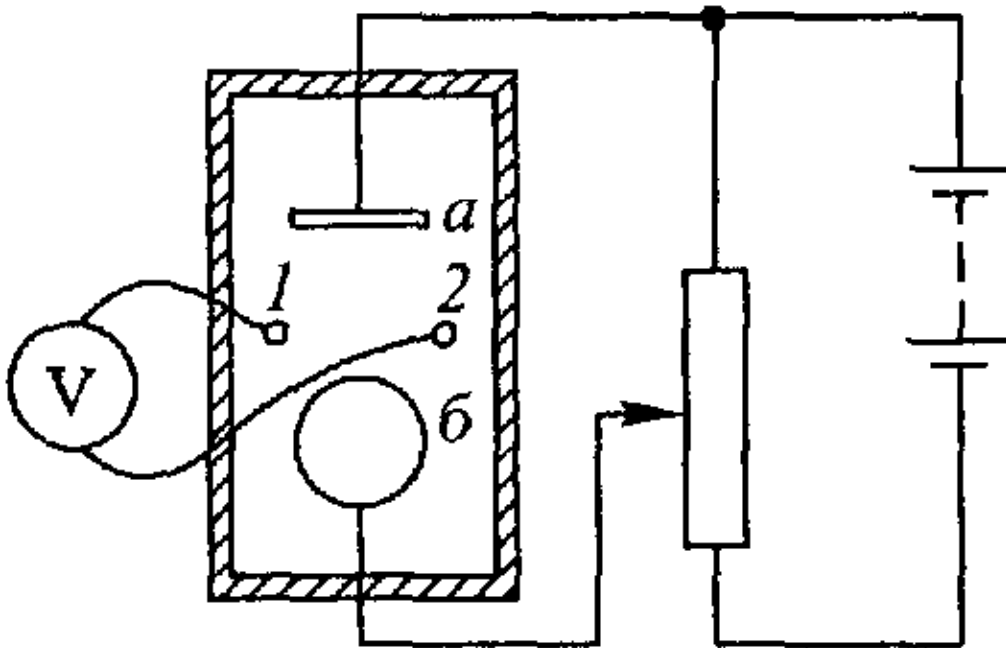
Лекция 9.

- Токи в сплошных средах. Заземление.
- Работа и мощность постоянного тока. Закон Джоуля – Ленца и его дифференциальная форма. Сторонние силы. ЭДС. Закон Ома для замкнутой цепи.
- Разветвленные цепи. Правила Кирхгофа. Примеры их применения.

Электролитическая ванна.

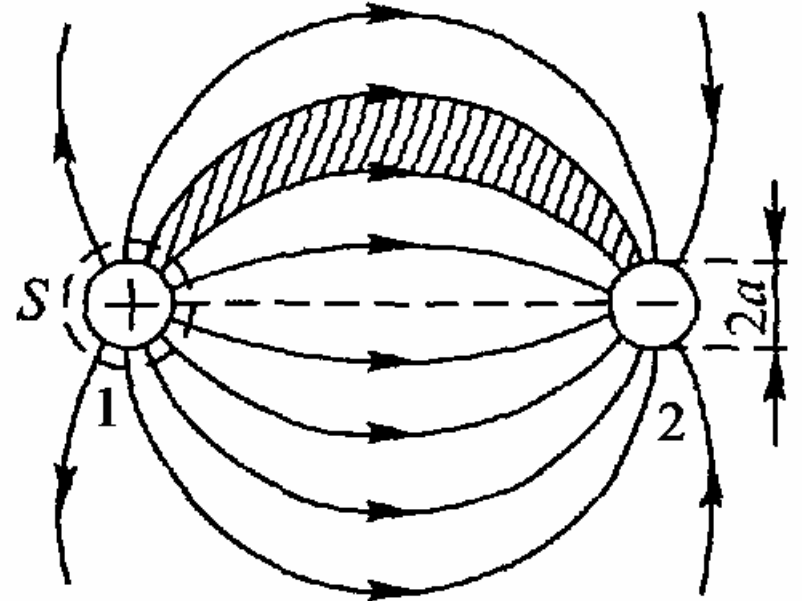
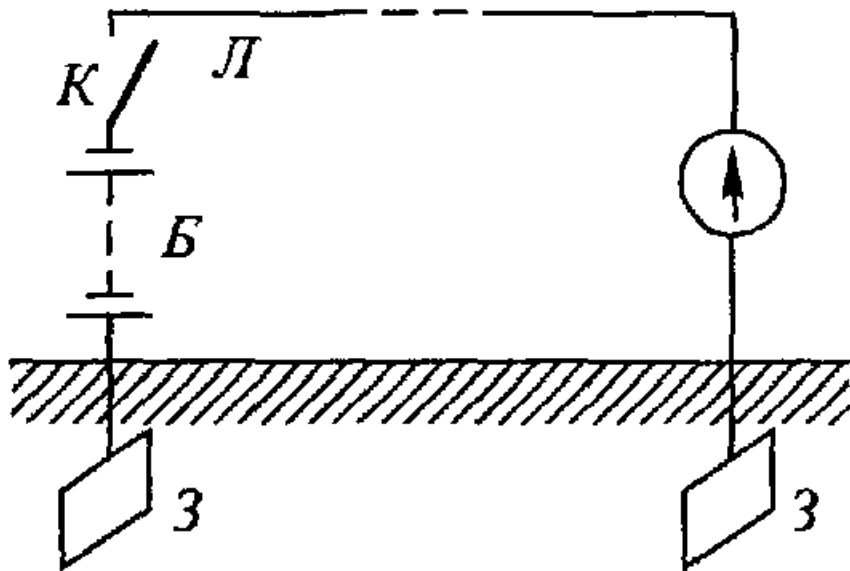
В слабопроводящей среде справедливо соотношение

$$CR = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\lambda}. \text{ Так как } CR = \frac{q}{U} \frac{U}{I}, \text{ то } q = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\lambda} I.$$



Заземление в линиях связи.

Электросопротивление сплошной среды.

