Тема 2

Постоянный ток

Закон Ома для однородного участка цепи

$$\boxed{U = IR}$$

I- ток]A]=[Кл/с]

ρ

R- сопротивление, [Ом]=[В/А]

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

Георг Ом
1789 –1854

l- длина подводника,

S- площадь сечения

ρ – удельное сопротивление [Ом*м]

Удельное сопротивление различных материалов

Проводники	ρ, Ом·мм²/м	ρ, Ом·м
Алюминий	0,027	$2,7 \cdot 10^{-8}$
провод	0,0287	$2,87 \cdot 10^{-8}$
Вольфрам	0,055	$5,5 \cdot 10^{-8}$
Графит	8,0	$8,0 \cdot 10^{-6}$
Железо, чистое	0,1	$1,0 \cdot 10^{-7}$
Золото	0,022	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Иридий	0,0474	$4,74 \cdot 10^{-8}$
Константан	0,50	$5,0 \cdot 10^{-7}$
Литая сталь	0,13	$1,3 \cdot 10^{-7}$
Магний	0,044	$4,4 \cdot 10^{-8}$
Манганин	0,43	$4,3 \cdot 10^{-7}$
Медь	0,0172	$1,72 \cdot 10^{-8}$
провод	0,0178	$1,78 \cdot 10^{-3}$
Молибден	0,054	$5,4 \cdot 10^{-8}$
Нейзильбер	0,33	$3,3 \cdot 10^{-7}$
Никель	0,087	$8,7 \cdot 10^{-6}$
Нихром	1,12	$1,12 \cdot 10^{-6}$
Олово	0,12	$1,2 \cdot 10^{-7}$
Платина	0,107	$1,07 \cdot 10^{-7}$
Ртуть	0,96	$9,6 \cdot 10^{-7}$
Свинец	0,208	$2,08 \cdot 10^{-7}$
Серебро	0,016	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Серый чугун	1,0	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Угольные щетки	40	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Цинк	0,059	$5,9 \cdot 10^{-8}$

Изоляторы (примерное значение)	ρ, Ом·м
Бакелит	10^{16}
Бензол	$10^{15} \ldots 10^{16}$
Бумага	10^{15}
Вода дистиллированная	10^{4}
Вода морская	0,3
Дерево, сухое	$10^{9} \ldots 10^{13}$
Земля, влажная	10^{2}
Кварцевое стекло	10^{16}
Керосин	$10^{10} \ldots 10^{12}$
Мрамор	10^{8}
Парафин	$10^{14} \ldots 10^{16}$
Парафиновое масло	10^{14}
Плексиглас	10^{18}
Полистирол	10^{16}
Полихлорвинил	10^{13}
Полиэтилен	$10^{10} \ldots 10^{13}$
Силиконовое масло	10^{13}
Слюда	10^{14}
Стекло	10^{11}
Трансформаторное масло	$10^{10} \ldots 10^{13}$
Фарфор	10^{14}
Шифер	10^{6}
Эбонит	10^{16}
Янтарь	10^{18}

- Из закона Ома для участка проводника длиной dl:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{E\mathrm{d}l}{\rho \frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}S}} = \frac{E\mathrm{d}S}{\rho}$$

$$j = \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}S} = \frac{1}{\rho} E$$

- можно записать

$$\boxed{\vec{j} = \sigma \vec{E}}$$

<u>Закона Ома в дифференциальной форме</u>

$\sigma = 1/\rho$ – *удельная электропроводность.*

Дрейфовая скорость

- Плотность тока можно выразить через заряд электрона *e*, концентрацию зарядов *n* и дрейфовую скорость u :

$$\boxed{j = enu}$$

Для меди: $$n = \frac{M_{Cu} N_A}{\rho_{Cu}} \approx 8 * 10^{22} cm^{-3}$$

При плотности тока 100A/cm^2 : $$v = \frac{j}{ne} \approx 1 \frac{мм}{c}$$

Время релаксации объемных зарядов

ρ - пусть объемная плотность заряда в проводящей среде

$$\boxed{\frac{\partial \rho}{\partial t} = -div(\vec{j})}$$

-закон сохранения для заряда в дифференциальной форме

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$ - закон Ома

$$div\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon}$$ -теорема Гаусса

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -div(\sigma \vec{E}) = -\frac{\sigma \rho}{\varepsilon_0 \varepsilon} \qquad \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\sigma \rho}{\varepsilon_0 \varepsilon}$$

$$\boxed{\rho = \rho_0 e^{-t/t_r}} \qquad \boxed{t_r = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\sigma}}$$

Для морской воды:

$$t_r = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\sigma} \approx 6 * 10^{-10} c$$

Выводы

Стационарных объёмных зарядов в однородной проводящей среде нет!

Поверхностная плотность зарядов

Найти поверхностную плотность зарядов на границе проводников (пренебрегая контактной разностью потенциалов), если через контакт течет ток ***j***

$$\frac{E_1}{\rho_1} = j$$ - закон Ома в первой среде

$$\frac{E_2}{\rho_2} = j$$ - закон Ома во второй среде

$$E_1 = E_0 - E' = E_0 - \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$ - поле в первой среде

$$E_2 = E_0 + E' = E_0 + \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$ - поле во второй среде

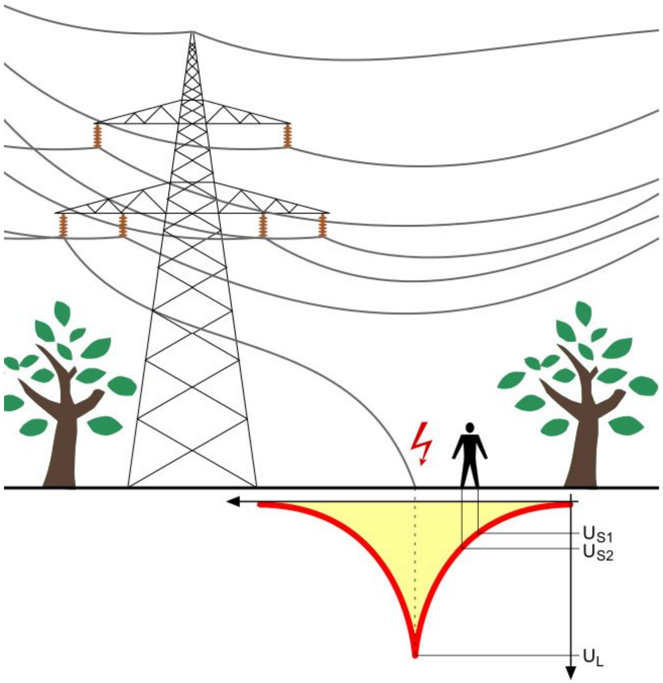
$$E_2 - E_1 = j\rho_2 - j\rho_1$$

$$\boxed{\sigma = j(\rho_2 - \rho_1)\varepsilon_0}$$ Поверхностная плотность заряда на границе сред

Задача I

Найти шаговое напряжение при точечной утечке тока (I=100A) в землю (σ=15 S/m)

$$i(r) = \frac{I}{2\pi r^2}$$ - из закона сохранения заряда



Из закона Ома: $$E(r) = \frac{i(r)}{\sigma} = \frac{I}{2\pi\sigma r^2}$$

Электрический потенциал:

$$\varphi(r) = -\int_{\infty}^{r} E(r)dr = \frac{I}{2\pi\sigma r}$$

$$V_{step} = \varphi(r) - \varphi(r+h) = \frac{I}{2\pi\sigma}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+h}\right)$$

$$\boxed{V_{step} \approx \frac{I}{2\pi\sigma}\frac{h}{r^2}}$$

Вопросы

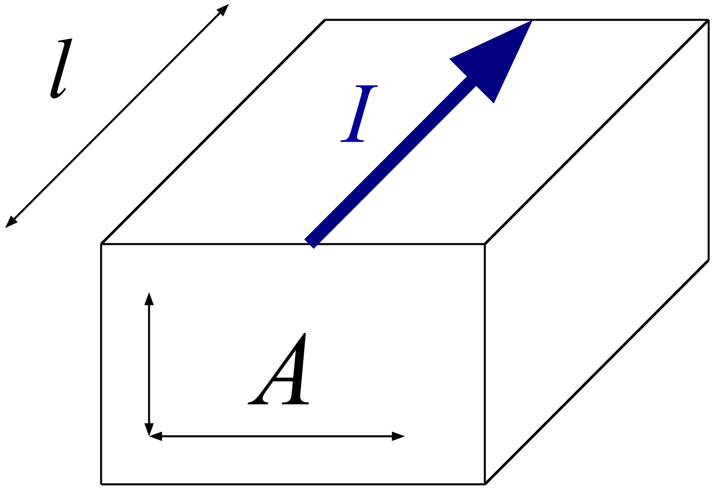
Чем будет отличаться случай утечки тока при заданном напряжении?

Что будет, если несколько проводов касаются земли?

По какому закону будет растекаться ток при утечке в тонкий пол?

Измерение проводимости?

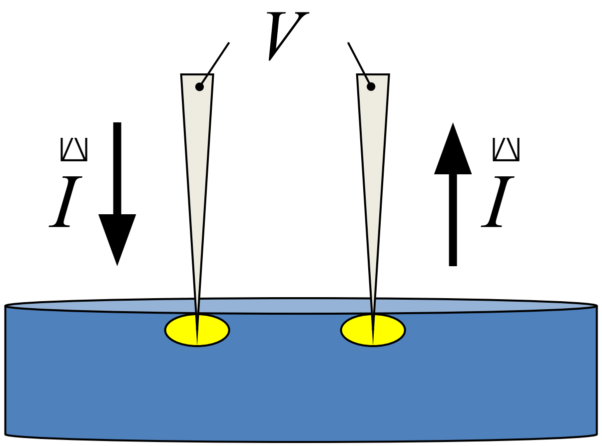
$$\sigma^{-1} = R\frac{A}{l}$$

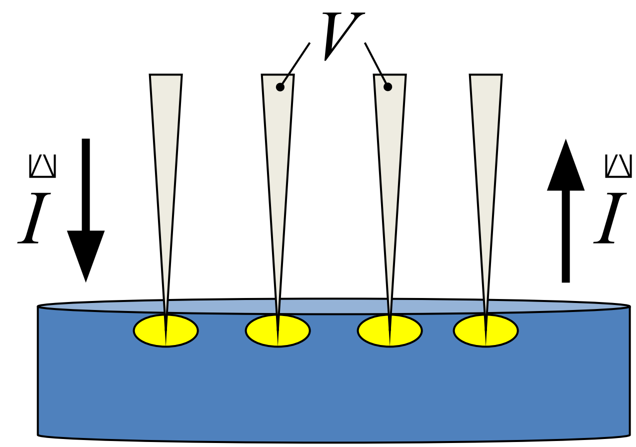


Измерение проводимости

2-точечная схема

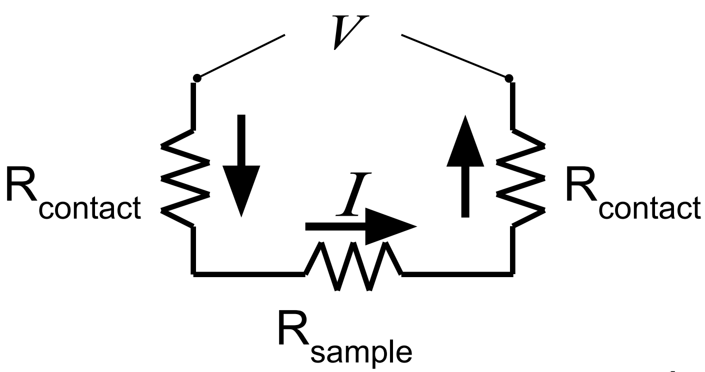
4-точечная схема

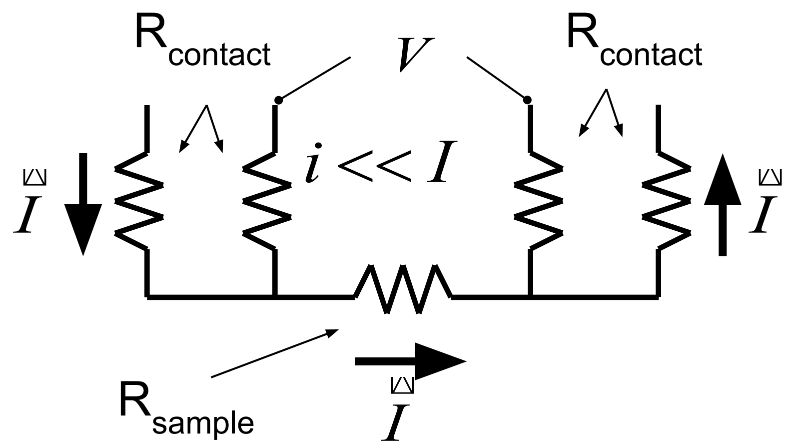




Измеряем сопротивление пробы + контактов

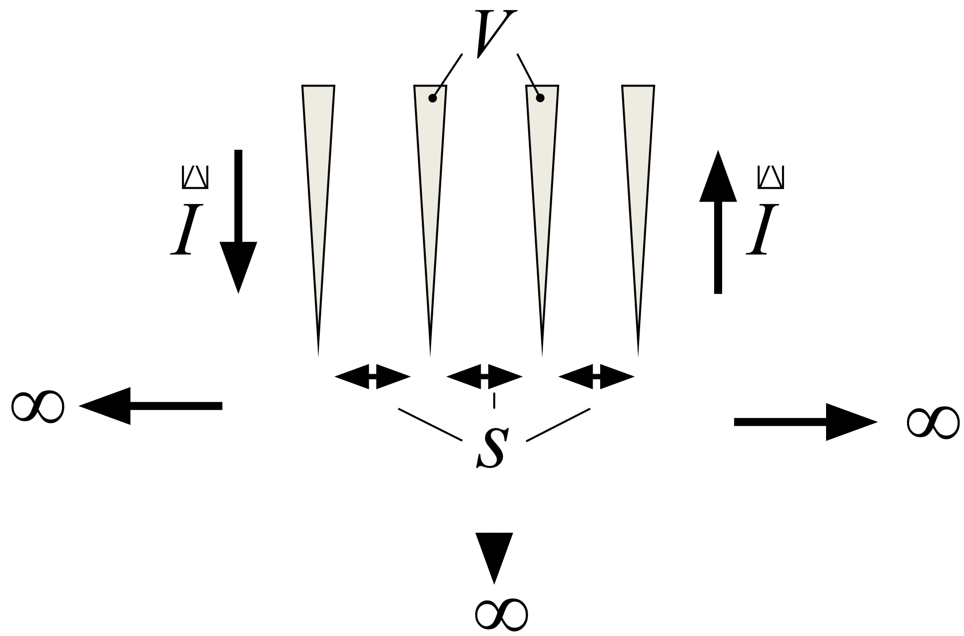
Измеряем только сопротивление образца





В 4-точечной схеме пренебрегаем током через вольтметр и измеряем только сопротивление образца

