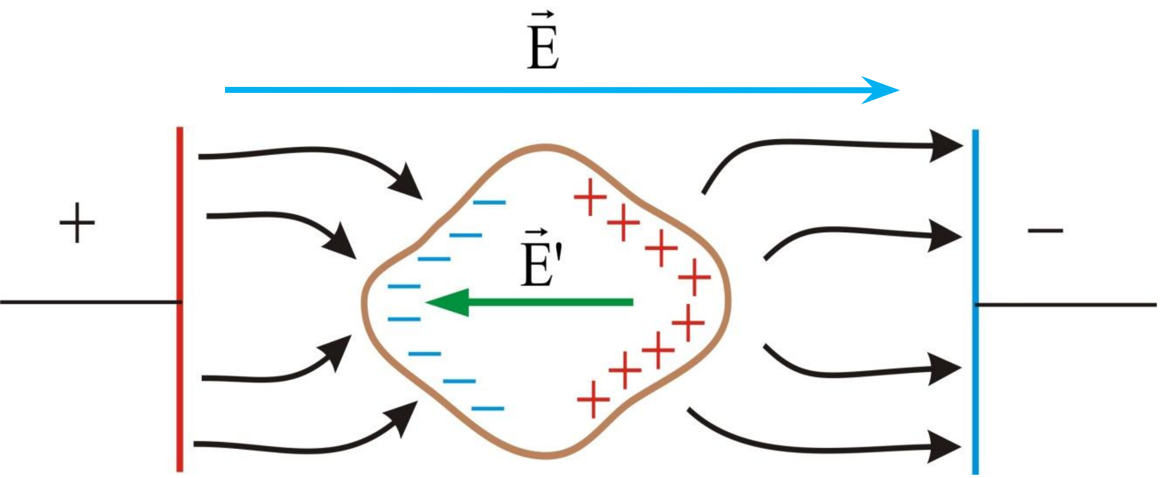
Лекция 4-2020. Электрическое поле заряженных проводников. Энергия электростатического поля.

1 Поле вблизи поверхности проводника
2 Электроемкость проводников и конденсаторов
3 Емкости плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов
4 Энергия системы неподвижных зарядов
5 Энергия заряженного проводника, конденсатора
6 Плотность энергии электростатического поля

Ироничные цитаты

Если бы не было электричества, мы бы смотрели телевизор в темноте.