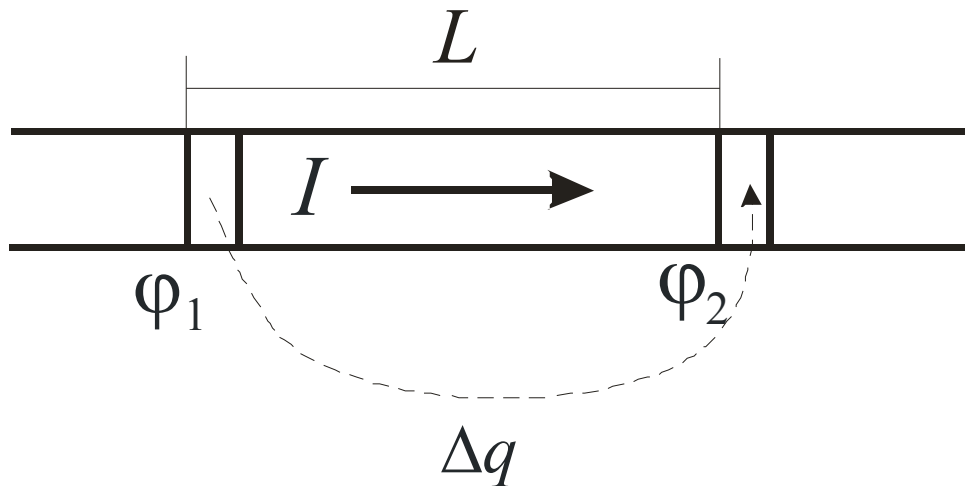


$$U_{12} = \varphi_{1\infty} - \varphi_{2\infty} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left(\frac{q}{a} - \left(-\frac{q}{a} \right) \right) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{a},$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{a^2} = \frac{U_{12}}{2a}; \quad I = \underbrace{J}_{\lambda E} \underbrace{4\pi a^2}_S = \lambda \frac{U_{12}}{2a} 4\pi a^2 = \underbrace{2\pi a \lambda}_{\Lambda=1/R} U_{12};$$

Работа и мощность постоянного тока. Закон Джоуля-Ленца и его дифференциальная форма.

Электрический ток в участке цепи совершает работу.



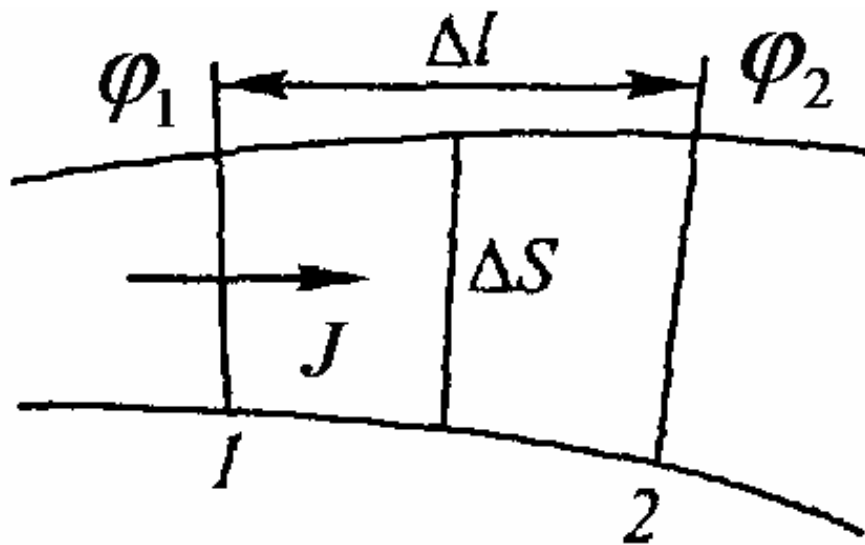
$$\Delta q = I \Delta t, \quad \Delta A = \Delta W = \\ = \Delta q(\varphi_1 - \varphi_2) = \Delta q U;$$

$$\Delta W = I \cdot \Delta t \cdot U = \Delta Q;$$

$$Q = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t;$$

Мощность тока

$$P = \frac{A}{t} = \frac{Q}{t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

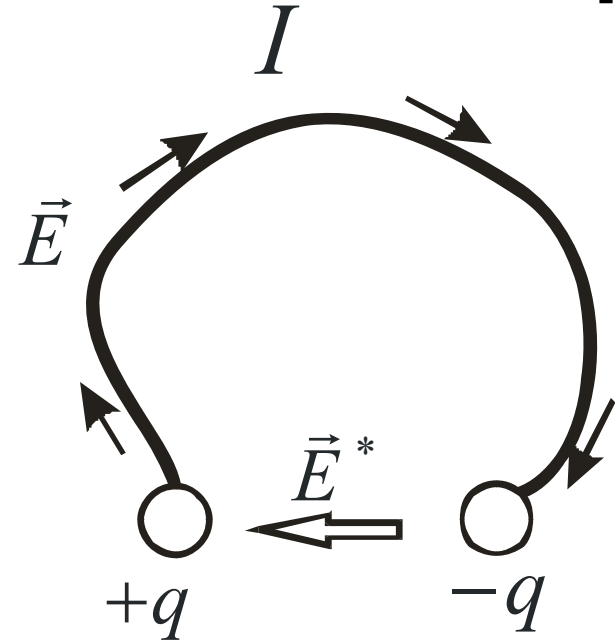


$$\begin{aligned}
 \frac{dQ}{dt} &= I^2 R = \\
 &= (J \Delta S)^2 \rho \frac{\Delta l}{\Delta S} = \\
 &= J^2 \rho \cdot \underbrace{\Delta S \Delta l}_{\Delta V}.
 \end{aligned}$$

Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме

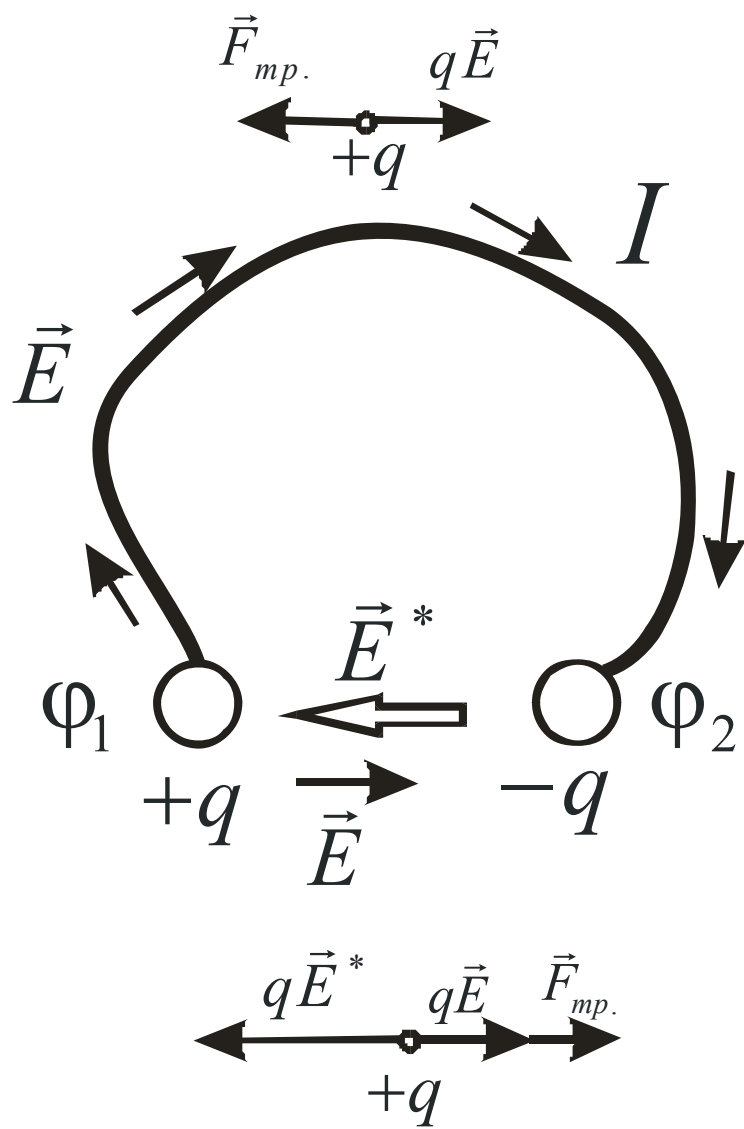
$$\frac{1}{\Delta V} \frac{dQ}{dt} = J^2 \rho = J \frac{E}{\rho} \rho = JE = \vec{J} \vec{E}.$$