4-точечный метод

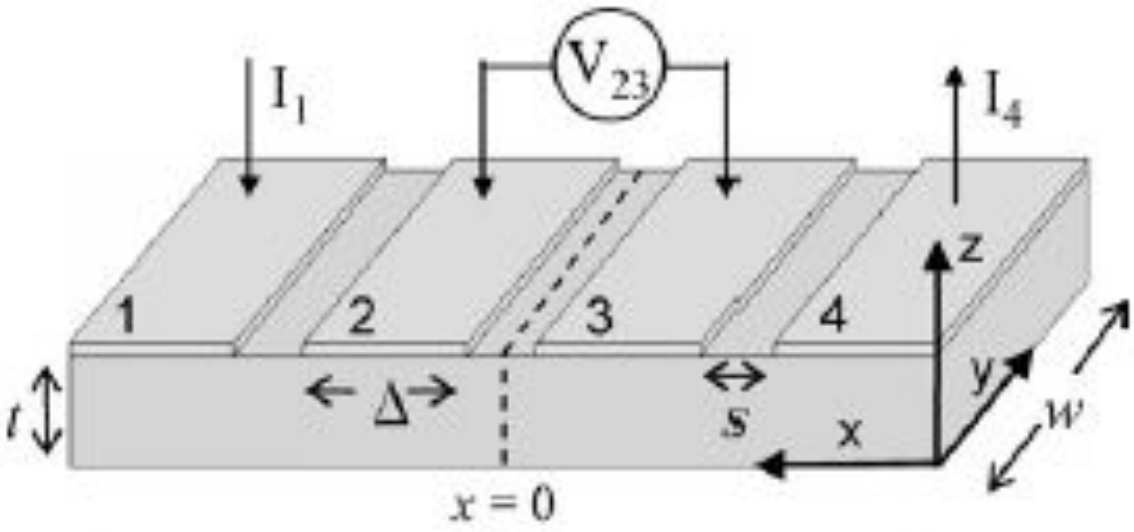


$$\varphi = \frac{I}{2\pi\sigma r_1} + \frac{-I}{2\pi\sigma r_2}$$

$$V = \varphi(2) - \varphi(3) = \left(\frac{I}{2\pi\sigma s} - \frac{I}{2\pi\sigma(s+s)}\right) - \left(\frac{I}{2\pi\sigma(s+s)} - \frac{I}{2\pi\sigma s}\right)$$

$$V = \frac{I}{2\pi\sigma s} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\sigma = \frac{I}{2\pi s V}}$$

Коррекции

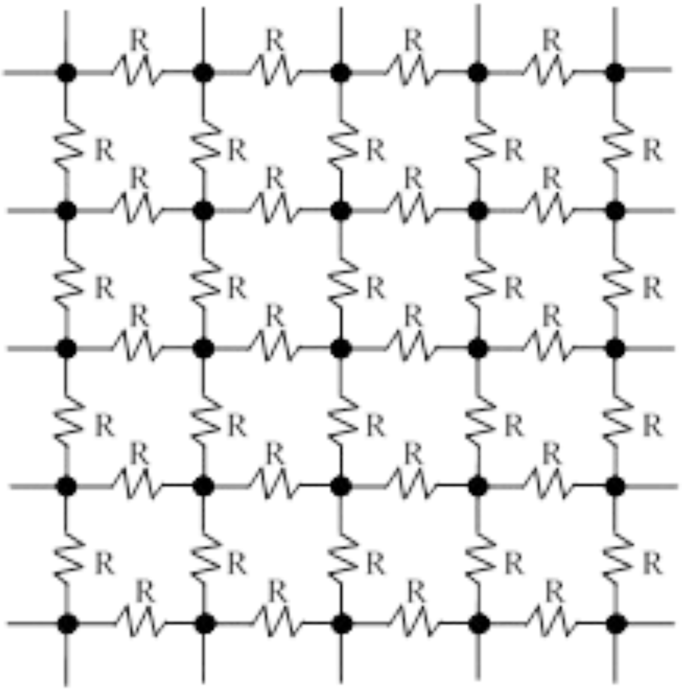


$$\sigma = \frac{I}{2\pi s V} F$$

F – коррекция геометрии

Классическая задача

Найти сопротивление между соседними точками бесконечной квадратной сетки резисторов:



$$\boxed{R_{grid} = \frac{R}{2}}$$

Работа и мощность тока. Закон Джоуля

- Рассмотрим произвольный участок цепи, к концам которого приложено напряжение *U*. За время d*t*

$$\mathrm{d}q = I\mathrm{d}t.$$

- силы электрического поля, действующего на данном участке, совершают работу:

$$\mathrm{d}A = U\mathrm{d}q = UI\mathrm{d}t.$$

- Общая работа:

$$A = IUt$$

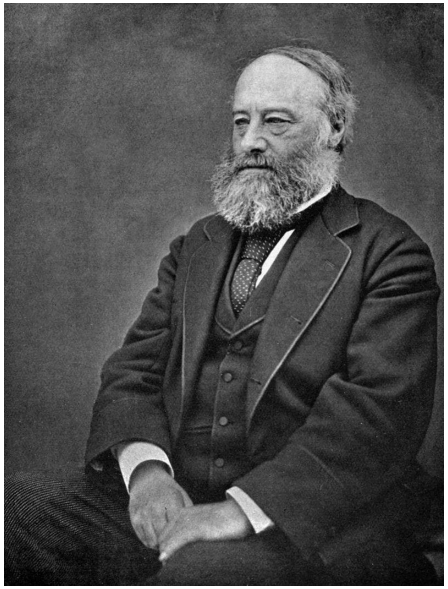
Разделив работу на время, получим выражение для мощности:

$$P = \frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t} = UI.$$

Другие формулы для мощности и работы:

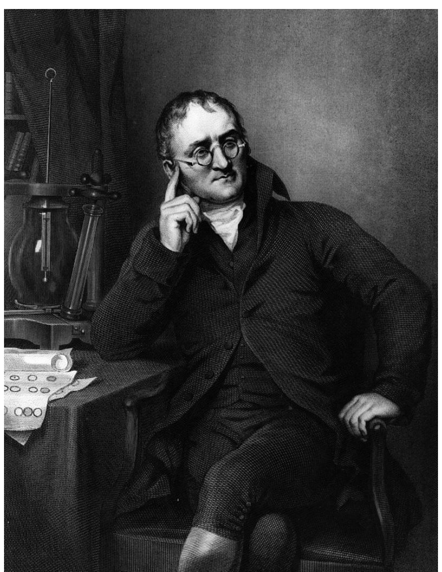
$$P = RI^2, \qquad A = RI^2 t,$$

$$P = \frac{U^2}{R}, \qquad A = \frac{U^2 t}{R}.$$



James Prescott Joule
1818-1889

William Thomson, 1st Baron Kelvin
1824-1907



John Dalton; 1766 —1844

При протекании тока, в проводнике выделяется количество теплоты:

$$dQ = RI^2 dt.$$

Если ток изменяется со временем:

$$Q = \int_1^2 RI^2 \mathrm{d}t$$

Закон Джоуля в интегральной форме.

- Тепловая мощность тока в элементе проводника Δl, сечением ΔS, объемом

равна:

$$\Delta V = \Delta l \cdot \Delta S$$

$$\Delta W = I^2 R = I\Delta\varphi = j\Delta S E\Delta l = \vec{j}\vec{E}\Delta V$$

Удельная мощность тока:

$$\boxed{\omega = \frac{\Delta W}{\Delta V} = (\vec{j}\vec{E})}$$

Согласно закону Ома в дифференциальной форме получим $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

Закон Джоуля в дифференциальной форме, определя плотность выделенной энергии:

$$\boxed{\omega = \sigma \vec{E}^2}$$

$$\boxed{\omega = \frac{\vec{j}^2}{\sigma}}$$

- ***Мощность, выделенная в единице объема проводника*** .

$$\boxed{\omega = \frac{j^2}{\sigma}}$$

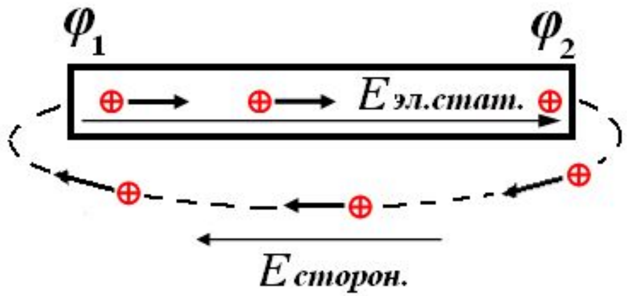
- Приведенная формула справедлива для однородного участка цепи и для неоднородного.

Сторонние силы. Электродвижущая сила.

Сторонние силы совершают работу по перемещению электрических зарядов.

Электродвижущая сила (э.д.с. – Е) – физическая величина, определяемая работой, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного пробоного положительного заряда

$$\boxed{\mathrm{E} = \frac{A}{q_{0+}}.}$$



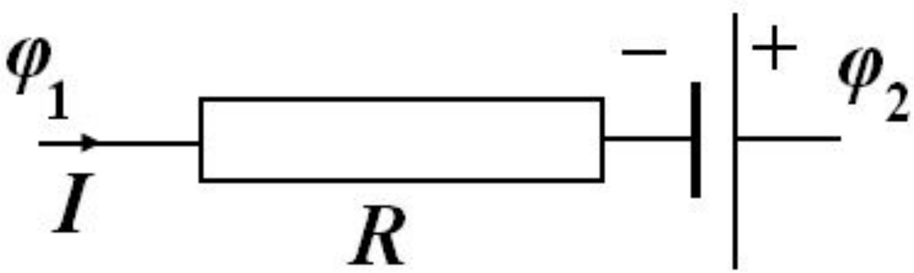
Напряжение на участке цепи

<u>Напряжение</u> - величина, численно равная работе, совершаемой полем электростатических и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда на этом участке цепи

$$\boxed{U = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathrm{E}.}$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи

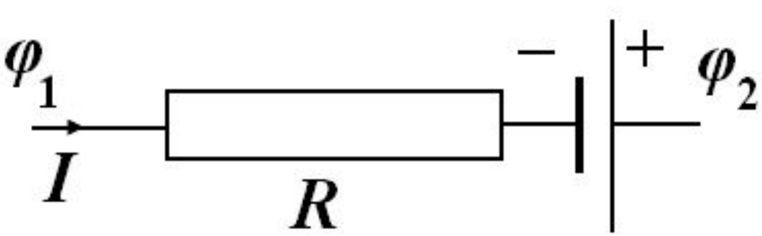
- Работа, совершаемая кулоновскими и сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда q_{0+} – <u>падение напряжения (напряжение).</u>



$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathrm{E}}{R}$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи

- Если источник э.д.с. включен таким образом, что в направлении протекания тока он повышает потенциал электрической цепи, то он берется с плюсом + Е.

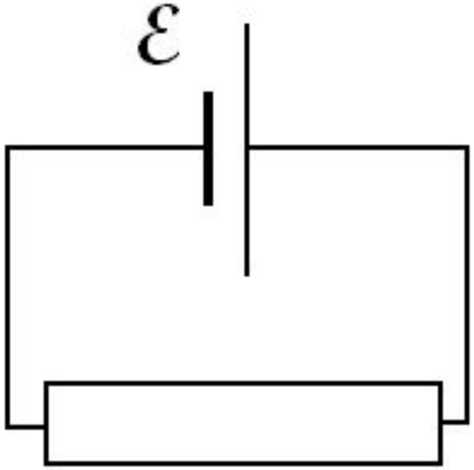


$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E}{R}$$

Закон Ома для замкнутой цепи

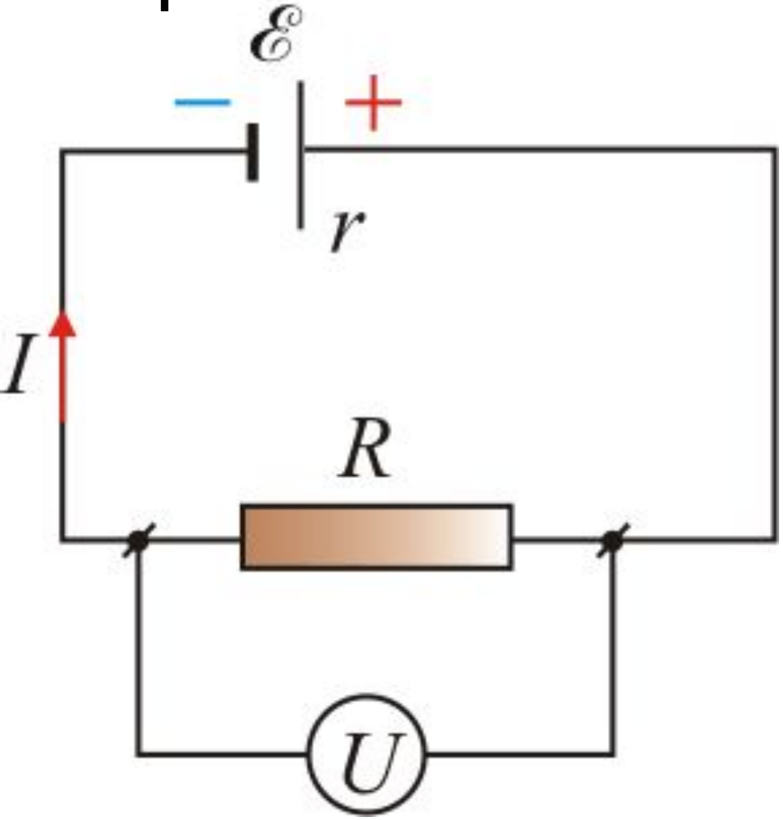
- Если цепь <u>замкнутая</u>, то $\varphi_1 = \varphi_2$.

$$I = \frac{\text{E}}{R_{полн}}; \qquad R_{полн} = r_{внутр.ист.т.} + R_{внеш.цепи}.$$