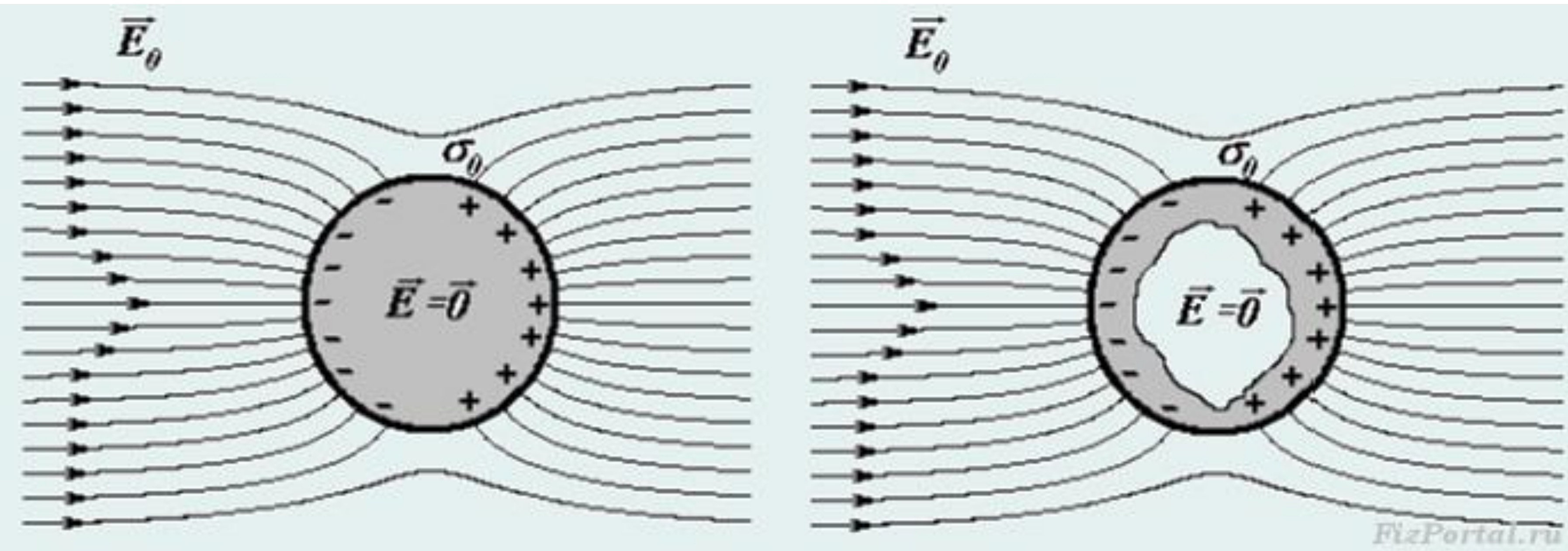
Муаммар аль-Каддафи



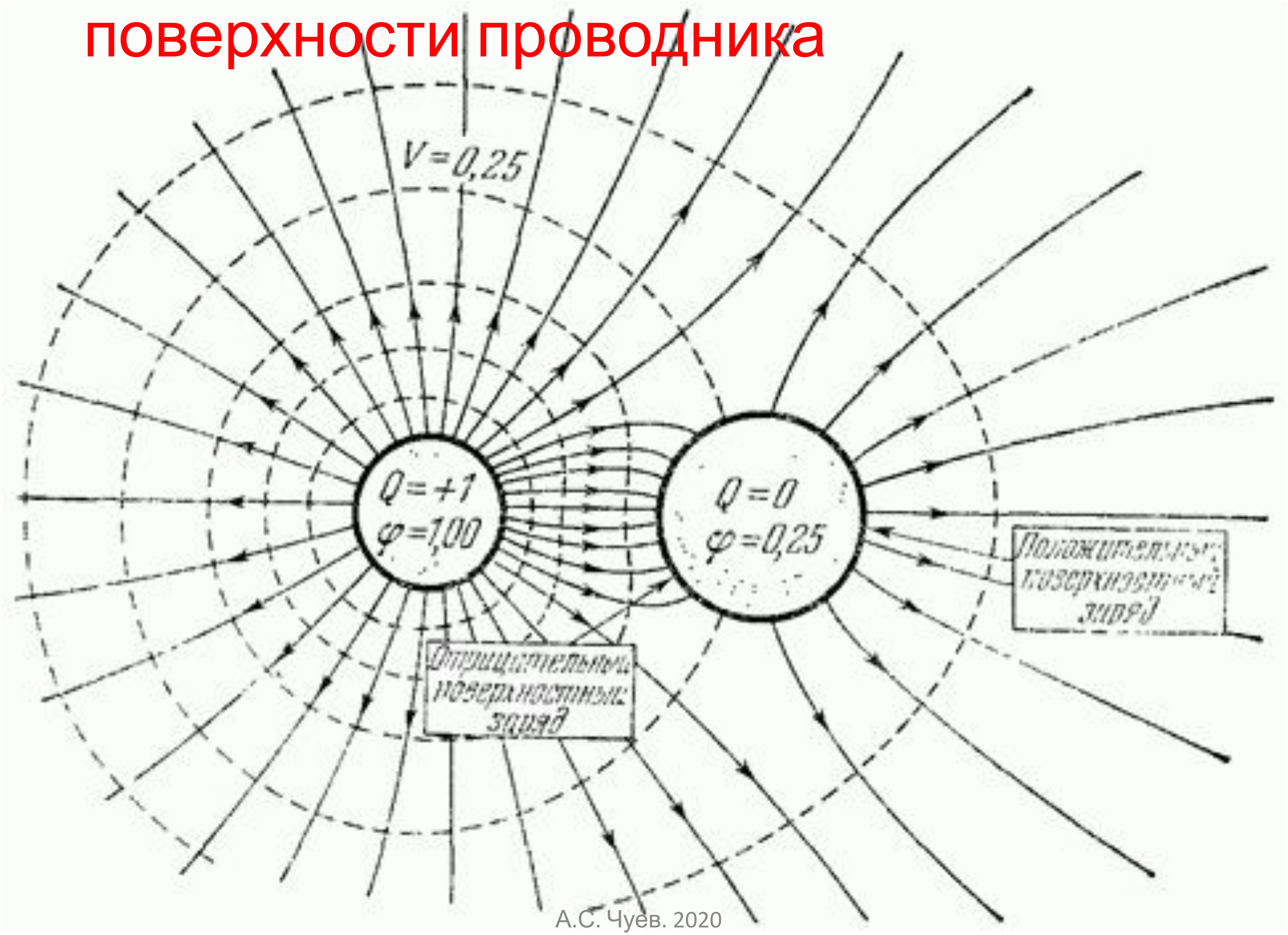
В установившимся состоянии в проводнике, помещенном в электростатическое поле мы имеем:

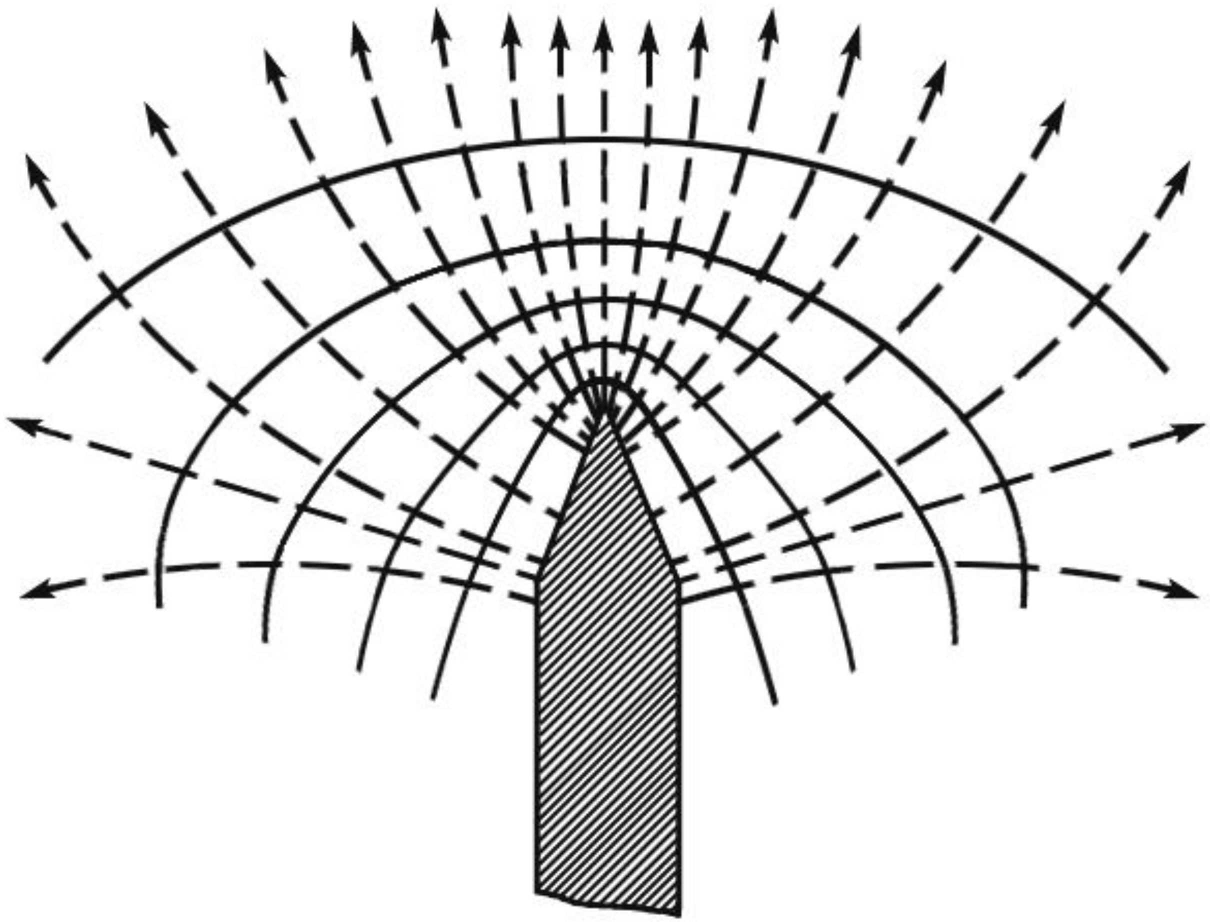
- Появление у заряженной поверхности на металле заряда противоположного знака – **электростатическая индукция**. Этот процесс очень краток ~ 10^{-8} секунд.
- **Электростатическое экранирование** – внутрь проводника поле не проникает.
- Во всех точках внутри проводника $\mathbf{E} = \mathbf{0}$, а во всех точках на поверхности $\mathbf{E} = \mathbf{E_n}$ $(\mathbf{E_\tau} = \mathbf{0})$;
- Весь объем проводника, находящегося в электростатическом поле **эквипотенциален**.