Сторонние силы. ЭДС.



Для поддержания электрического тока в замкнутой цепи необходимо устройство (источник тока), совершающее посредством сторонних сил перемещение зарядов против действия электрических сил.

$\vec{E}^*$ — сторонняя сила, действующая на
единичный положительный заряд
(напряженность сторонних сил),
 $\vec{E}$ - напряженность электрических сил



$$\int_1^2 q \vec{E} d\vec{l} = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU,$$

$$\int_1^2 q \vec{E} d\vec{l} = - \int_1^2 \vec{F}_{mp.} d\vec{l} = Q_{\text{джоулево тепло}}$$

$$Q_{\text{джоулево тепло}} = I^2 R t = q I R,$$

где R – сопротивление внешней цепи.

$$\underbrace{q \int_2^1 \vec{E}^* d\vec{l}}_{\mathcal{E}} = - \underbrace{q \int_2^1 \vec{E} d\vec{l}}_{-U} - \underbrace{\int_2^1 \vec{F}_{mp.} d\vec{l}}_{-Q'_{\text{джоулево тепло}}},$$

$$Q'_{\text{джоулево тепло}} = q I r, \text{ где } r - \text{внутреннее сопротивление цепи}$$

Замечание. $I r = I \rho \int_2^1 \frac{dl}{S} = \int_2^1 \rho \frac{I}{S} dl = \int_2^1 \rho \vec{J} d\vec{l} . \Rightarrow \rho \vec{J} = \vec{E} + \vec{E}^*$

В результате имеем

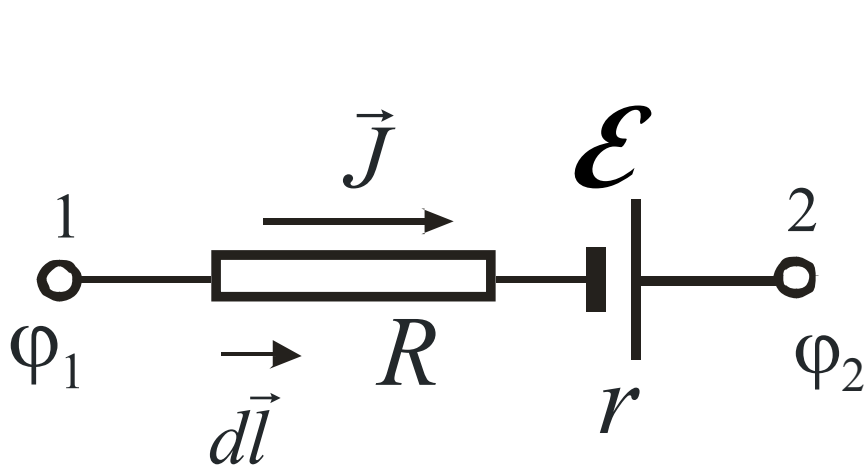
$$\mathcal{E} = U + Ir = IR + Ir$$

- закон Ома для замкнутой цепи.

Здесь $\mathcal{E} = \int_2^1 \vec{E}^* d\vec{l}$ - электродвижущая сила (ЭДС),

равная работе сторонних сил по перемещению
единичного положительного заряда.

Закон Ома для участка цепи с ЭДС



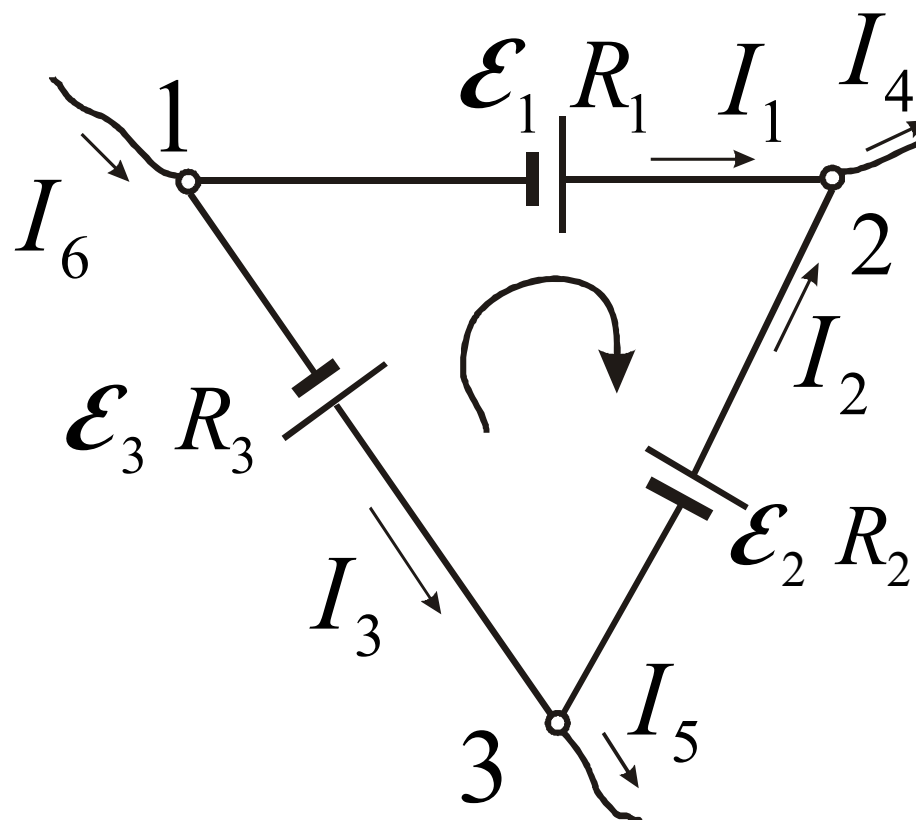
$$\vec{J} = \frac{1}{\rho} (\vec{E} + \vec{E}^*)$$