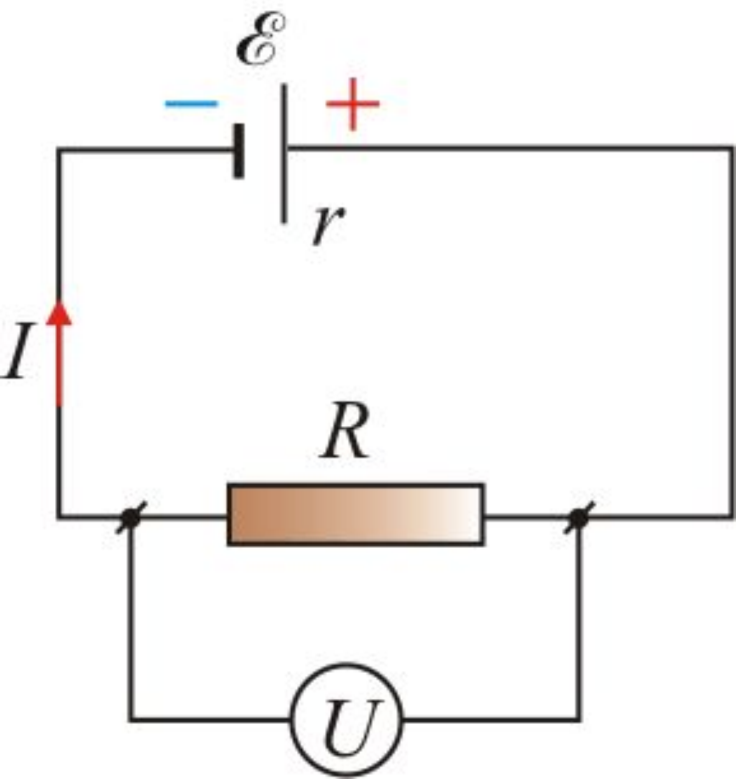
КПД источника тока

- Рассмотрим элементарную электрическую цепь, содержащую источник ЭДС с внутренним сопротивлением *r*, и внешним сопротивлением *R*



- КПД - отношение полезной работы к затраченной:

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{з}}} = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{з}}} = \frac{UI}{E_{\text{ЭДС}} I} = \frac{U}{E_{\text{ЭДС}}}.$$



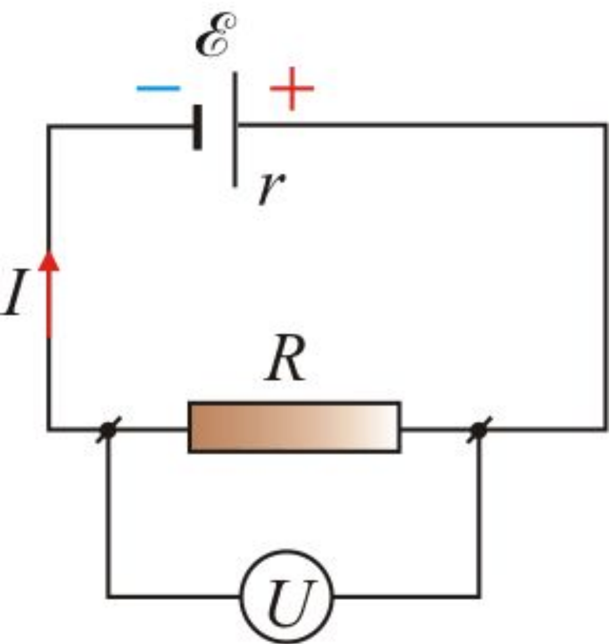
- ***Полезная работа*** – мощность, выделяемая на внешнем сопротивлении *R* в единицу времени.

$$U = IR,$$

- Из закона Ома:

$$E_{ЭДС} = (R + r)I,$$

- тогда:



$$\eta = \frac{U}{E_{ЭДС}} = \frac{IR}{I(R+r)} = \frac{R}{R+r}$$

- Таким образом, имеем, что при $R \to \infty$, $\eta \to 1$, но при этом ток в цепи мал и полезная мощность мала.

$$\eta = \frac{R}{R+r}$$

- Условия, при которых полезная мощность будет максимальна.

$$\boxed{\frac{\mathrm{d}P_{п}}{\mathrm{d}R} = 0.}$$

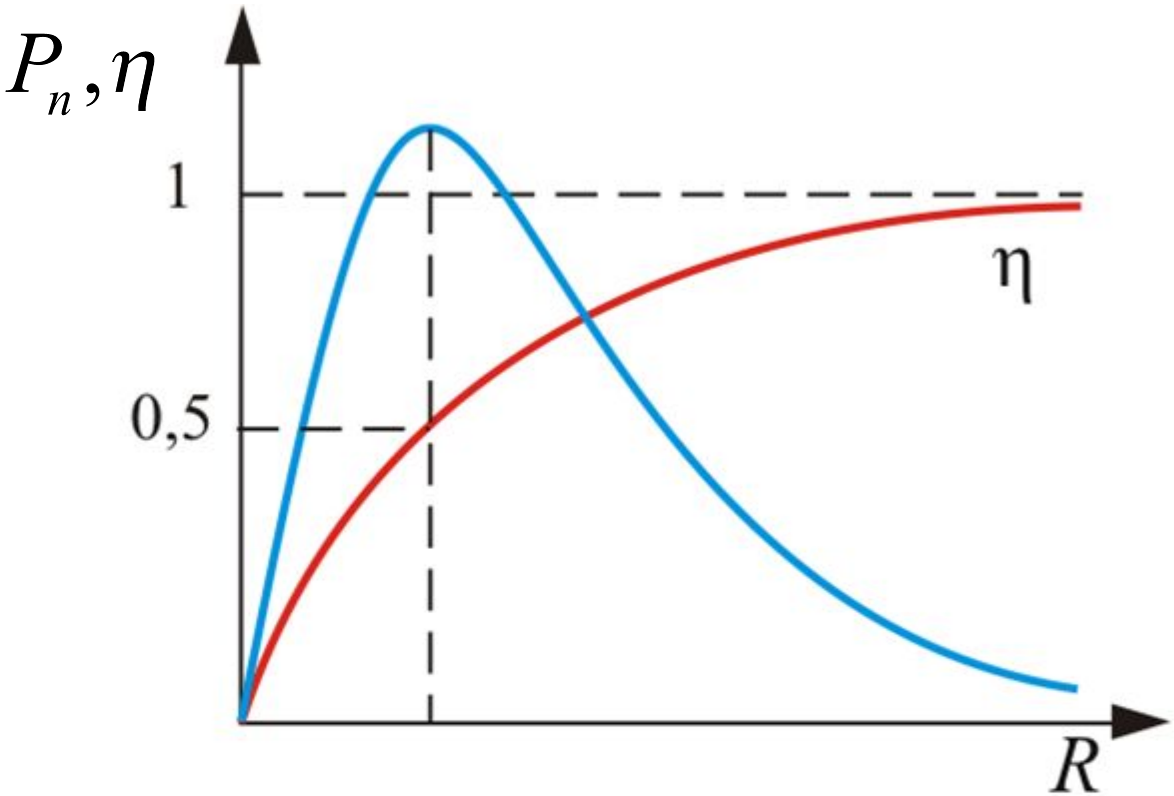
$$P_{\text{п}} = I^2 R = \left(\frac{E_{ЭДС}}{R + r} \right)^2 R$$

$$\frac{\mathrm{dP}_{\text{п}}}{\mathrm{d}R} = \frac{E_{ЭДС}{}^2 \left(R + r\right)^2 - 2\left(r + R\right) E_{ЭДС}{}^2 R}{\left(R + r\right)^4} = 0$$

$$E_{ЭДС}{}^2 \left[\left(R + r\right) - 2R \right] = 0$$

$$R = r \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{\mathrm{dP}_{\text{п}}}{\mathrm{d}R} = 0.}$$

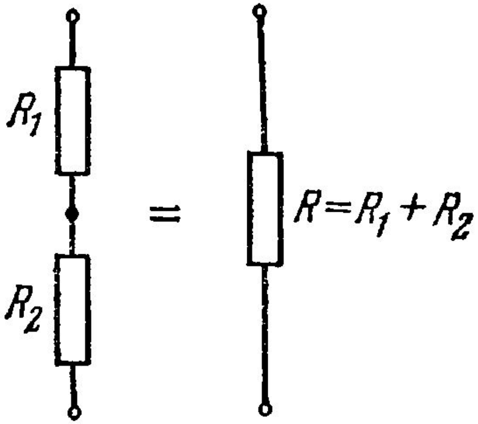
- ***r = R***.
- При этом условии выделяемая мощность максимальна, а КПД равен 50%.



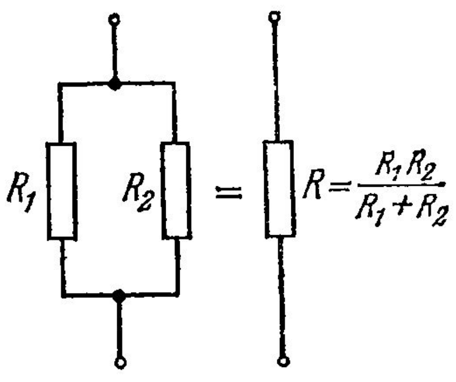
Выводы

- Для каждого источника тока существует своя оптимальная полезная нагрузка
- И для каждой нагрузки надо подбирать свой источник тока

Параллельное и последовательное соединение противлений



$$U = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2)$$

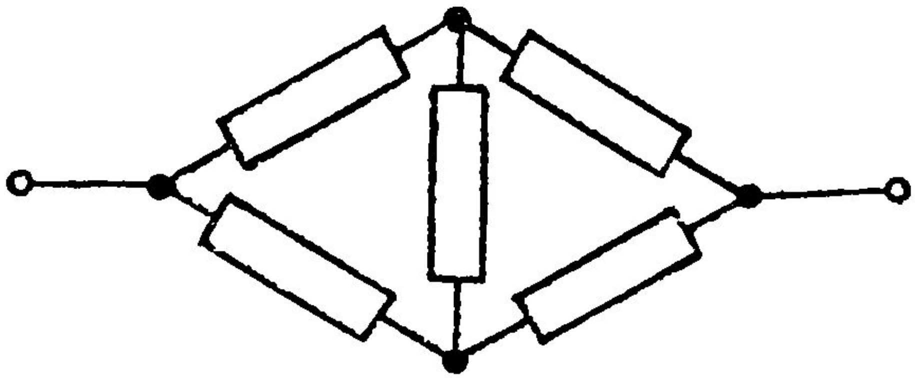


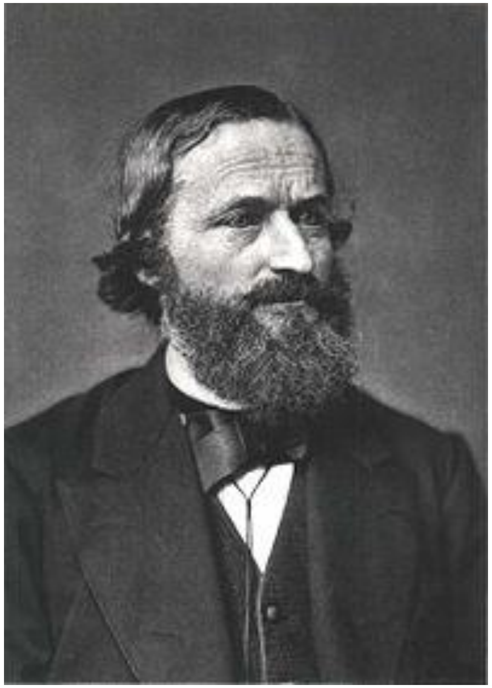
$$\frac{U}{R_1} = I_1, \quad \frac{U}{R_2} = I_2$$

$$I = I_1 + I_2 = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

$$U = I\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}\right)$$

Правила Кирхгофа для разветвленных цепей с переменным током

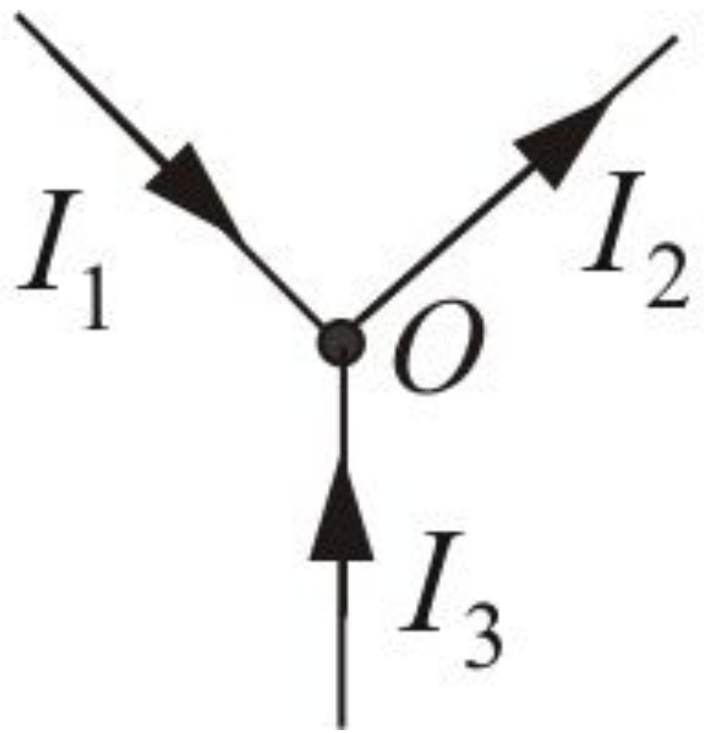




Gustav Robert Kirchhoff; 1824- 1887

Первое правило Кирхгофа

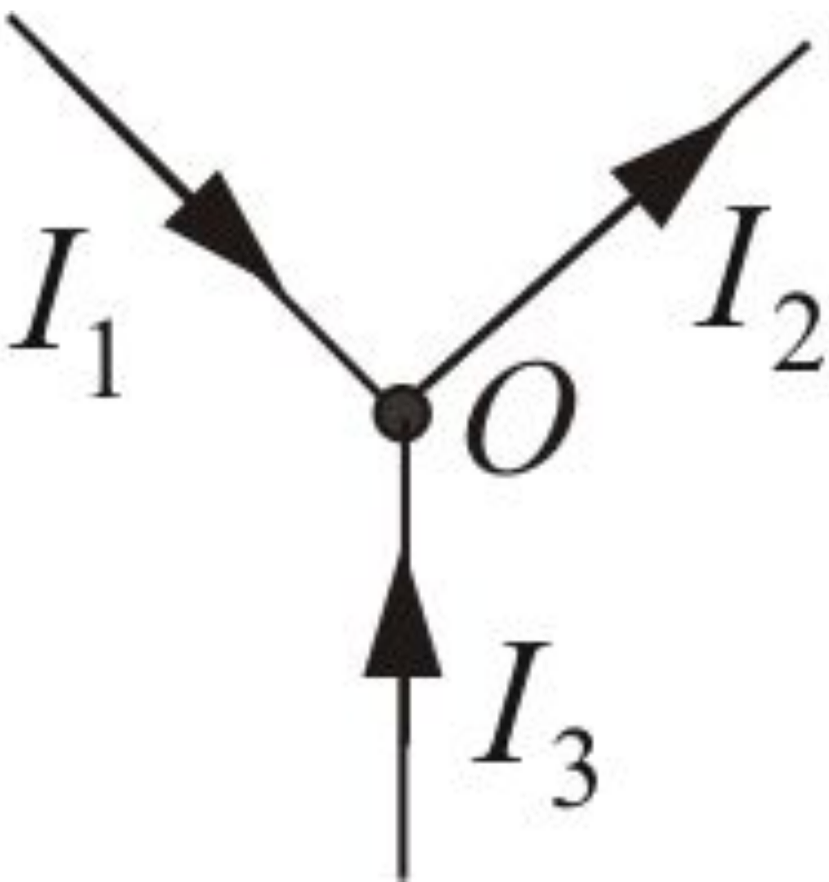
Алгебраическая сумма токов, сходящихся в любом узле цепи равна нулю:



$$\boxed{\sum_{k=1}^{N} I_k = 0.}$$

(<u>*узел*</u> – любой участок цепи, где сходятся более двух проводников)