Внутри проводников поля нет

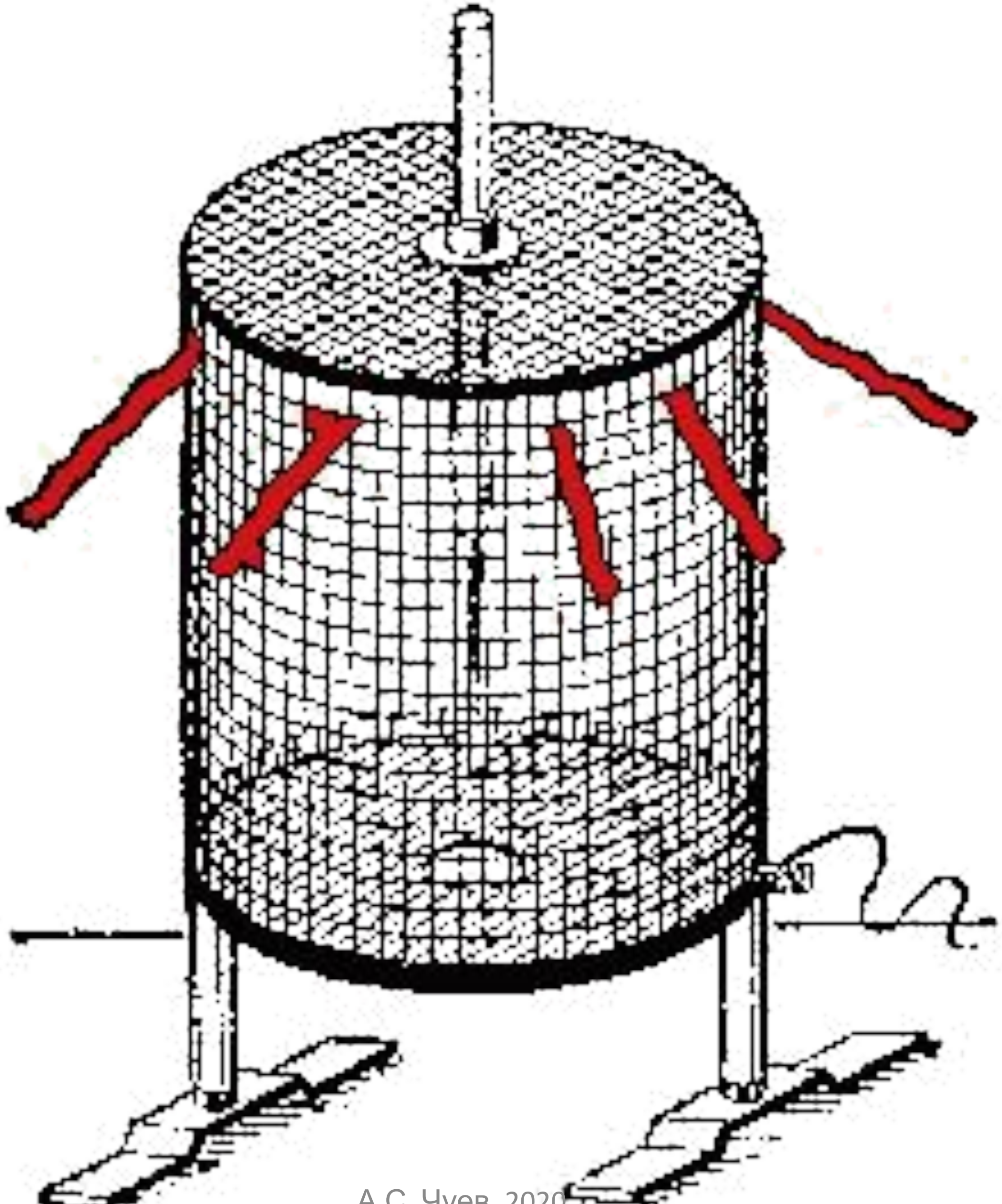


Поле вблизи на и вблизи поверхности проводника





Из рисунка видно, что напряженность электростатического поля *максимальна на острие* заряженного проводника.