$$\int_1^2 \rho \vec{J} d\vec{l} = \underbrace{\int_1^2 \vec{E} d\vec{l}}_{\varphi_1 - \varphi_2} + \underbrace{\int_1^2 \vec{E}^* d\vec{l}}_{\mathcal{E}}$$

$$\int_1^2 \rho \vec{J} d\vec{l} = \int_1^2 \rho \frac{I}{S} dl = I \int_1^2 \frac{\rho}{S} dl = I(R + r);$$

$$I(R + r) = \underbrace{\varphi_1 - \varphi_2}_U + \mathcal{E}.$$

Правила Кирхгофа.



1) Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю.

$$I_1 + I_2 - I_4 = 0, \Rightarrow \sum_k I_k = 0.$$

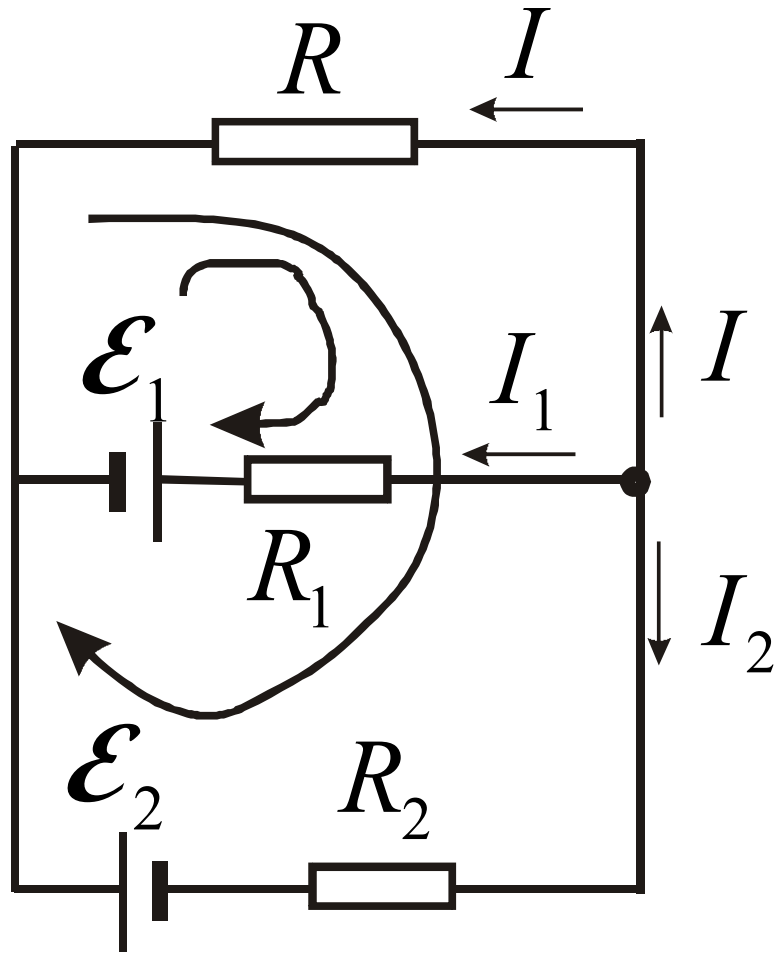
2) Алгебраическая сумма произведений сил токов в отдельных участках произвольного замкнутого контура на их сопротивления равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре.

$$+ \begin{cases} I_1 R_1 = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_1, \\ -I_2 R_2 = \varphi_2 - \varphi_3 - \mathcal{E}_2, \\ -I_3 R_3 = \varphi_3 - \varphi_1 - \mathcal{E}_3, \end{cases} \Rightarrow$$

$$\sum_n I_n R_n = \sum_k \mathcal{E}_k$$

Пример применения правил Кирхгофа

Найти силу тока проходящего через сопротивление R (см. рис.)

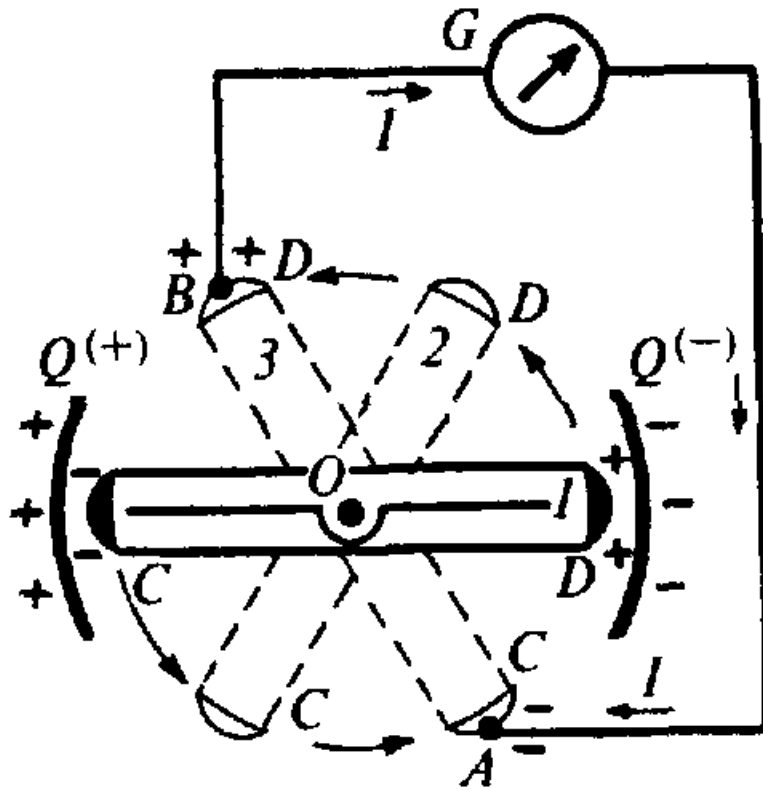


$$\left\{ \begin{array}{l} I + I_1 + I_2 = 0, \\ -IR + I_1 R_1 = -\mathcal{E}_1, \times R_2 \\ -IR + I_2 R_2 = \mathcal{E}_2, \times R_1 \end{array} \right\} + \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} -IR(R_1 + R_2) + R_1 R_2 (-I) &= \\ &= -\mathcal{E}_1 R_2 + \mathcal{E}_2 R_1, \end{aligned}$$