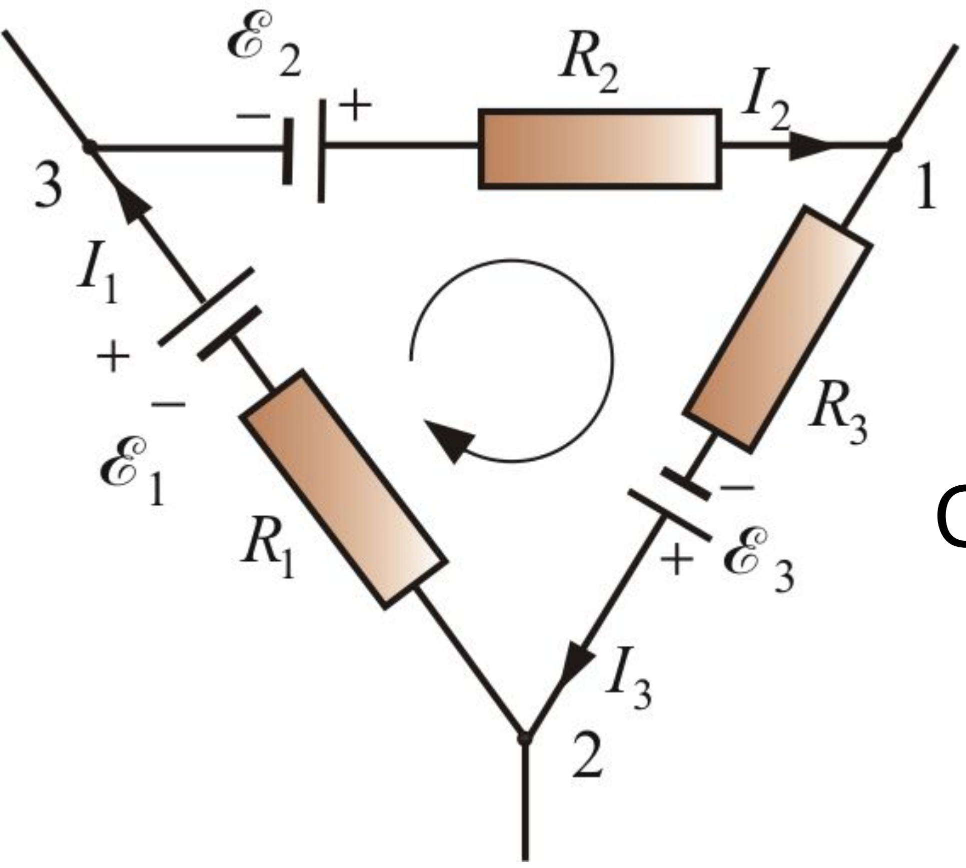
- В случае установившегося постоянного тока в цепи ни в одной точке проводника, ни на одном из его участков не должны накапливаться электрические заряды



Токи, сходящиеся к узлу, считаются положительными:

$$\boxed{I_1 - I_2 + I_3 = 0.}$$

- **Второе правило Кирхгофа** (обобщение закона Ома для разветвленной цепи).



$$\varphi_2 - \varphi_3 + E_1 = I_1 R_1;$$

$$\varphi_3 - \varphi_1 + E_2 = I_2 R_2;$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 + E_3 = I_3 R_3.$$

Складывая получим:

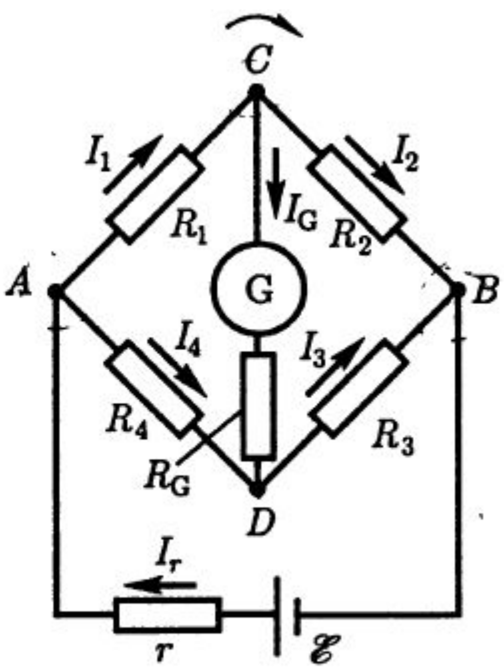
$$\sum_k I_k R_k = \sum_k E_k.$$

- В любом замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма произведения тока на сопротивление равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре.

$$\boxed{\sum_k I_k R_k = \sum_k E_k.}$$

- Обход контуров осуществляется по часовой стрелке, если направление обхода совпадает с направлением тока, то ток берется со знаком «плюс».

Мост Уинстона



Для узла А: $I_r - I_1 - I_4 = 0$

Для узла В: $I_2 + I_3 - I_r = 0$

Для узла С: $I_1 - I_2 - I_G = 0$

Для узла D $I_4 - I_3 + I_G = 0$

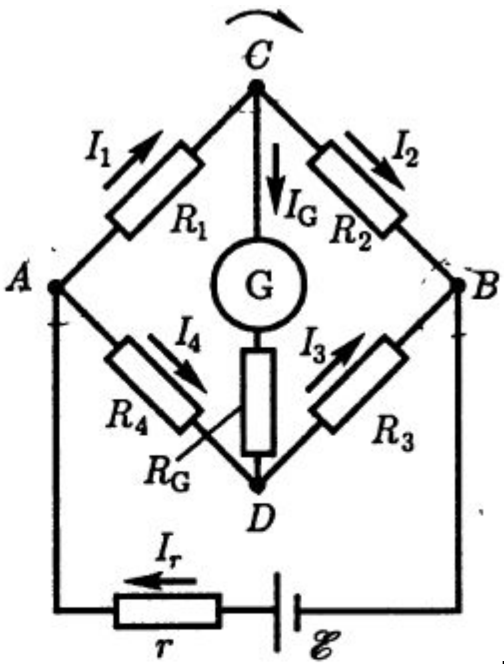
Для контура АСВА: $I_r r - I_1 R_2 + I_2 R_2 = E_{ЭДС}$

Для контура АСD: $I_1 R_1 + I_G R_G - I_4 R_4 = 0$

Для контура СВD $I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_G R_G = 0$

Мост Уинстона в равновесии

$$\boxed{I_G = 0}$$



Для узла C: $I_1 - I_2 = 0$

Для узла D: $I_4 - I_3 = 0$

Для контура ACDA: $I_1 R_1 - I_4 R_4 = 0$

Для контура CBDC: $I_2 R_2 - I_3 R_3 = 0$

$$I_4 \frac{R_4}{R_1} - I_3 \frac{R_3}{R_2} = 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}}$$

Электрический ток, ионизации и рекомбинации в газах

- Процесс ионизации заключается в том, что под действием высокой температуры или излучения молекулы газа теряют электроны и тем самым превращаются в положительные ионы.
- Ток в газах – это встречный поток ионов и свободных электронов.
- Одновременно с процессом ионизации идёт обратный процесс рекомбинации.
- Рекомбинация – это нейтрализация при встрече разноименных ионов или воссоединение иона и электрона в нейтральную молекулу (атом).

Обозначения

- n – концентрация ионов
- Δn_i – число пар ионов возникающих под действием ионизатора за *1* сек в единице V
- Δn_r – число пар ионов рекомбинирующих за 1 сек в единице объема
- Δn_j – число пар ионов уходящих из газоразрядного промежутка к электродам за 1 сек
- $\vec{\mathbf{j}}$ – плотность тока
- $\vec{\mathbf{E}}$ – напряженность электрического поля

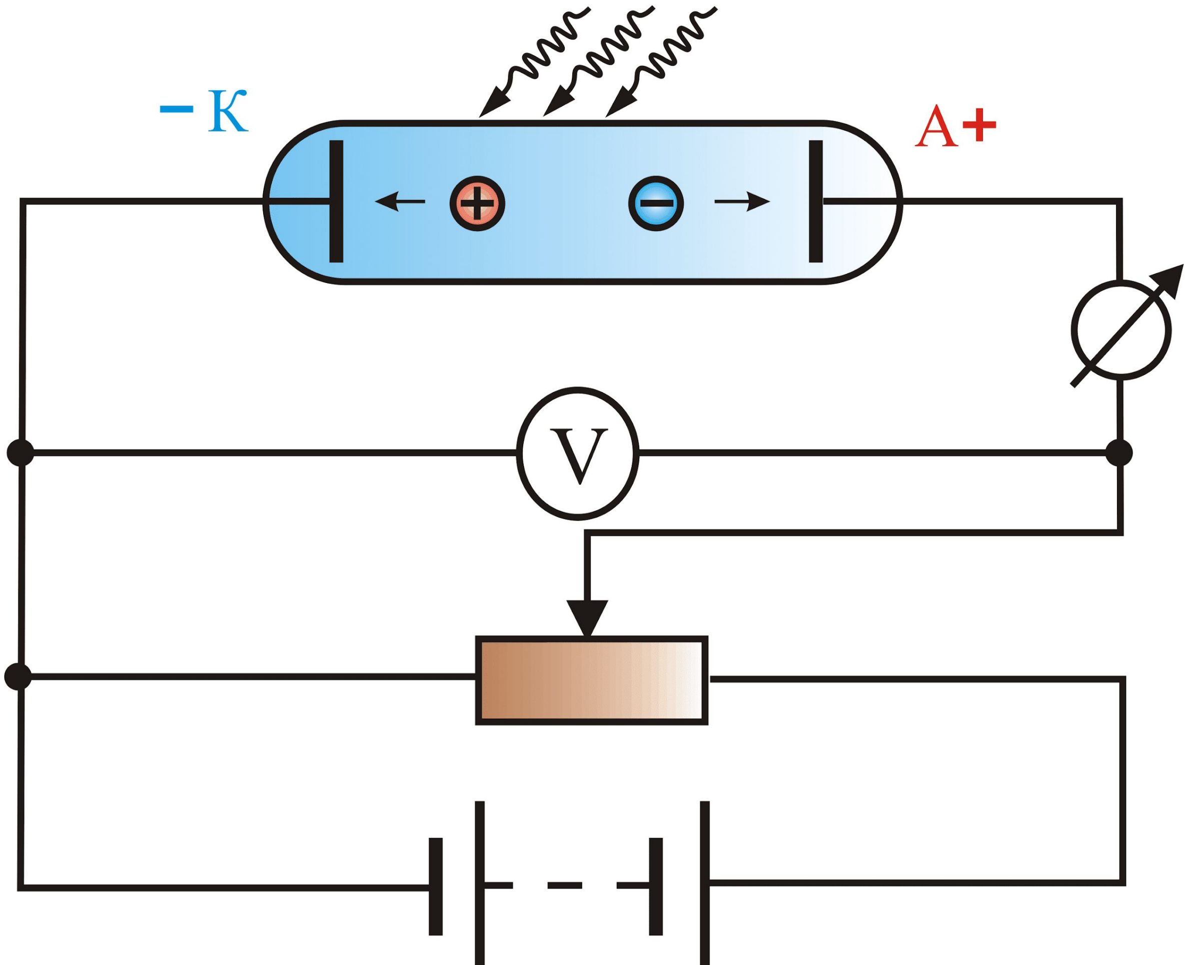
Равновесное состояние, при котором число пар ионов, возникающих под действием ионизатора за одну секунду в единице объёма, равно числу пар рекомбинировавших и покинувших объем ионов.