Электрическая емкость. Конденсаторы.

При сообщении проводнику заряда, на его поверхности появляется потенциал φ. Если такой же заряд сообщить другому проводнику, то потенциал будет другой. Это зависит от геометрических параметров проводника. Но в любом случае, потенциал φ будет пропорционален заряду q.

$$\boldsymbol{q = C\varphi}$$

Коэффициент пропорциональности $\boldsymbol{C}$ есть ***электроемкость*** – *физическая величина, численно равная заряду, который необходимо сообщить проводнику для того, чтобы изменить его потенциал на единицу*.

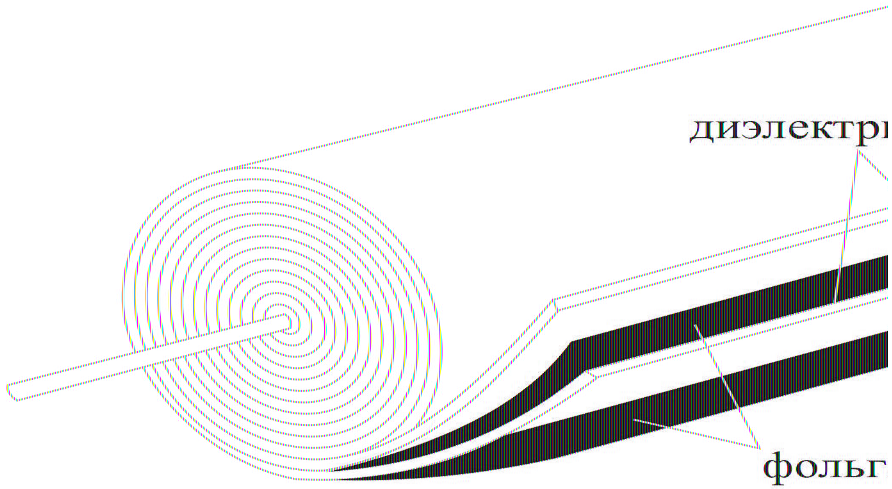
- Единица измерения емкости в СИ – фарада 1 Ф = 1Кл / 1В.
- Размерность емкости: определить самостоятельно.

Конденсатор – система двух разноименно заряженных проводников, разделенных диэлектриком

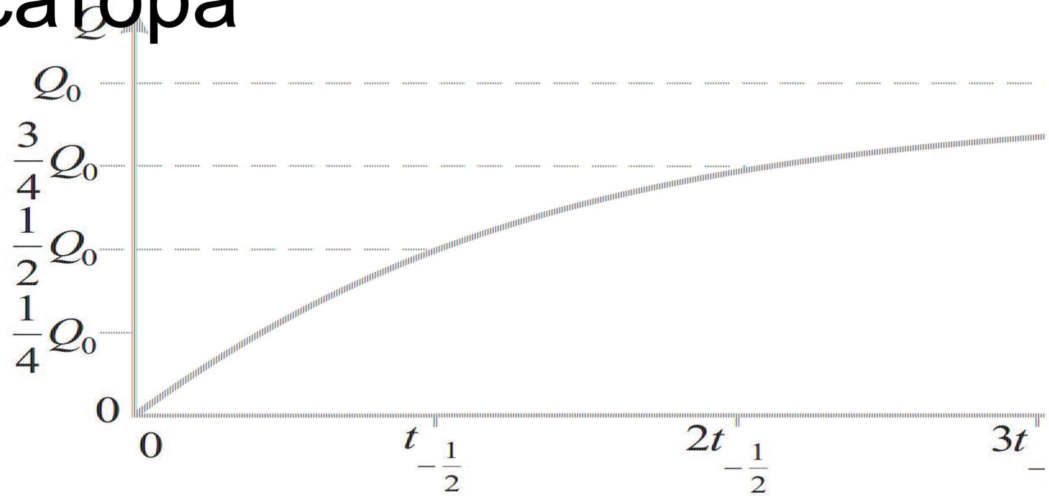
Типы конденсаторов

- постоянной и переменной емкости и различаются по роду диэлектрика между пластинами