$$I = \frac{\mathcal{E}_1 R_2 - \mathcal{E}_2 R_1}{R(R_1 + R_2) + R_1 R_2};$$

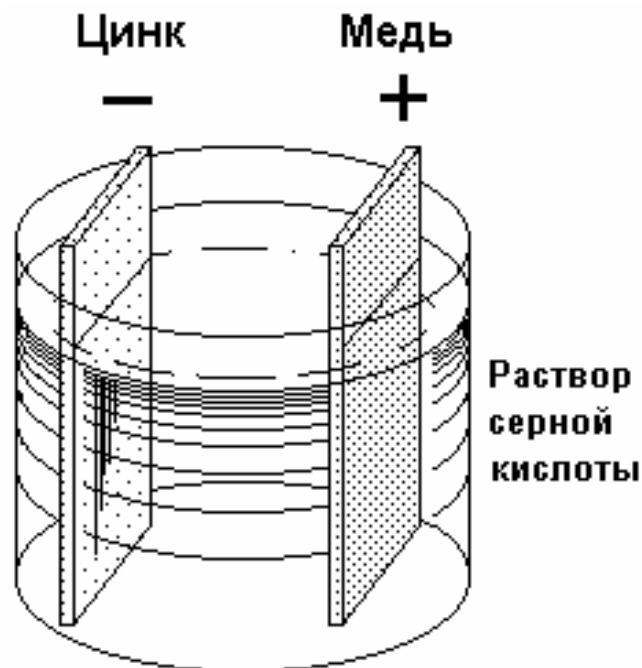
Примеры источников тока (ЭДС)