$$\boxed{\Delta n_i = \Delta n_r + \Delta n_j.}$$

Условие равновесия в случае слабого поля

$$\Delta n_i = \Delta n_r + \Delta n_j.$$

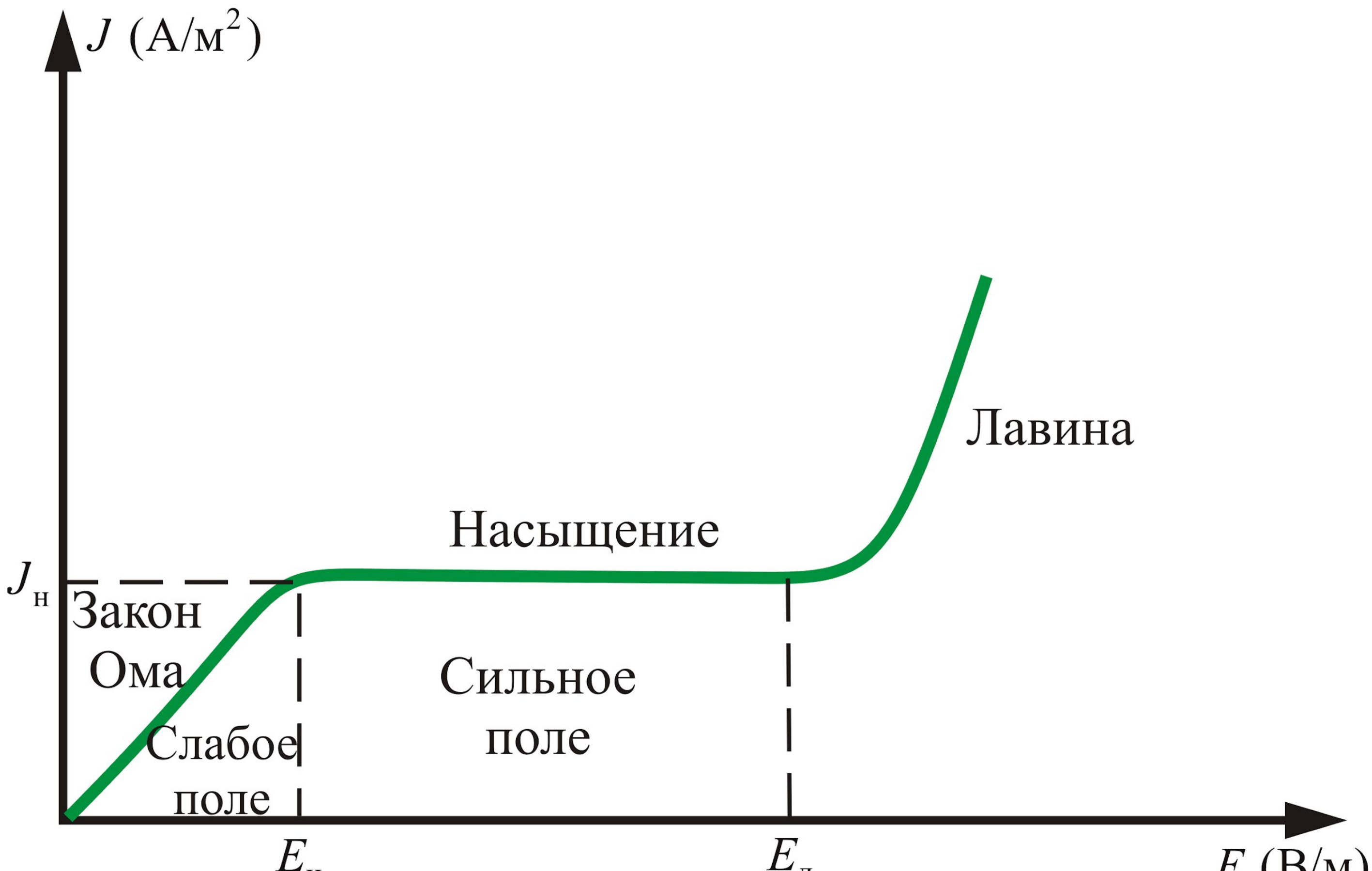
$$\boxed{\Delta n_j << \Delta n_r.}$$



Слабое поле

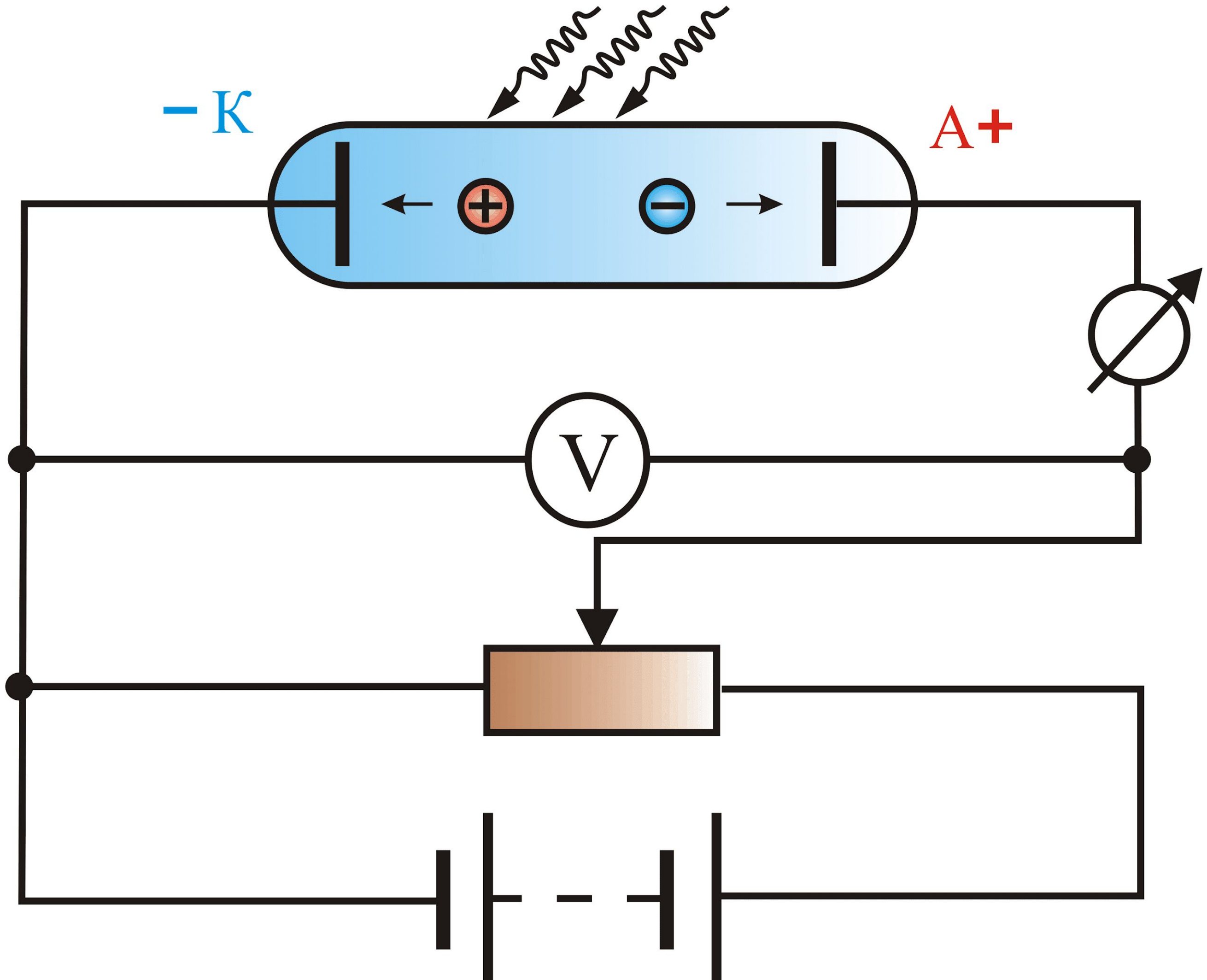
Слабый ток:

$$\vec{\mathbf{j}} = \sigma(a)\vec{\mathbf{E}}$$ – закон Ома в диф. форме.



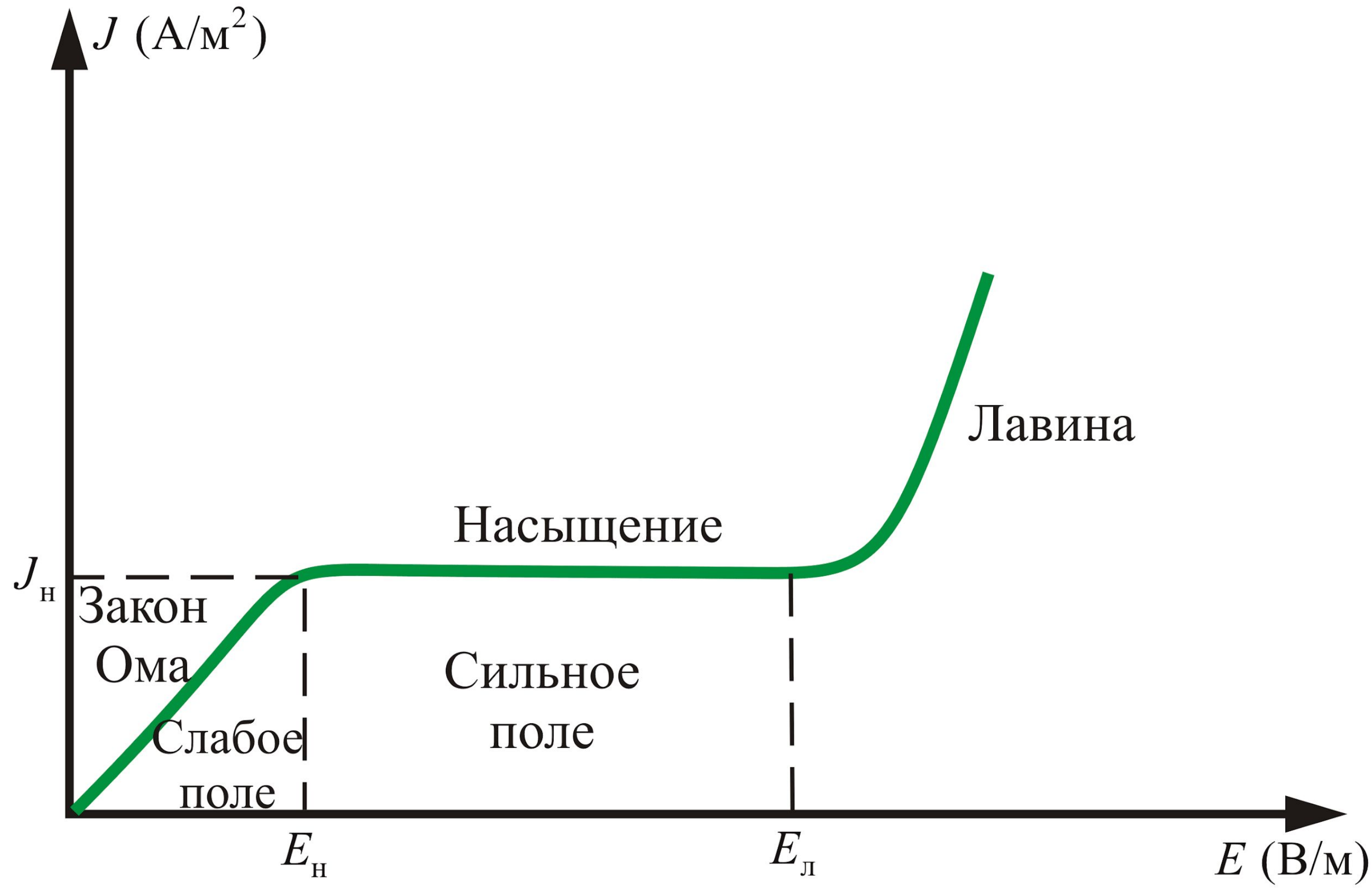
Сильное поле

$\Delta n_r \ll \Delta n_j \qquad \Delta n_i = \Delta n_j \qquad (\Delta n_r \to 0)$

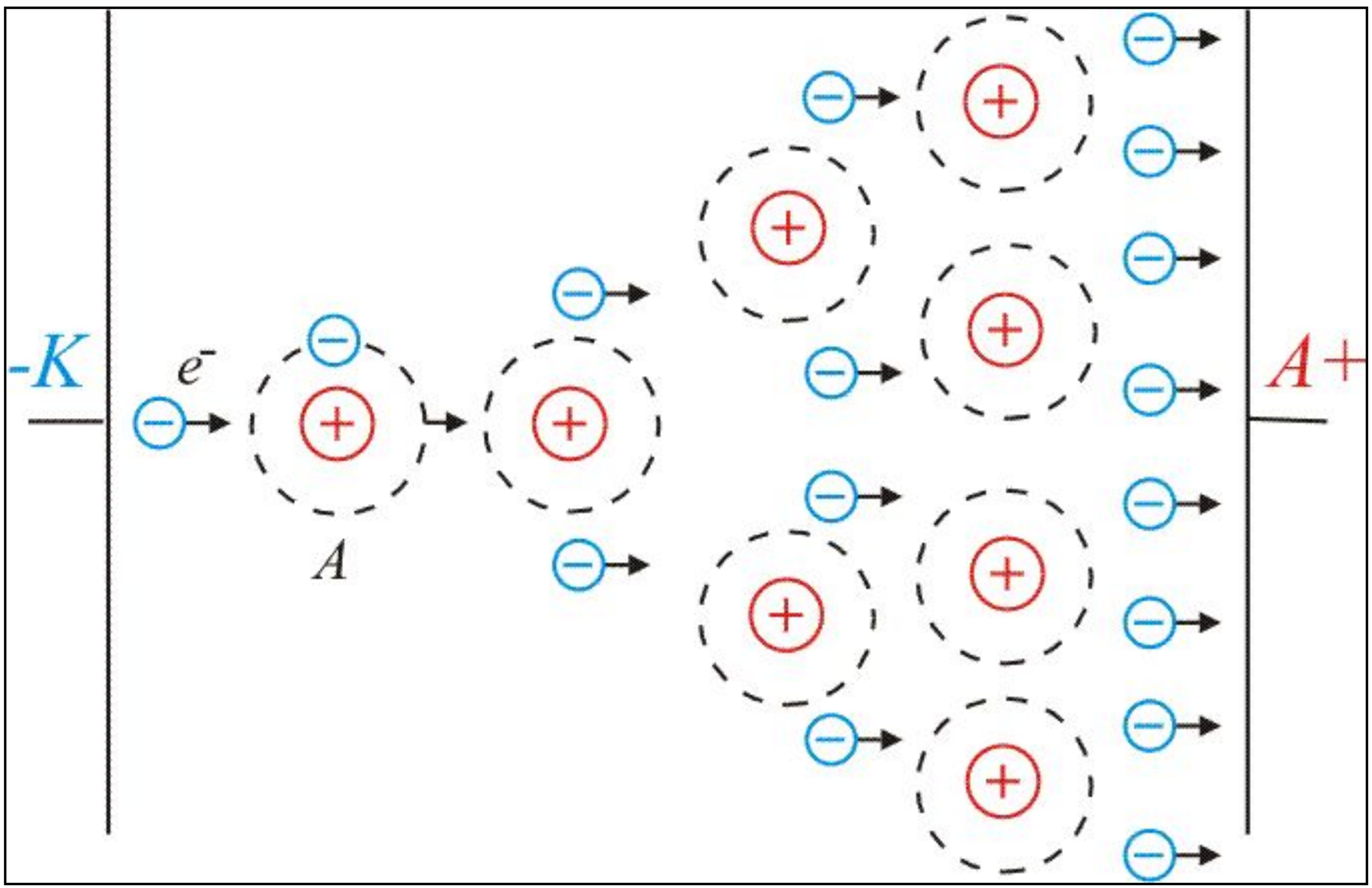


Сильное поле $\Delta n_r \ll \Delta n_j$ $\Delta n_i = \Delta n_j$ $(\Delta n_r \to 0)$