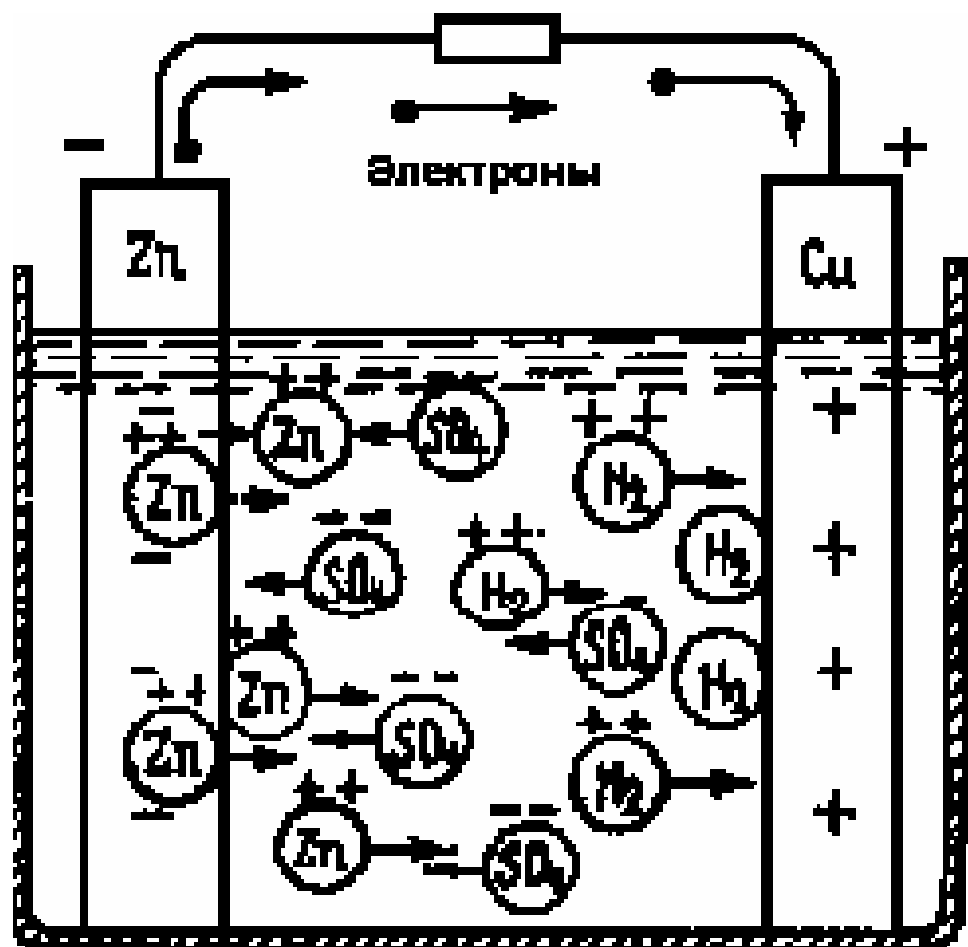
111

Схема электростатической машины

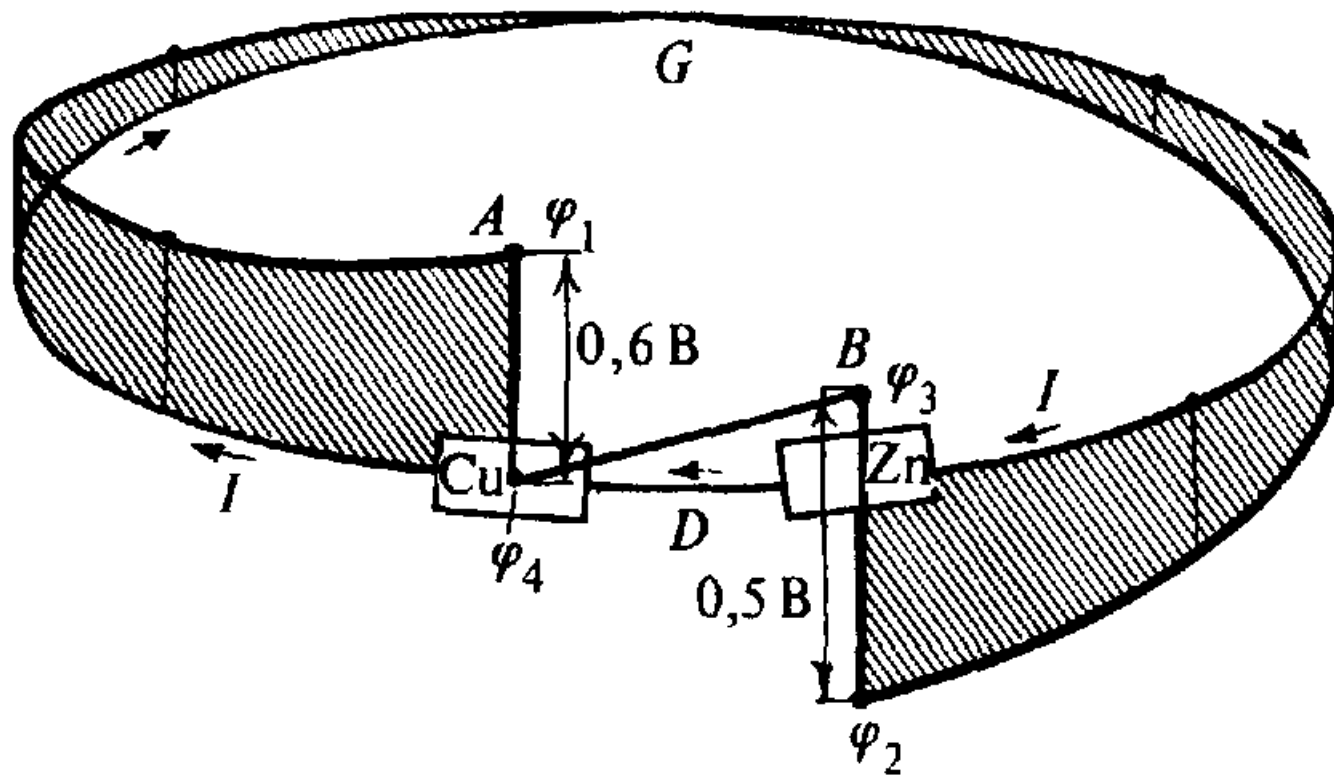
Гальванический элемент Вольта



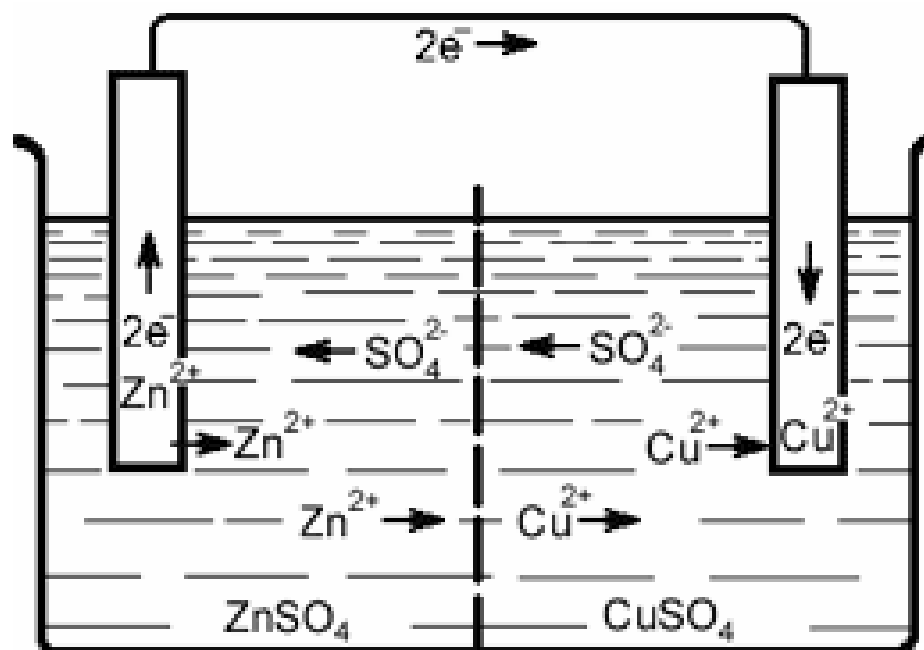
Л. Гальвани (1791) открыл электрический ток в мышцах лягушки. А. Вольт (1792) правильно объяснил происхождение этого тока и создал химический элемент тока.



Изменение потенциала в цепи с гальваническим элементом.



Элемент Даниэля-Якоби



Свинцово-кислотный аккумулятор

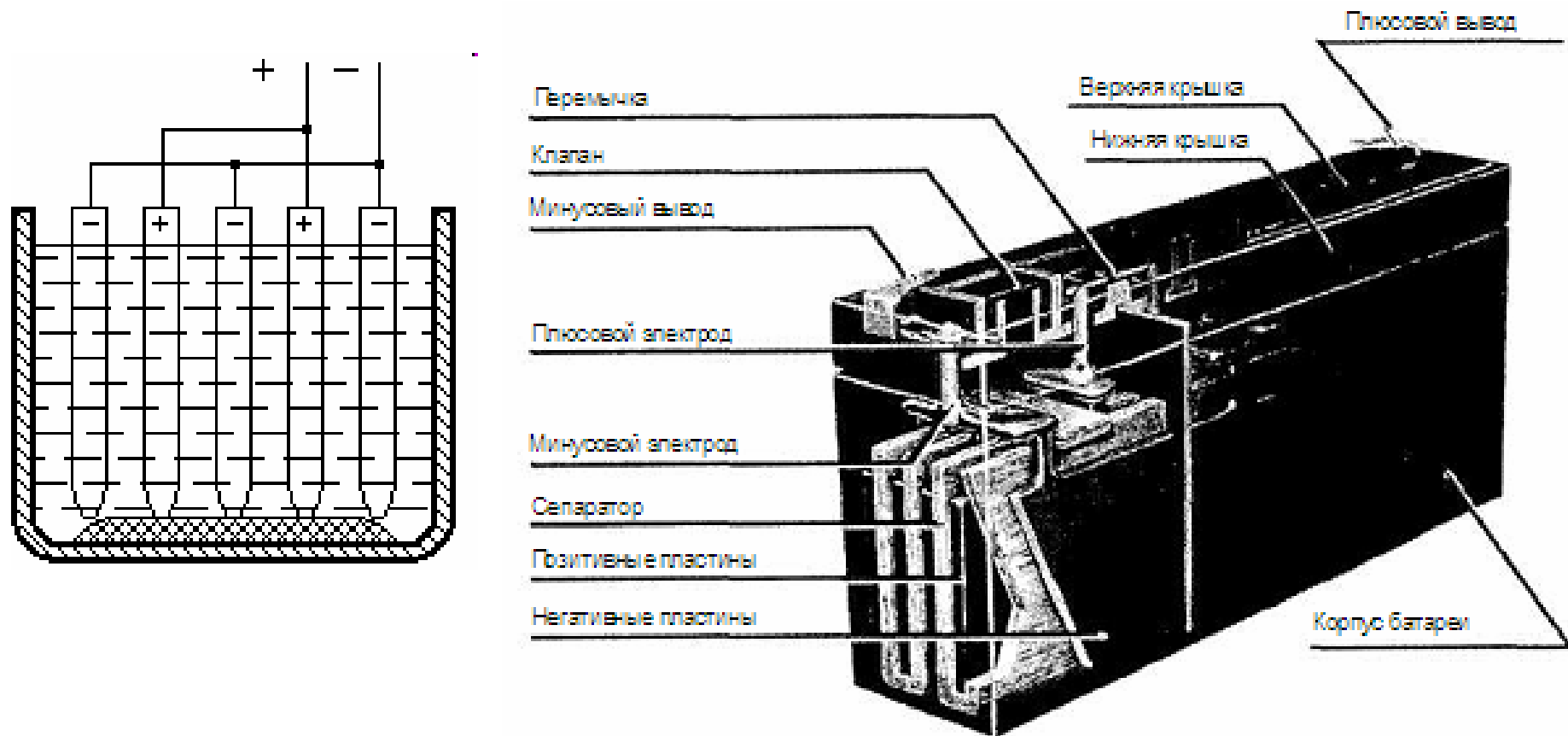
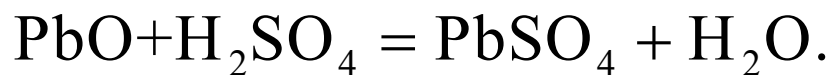