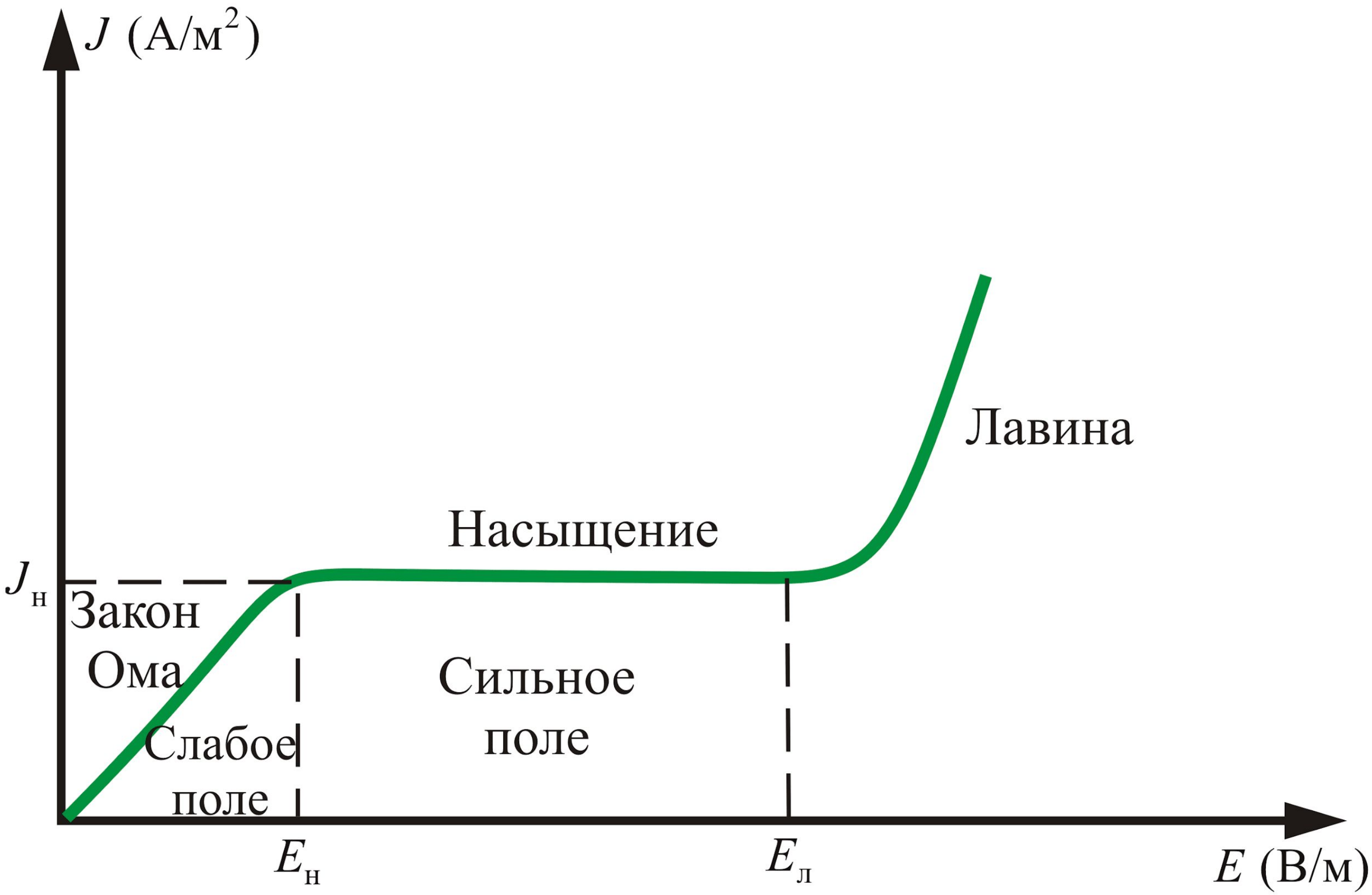
Максимальное значение тока, при котором все образующиеся ионы уходят к электродам, называется <u>ток насыщения</u>



Дальнейшее увеличение напряженности поля приводит к образованию лавины электронов

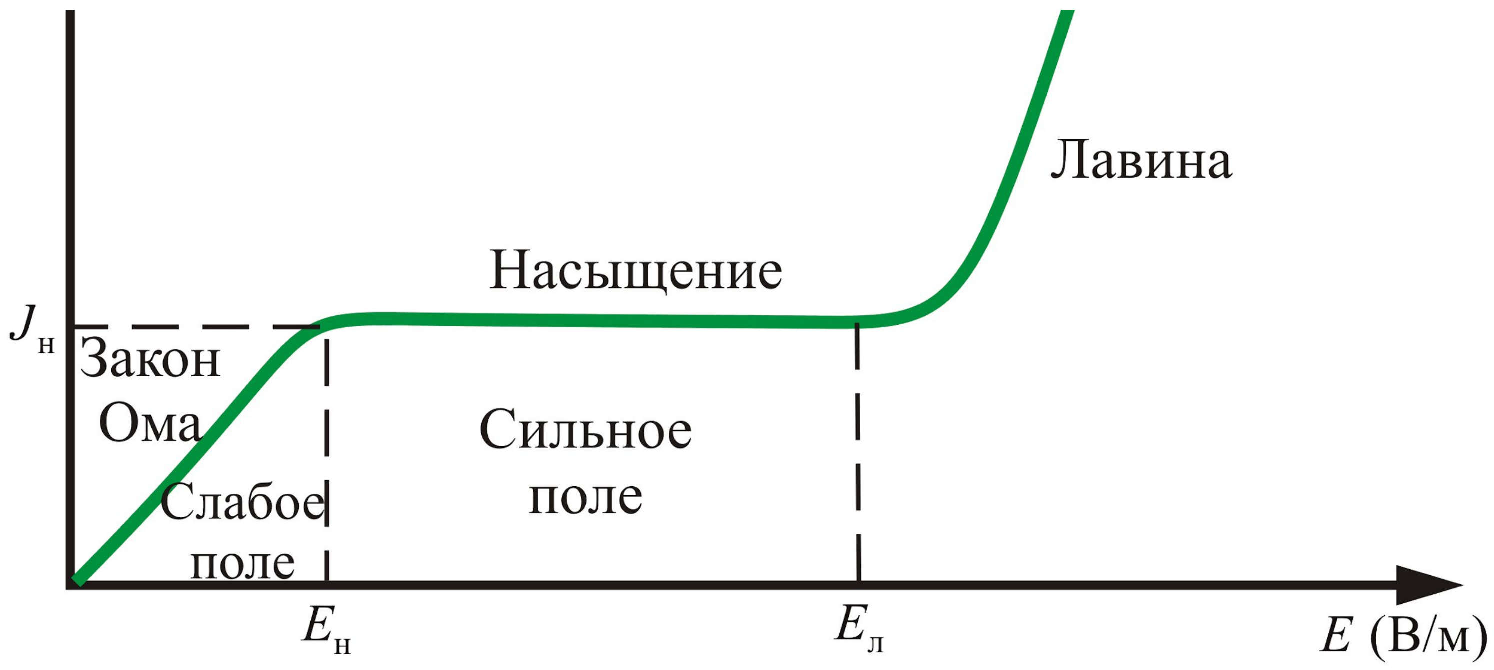


Лавинообразное размножение первичных ионов и электронов, созданных внешним ионизатором и усиление разрядного тока.



Выводы

- Малые поля - выполняется закон Ома.
- При больших полях закон Ома не выполняется – наступает явление насыщения,
- При полях превышающих $E_л$ – возникает лавина зарядов, обуславливающая значительное увеличение плотности тока



Типы разрядов

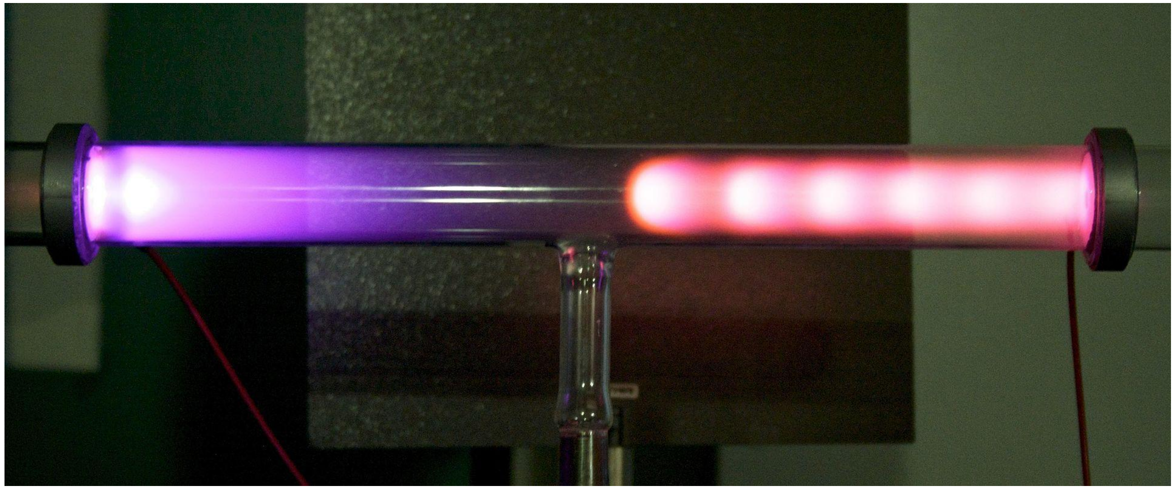
В зависимости от давления газа, конфигурации электродов и параметров внешней цепи существует четыре типа самостоятельных разрядов:

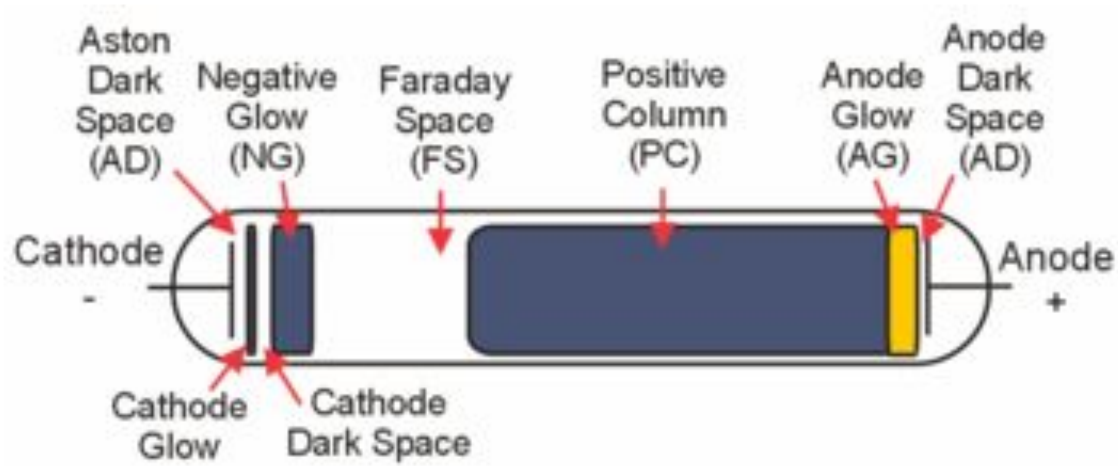
- тлеющий разряд;
- искровой разряд;
- дуговой разряд;
- коронный разряд.

Тлеющий разряд

- Тлеющий разряд возникает при низких давлениях (в вакуумных трубках).
- Можно наблюдать в стеклянной трубке с впаянными у концов плоскими металлическими электродами.

Тлеющий разряд





Астоново темное пространство; Катодная светящаяся пленка; Катодное темное пространство; Тлеющее свечение; Фарадеево темное пространство; Положительный столб.

Искровой разряд

- Искровой разряд возникает в газе обычно при давлениях порядка атмосферного $P_{ат}$.
- Он характеризуется прерывистой формой.
- По внешнему виду искровой разряд представляет собой пучок ярких зигзагообразных разветвляющихся тонких полос, мгновенно пронизывающих разрядный промежуток, быстро гаснущих и постоянно сменяющих друг друга.
- Эти полоски называют искровыми каналами.

- В естественных природных условиях искровой разряд наблюдается в виде молнии.
- продолжительностью $0,2 \div 0,3$с
- силой тока $10^4 - 10^5$ А, длиной 20 км

- *Диаметр канала молнии*
- *равен примерно 1 см,*
- *температура в канале молнии*
- *равна примерно 25 000°С,*
- *продолжительность разряда*
- *составляет доли секунды.*


Ток молнии может достигать 1 млн А, напряженность поля пробоя (10-30) кВ/см

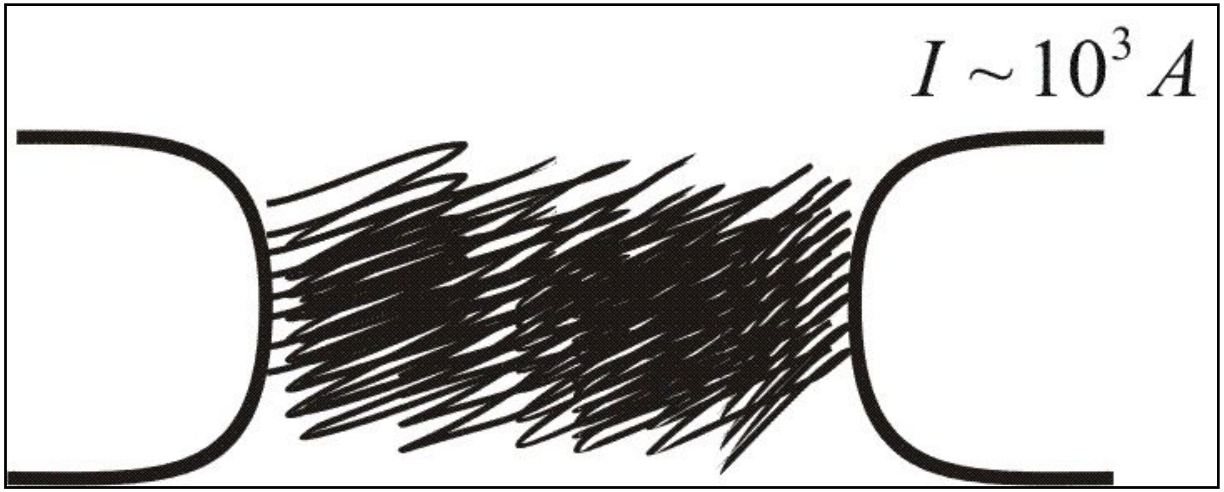
Характерная форма путей разрядов

Дуговой разряд

- <u>Дуговой разряд (или вольтова дуга).</u>

Непрерывна форма искрового разряда при близком расстоянии между электродами переходит в стационарную форму.