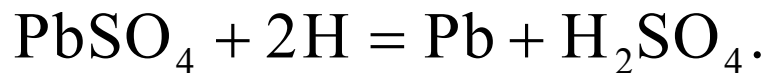
Рис. 3.2. Устройство VRLA батареи Panasonic

Решетчатые свинцовые пластины, заполненные пастой PbO , помещаются в 30% раствор H_2SO_4

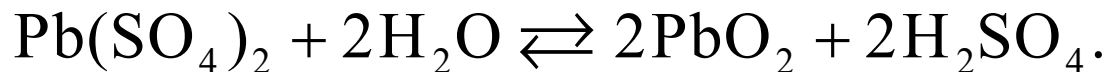
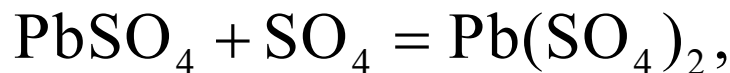
Происходит реакция



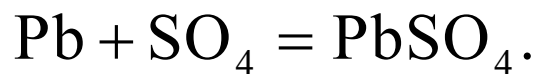
При зарядке ионы H^+ , двигаясь к катоду, приводят к реакции



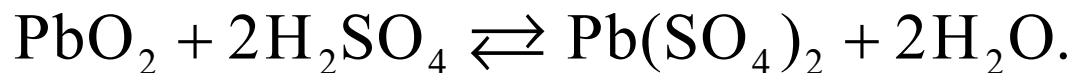
Ионы SO_4^{2-} , достигая анода, вступают в реакцию



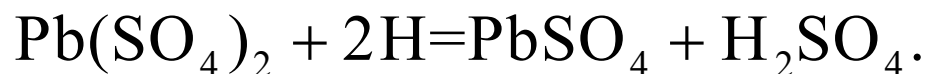
При разрядке на свинцовом катоде ионы SO_4^{2-} из раствора