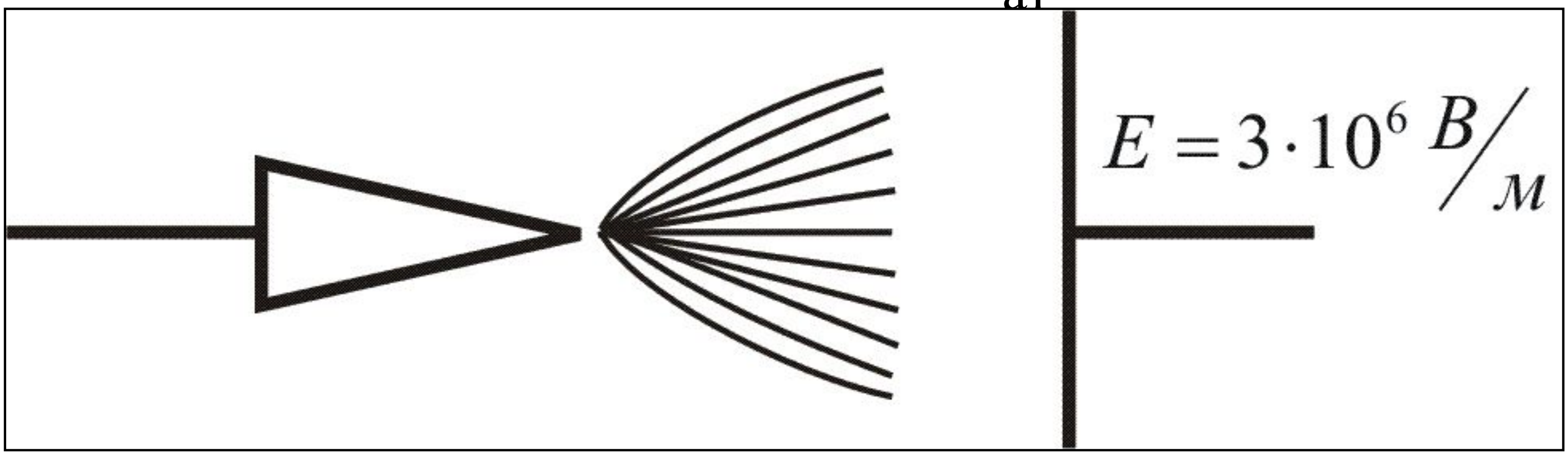
- $P_{ат}$
- U=50-100 В
- I = 100 А



Коронный разряд

- Коронный разряд возникает в сильном неоднородном электрическом поле при сравнительно высоких давлениях газа (порядка атмосферного).
- Такое поле можно получить между двумя электродами, поверхность одного из которых обладает большой кривизной (тонкая проволочка, острие).

$P_{ат}$



- Когда электрическое поле вблизи электрода с большой кривизной достигает примерно $3 \cdot 10^6$ В/м, вокруг него возникает свечение, имеющее вид оболочки или короны, откуда и произошло название заряда.

Электростатические аналогии

Перенос заряда – дифференциальный закон Ома:

$$\boxed{j = -\sigma \operatorname{grad}\varphi}$$

Диффузия– закон Фика:

$$\boxed{J = -D \operatorname{grad} n}$$

Теплопроводность –закон Фурье:

$$\boxed{q = -\chi \operatorname{grad} T}$$

Электростатические аналогии

Задача: Найти потенциал заряженного шара (заряд Q) радиуса и заряда R:

Определение потенциала: $$\boxed{E = -\mathrm{grad}\varphi}$$

Теорема Гаусса: $$\boxed{4\pi r^2 E = \frac{Q}{\varepsilon\varepsilon_0}} \Rightarrow E = \frac{Q}{4\pi r^2 \varepsilon\varepsilon_0}$$

Из определения потенциала: $$\boxed{\varphi = \int_R^\infty E dr = \frac{Q}{4\pi R\varepsilon\varepsilon_0}}$$

Емкость: $$C = 4\pi R\varepsilon\varepsilon_0$$

Электростатические аналогии

Задача: Шар радиуса R в проводящей среде (проводимость среды - σ), через него идет полный ток I. Найти потенциал шара.

Закон Ома: $\boxed{j = \sigma E}$

Закон сохранения заряда : $\boxed{4\pi r^2 j = I}$ $\Rightarrow$ $E = \dfrac{I}{4\pi r^2 \sigma}$

Из определения потенциала: $\boxed{\varphi = \int_R^\infty E dr = \dfrac{I}{4\pi R \sigma}}$

Сопротивление : $R_{\Omega} = \dfrac{1}{4\pi R \sigma}$

Электростатические аналогии

Задача: Шар радиуса R помещен в среду теплопроводности χ с температурой T_0. Шар разогревается с мощностью W. Найти установившуюся температуру шара.

Закон Фурье: $\boxed{q = -\chi \,\mathrm{grad} T}$

Закон сохранение энергии: $\boxed{4\pi r^2 q = W}$ $\Rightarrow$ $q = \dfrac{W}{4\pi r^2}$

Из закона Фурье: $\boxed{T - T_0 = \dfrac{1}{\chi}\displaystyle\int_R^\infty q\,dr = \dfrac{W}{4\pi R\chi}}$

Тепловое сопротивление (термин условный): $R_{Heat} = \dfrac{1}{4\pi R\chi}$

Электростатические аналогии

Задача: Пусть в чистой воде медленно растворяется сахарный шар радиуса R. Концентрация сахара на поверхности шара c_R. Найти полный молярный поток растворения шара

Закон Фика: $$\boxed{j = -D\,\mathrm{grad}(c)}$$

Закон сохранения вещества: $$\boxed{4\pi r^2 j = J} \Rightarrow j = \frac{J}{4\pi r^2}$$

Из закона Фика: $$\boxed{c_R = \frac{1}{D}\int_R^\infty j\,dr = \frac{J}{4\pi RD}}$$

Полный поток растворения : $$J = 4\pi RDc_R$$

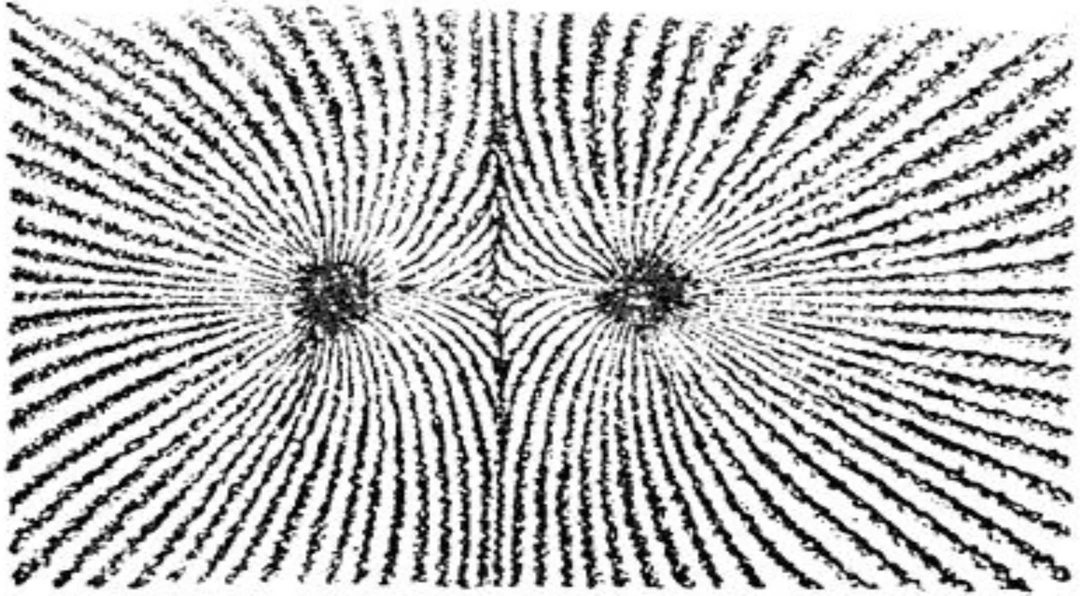
Электростатические аналогии. Выводы:

- Сходные уравнения в сходной геометрии - сходные решения.
- Закон сохранения вещества для потоков, закон сохранения зарядов для токов и теорема Гаусса это аналогичные законы.

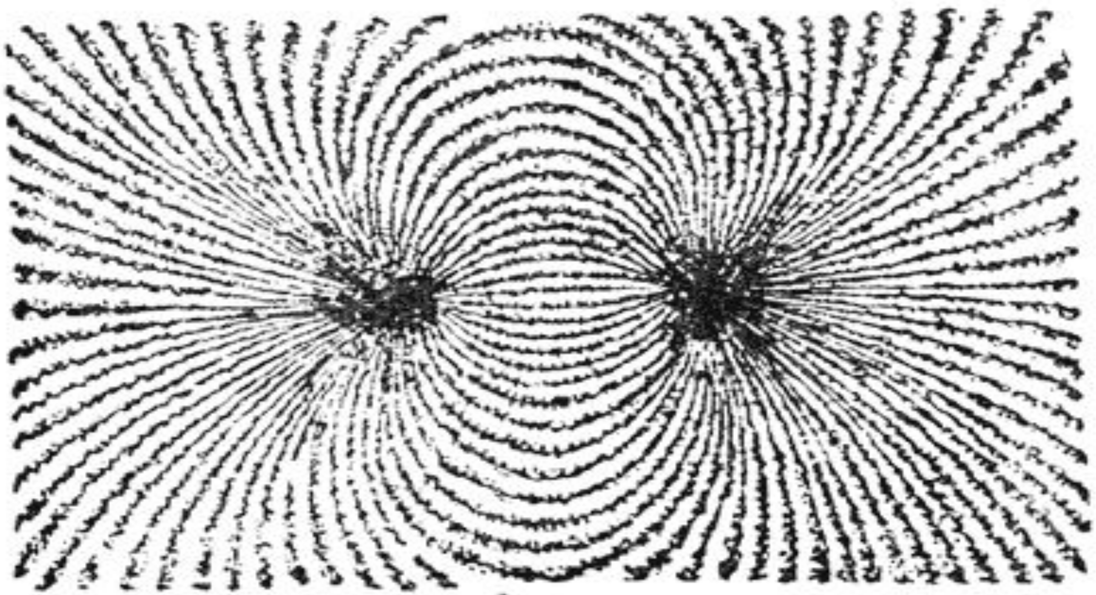
Магнитное поле

Изобретение Компаса

Han Dynasty (206 BC–220 AD)

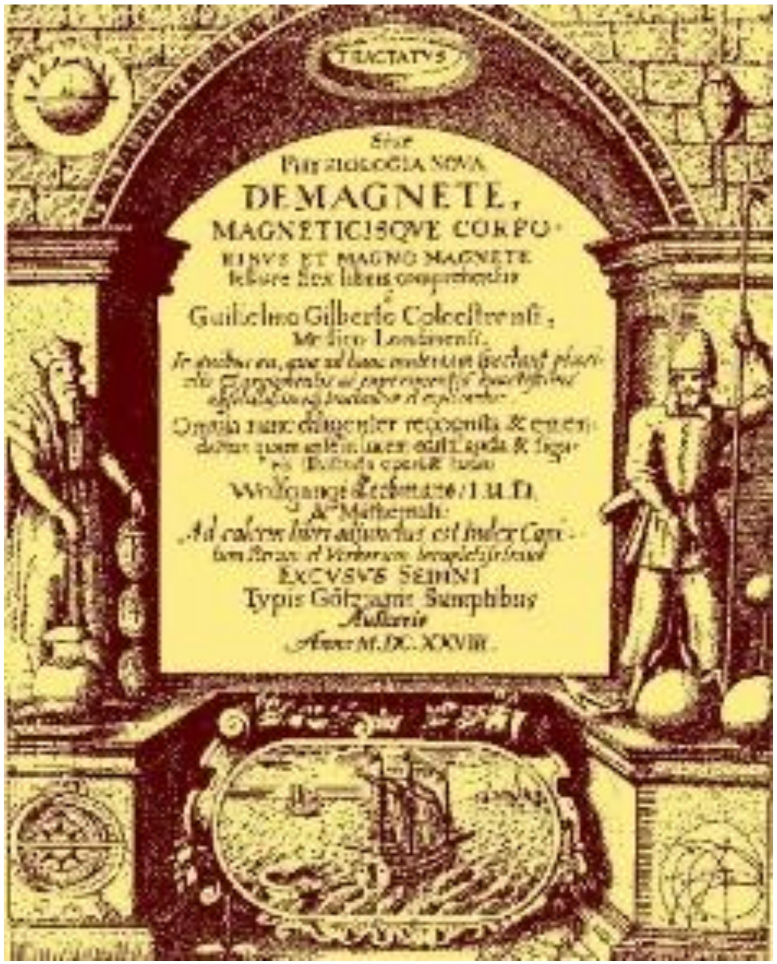


Магнитное поле одноименных полюсов.

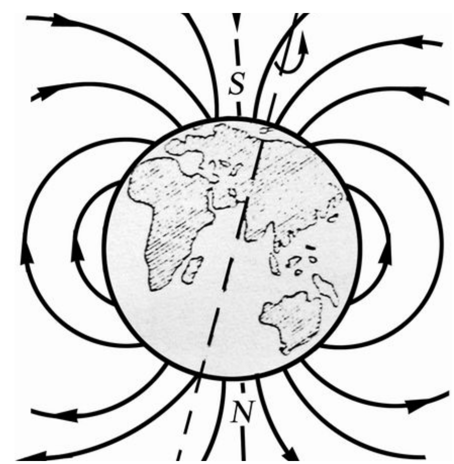


Магнитное поле разноименных полюсов.

«О магните, магнитных телах и большом магните – Земле»



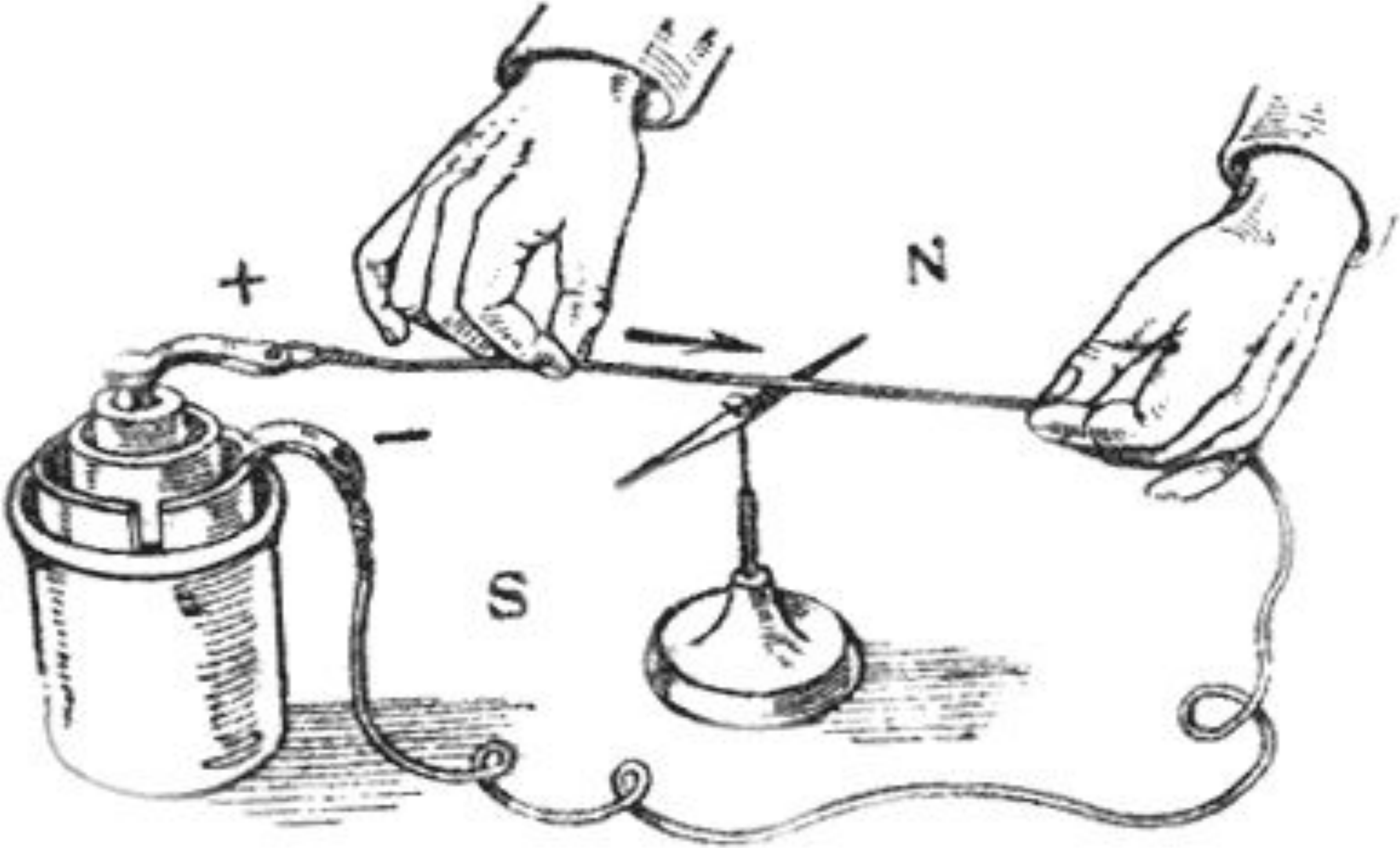
William Gilbert 1544 -1603



•

Hans Christian Ørsted,1777-1851

André-Marie Ampère; 1775-1836



Опыт Эрстеда.

Полная сила, действующая на заряд

$$\boxed{\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}\vec{B}]}$$

Полная электромагнитная сила действующая на заряд – <u>сила Лоренца</u>

$\vec{B}$ - Индукция магнитного поля [Тл]

Hendrik Antoon Lorentz;
1853-1928

Некоторые значения магнитной индукции

- Магнитное поле Земли в Европе – 2*10^{-5} Тл
- Магнитное поле Земли максимальное – 7*10^{-5} Тл
- Магнитное поле стрелок компаса – 0,01 Тл
- Магнитное поле подковообразного магнита – до 0,2 Тл
- Магнитное поле солнечных пятен – 0,4 Тл
- Магнитное поле ферромагнитного сердечника – до 1 Тл
- Магнитное поле в ускорителе – до 10 Тл
- Магнитное поле нейтронных звезд - 10^6 Тл
- Магнитное поле звезд типа «Магнетар» - 10^{11} Тл

Свойства магнитного поля, действующего на заряды

$$\boxed{\vec{F} = q[\vec{v}\vec{B}]}$$

- Сила пропорциональна скорости
- Сила имеет релятивистскую природу
- Не совершает работы
- Направление определяется правилом буравчика

Сила Ампера

$$\boxed{\vec{F} = q[\vec{v}\vec{B}]}$$ - сила, действующая на один заряд

$$\Delta\vec{F} = (n\Delta V)q[\vec{v}\vec{B}]$$ - сила, действующая на объем проводника

$$\vec{j} = nq\vec{v}$$ -плотность тока

$$\Delta\vec{F} = [\vec{j}\vec{B}]\Delta V$$ - сила, действующая на объем проводника

$$\Delta V = \Delta LS$$ - объем проводника

$$\boxed{d\vec{F} = I[d\vec{l}\vec{B}]}$$ <u>- Сила Ампера</u>, действующая линейный проводник с током

Вопросы

1)Какая «противосила» у силы Лоренца?

2)Совершает ли работу сила Ампера?

- За счет каких сил?
- За счет какой энергии?

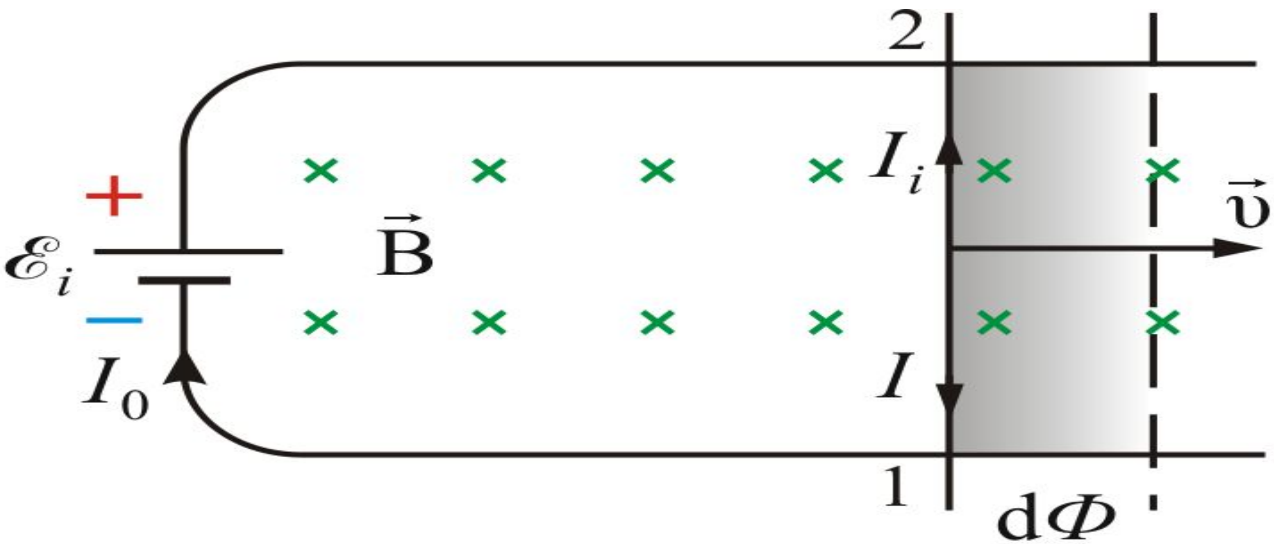
Свойства силы Ампера

$$\boxed{d\vec{F} = I[d\vec{l}\vec{B}]}$$

- Сила пропорциональна электрическому току
- Не зависит от природы и знаков зарядов, движение которых образует ток
- Может совершать работу
- Направление определяется правилом буравчика
- Является следствием силы Лоренца

Величина ЭДС индукции

- Рассмотрим перемещение подвижного участка 1 – 2 контура с током в магнитном поле



Величина ЭДС индукции

- Пусть сначала магнитное поле отсутствует.
- Батарея с ЭДС равной E_0 создает ток I_0 .
- *З*а время d*t*, батарея совершает работу:

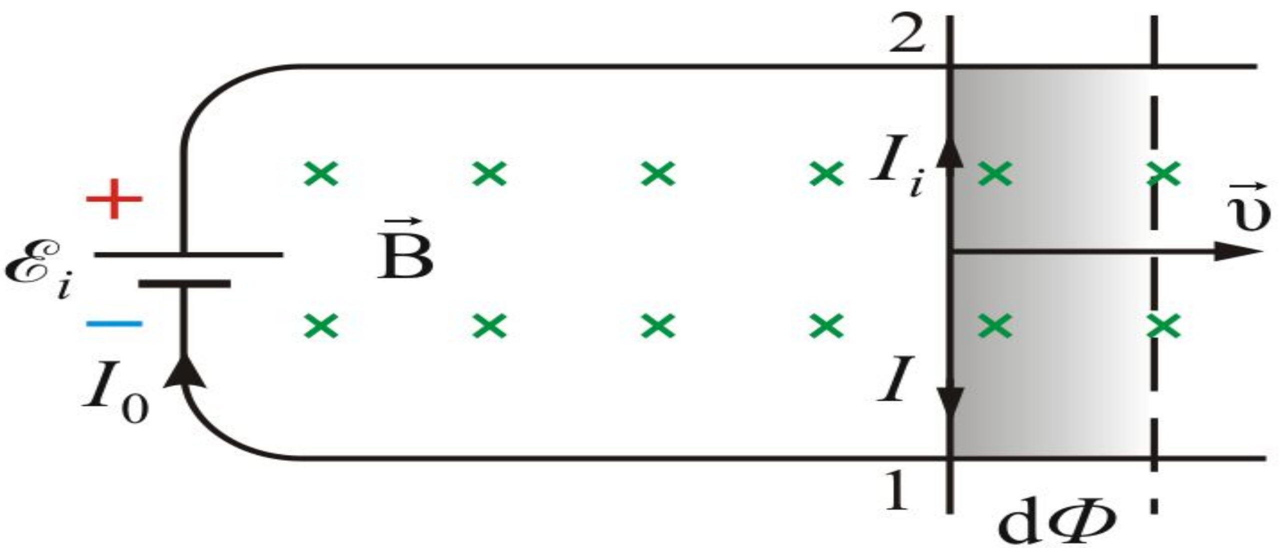
$$\mathbf{dA} = \mathcal{E}_0\,\mathbf{I_0 dt}$$

- – эта работа будет переходить в тепло которое можно найти по закону Джоуля:

$$\mathbf{Q = dA} = \mathcal{E}_0\mathbf{I_0 dt = I_0^2 Rdt,}$$

Величина ЭДС индукции

- Поместим контур в однородное магнитное поле с индукцией $\vec{B}$.
- Линии параллельны $\vec{n}$ и связаны $\vec{B}$ с направлением тока «правилом буравчика».



Величина ЭДС индукции

- Каждый элемент контура испытывает механическую силу $d\vec{F}$
- Подвижная сторона рамки будет испытывать силу $\vec{F}_0$.
- Под действием этой силы участок 1 – 2 будет перемещаться со скоростью $\upsilon = dx/dt$.
- При этом изменится и поток магнитной индукции.
- Тогда в результате электромагнитной индукции, ток в контуре изменится и станет равным

$$\boxed{I = I_0 - I_i.}$$

Величина ЭДС индукции

- Изменится и сила $\vec{\mathbf{F}}_0$, которая теперь станет равна $\vec{\mathbf{F}}$– результирующая сила. Эта сила за время d*t* произведет работу d*A:*
- Как и в случае, когда все элементы рамки неподвижны, источником работы является ЭДС батареи!
-

$$\boxed{\mathrm{d}A = F\mathrm{d}x = ILBdx = I\mathrm{d}\Phi \quad .}$$

Величина ЭДС индукции

- При неподвижном контуре эта работа сводилась только лишь к выделению тепла.
- При изменении магнитного потока тепло тоже будет выделяться, но уже в другом количестве, так как ток изменился.
- Кроме того, совершается механическая работа.
- Общая работа за время d*t*, равна:

$$\boxed{\mathcal{E}_0 I dt = I^2 R dt + I d\Phi \quad .}$$

Величина ЭДС индукции

- Отсюда:

$$I = \frac{E_{o} - \dfrac{d\Phi}{dt}}{R}$$

- Полученное выражение это фактически закон Ома для контура, в котором кроме источника действует ЭДС индукции , которая равна:

$$\boxed{E_i = -\frac{d\Phi}{dt}.}$$

- ЭДС индукции контура равна скорости изменения потока магнитной индукции, пронизывающей этот контур.

Выводы

- Сила Ампера совершает работу за счет ЭДС источника тока.
- При этом в проводнике появляется ЭДС индукции, которая уменьшает ток.
- Можно говорить, что ЭДС индукции является следствием закона сохранения энергии

Циркуляция вектора напряженности вихревого электрического поля

- Работу вихревого электрического поля по перемещению заряда вдоль замкнутого контура L можно подсчитать по формуле

$$\mathbf{d}A = q\oint_L \vec{\mathbf{E}}'\mathbf{d}\vec{\mathbf{l}}.$$

- Работа по перемещению единичного заряда вдоль замкнутой цепи равна ЭДС, действующей в этой цепи:

$$\mathrm{d}A = E_i$$

- Следовательно:

$$\boxed{\oint_L \vec{\mathbf{E}}'\mathbf{d}\vec{\mathbf{l}} = -\frac{\mathbf{d}\varPhi}{\mathbf{d}t}.}$$

Оператор rot

$$\boxed{\operatorname{rot}\vec{B} = [\nabla \vec{B}]}$$

- определение через оператор Набла

$$\operatorname{rot}\vec{B} = \begin{vmatrix} \mathrm{i} & \mathrm{j} & \mathrm{k} \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z} \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} = \mu_0 \vec{\mathrm{j}}$$

$$\boxed{\operatorname{rot}\operatorname{rot}\vec{B} = grad(div\,\vec{B}) - \Delta\vec{B}}$$

Очень полезная формула

Оператор rot

$$(\mathrm{rot}\vec{F})_n = \lim_{S \to 0} \frac{\oint_L \vec{F} d\vec{r}}{S}$$

n – единичный вектор нормальный контуру L
S – площадь контура

(NB!) Направление обхода контура выбирается так чтобы, если смотреть в направлении **n** , контур **L** обходился по часовой стрелке

Основные уравнения магнитостатики

- Основные уравнения магнитостатики для магнитных полей, созданных постоянными потоками зарядов:

$$\oint_S \vec{B}d\vec{s} = 0 \qquad \operatorname{div}\vec{B} = 0$$

$$\oint_l \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \sum_i I_i \qquad \operatorname{rot}\vec{B} = \mu_0 \vec{j}$$

$$\boxed{\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \text{Гн/м}}$$