На аноде идет обратимая реакция

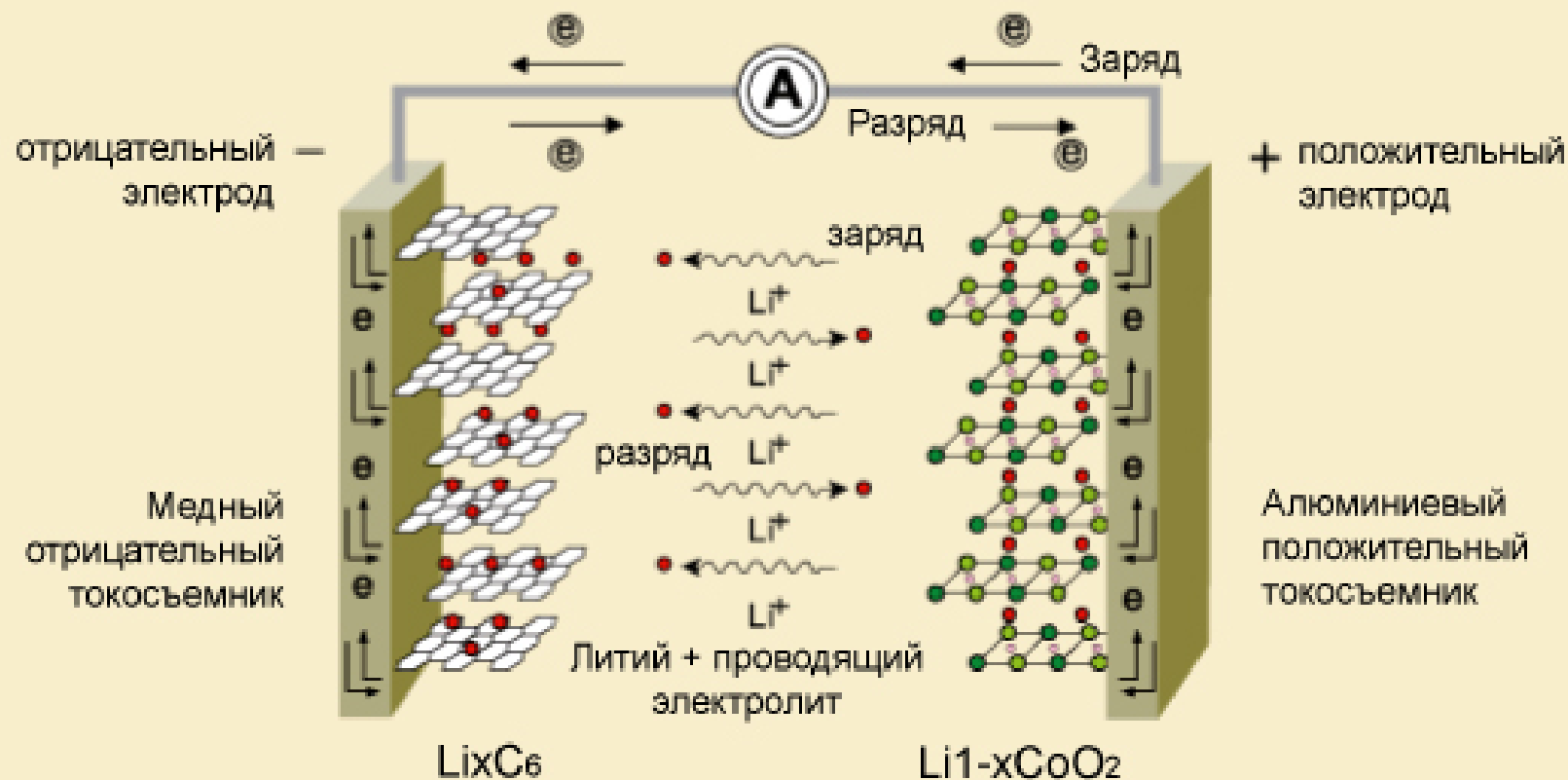


Ионы H^+ из раствора нейтрализуются на аноде и вступают в реакцию

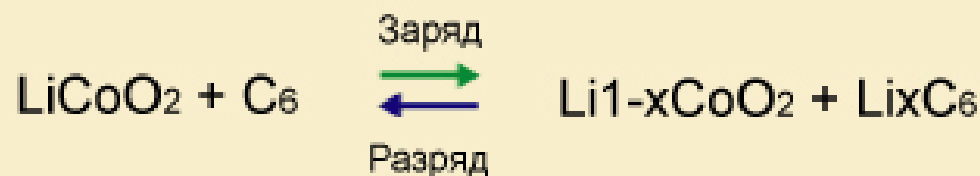


Li-Ion - литий-ионные аккумуляторы.

- **Литий - наиболее химически активный металл. На его основе работают современные источники питания для ноутбуков. Практически все высокоплотные источники питания используют литий в силу его химических свойств.**
- **Килограмм лития способен хранить 3860 ампер-часов. Для сравнения, показатель цинка - 820, свинца - 260.**
- **В литий-ионных элементах ионы лития связаны молекулами графита C₆ и литийкобальтоксида (LiCoO₂)**



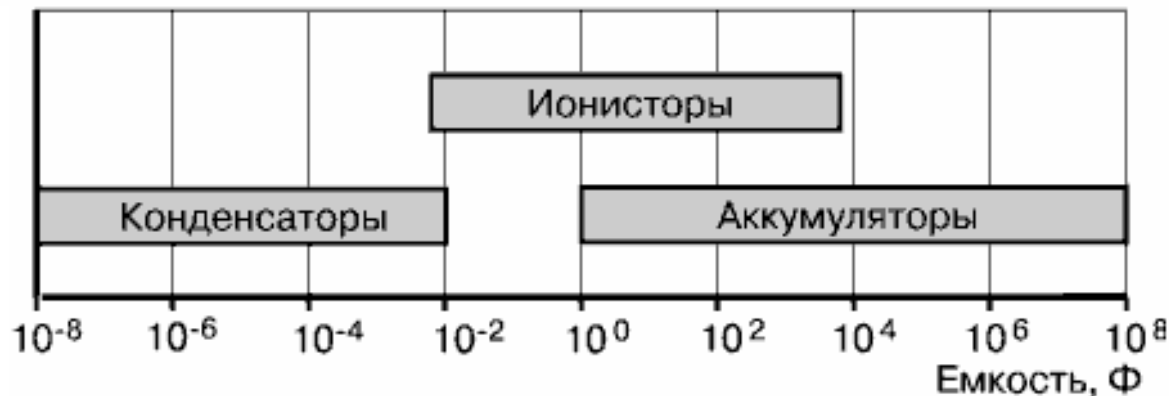
- O (Кислород)
- Co (Кобальт)
- C (Уголь)
- Li^+ (Ион лития)



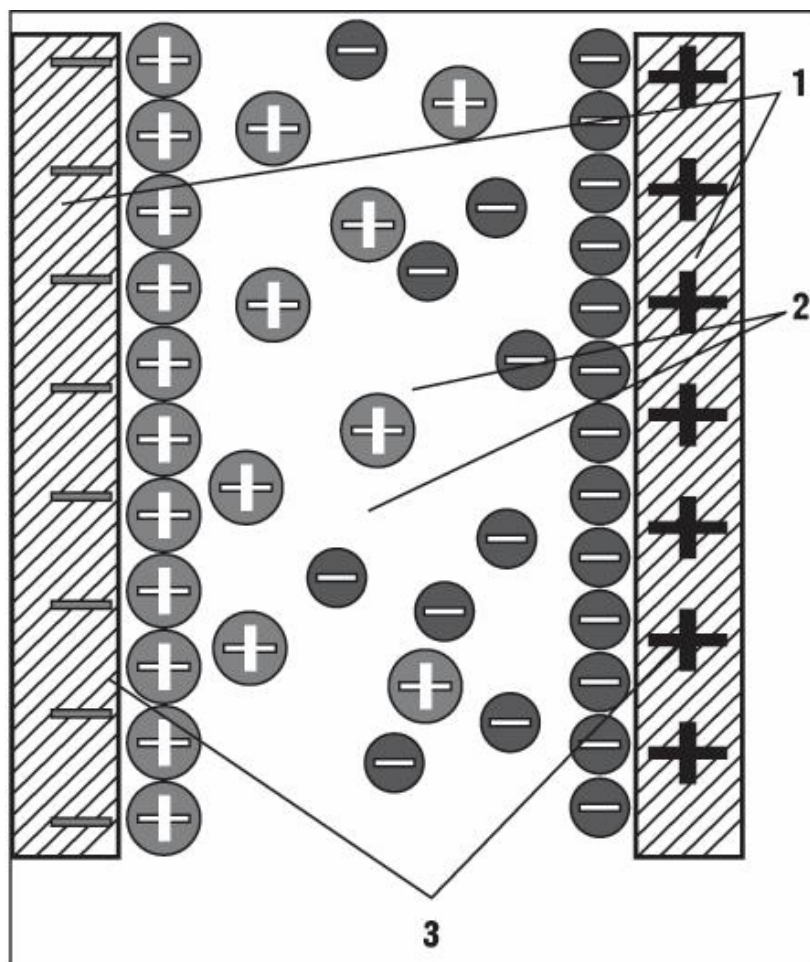
Сравнительные характеристики современных аккумуляторов

Сравнительные характеристики современных источников тока

Источники тока	Энергетическая мощность (Вт*час/кг)	Срок службы (число циклов заряд – разряд)
Свинцово-кислотные аккумуляторы	30	300
Никель-кадмиевые (Ni-Cd)	40-60	1500
Никель-металлгидридные (Ni-MH)	75	500
Ионно-литиевые аккумуляторы (Li-ОН)	100	500
Полимерно-литиевые аккумуляторы	175	150



Суперконденсаторы(ионистеры).



Двойной электрический слой в суперконденсаторе

**1 – электроды, 2 – ионы электролита,
3 – область ДЭС**