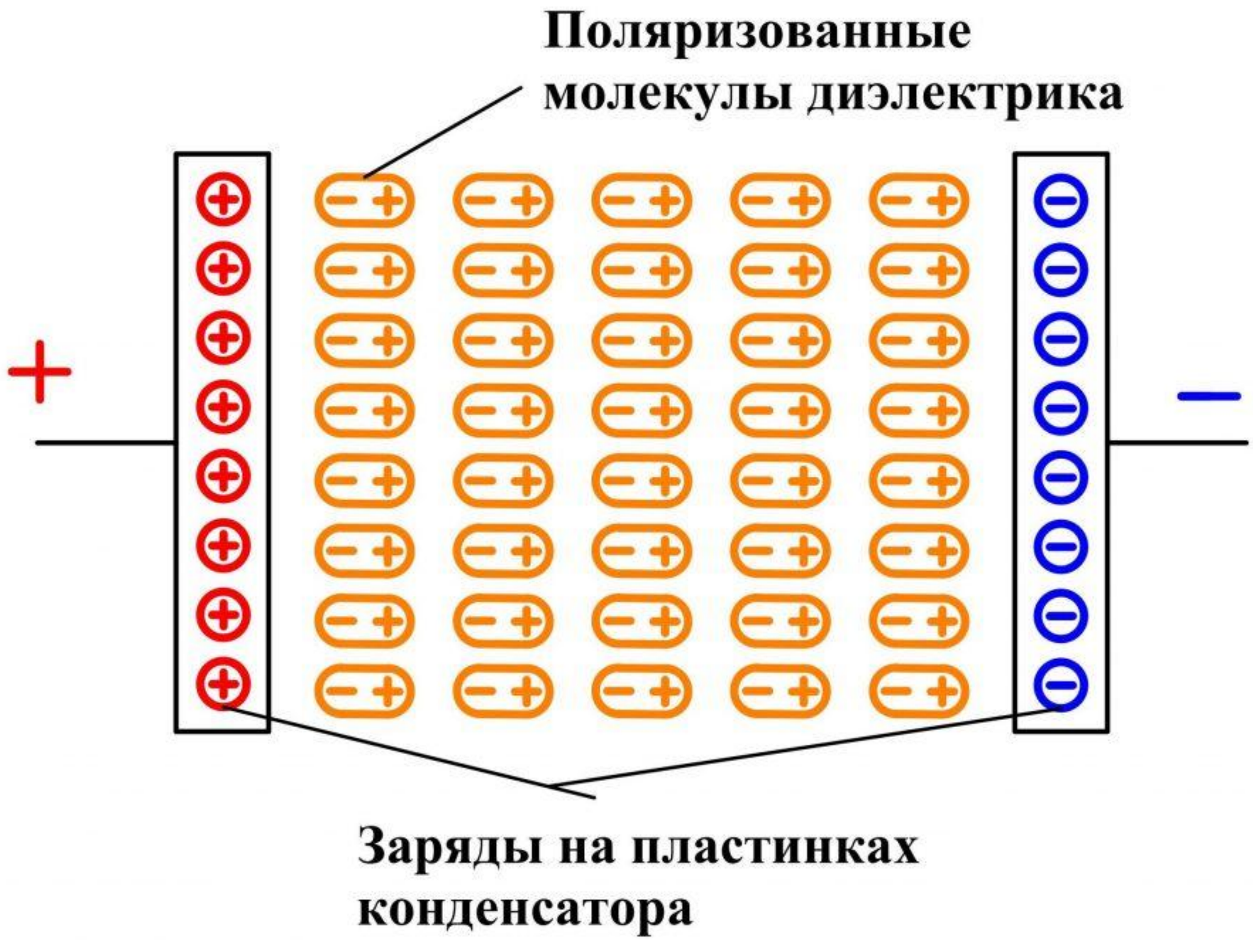
- бумажные, керамические, воздушные …



Переходной процесс заряда конденсатора



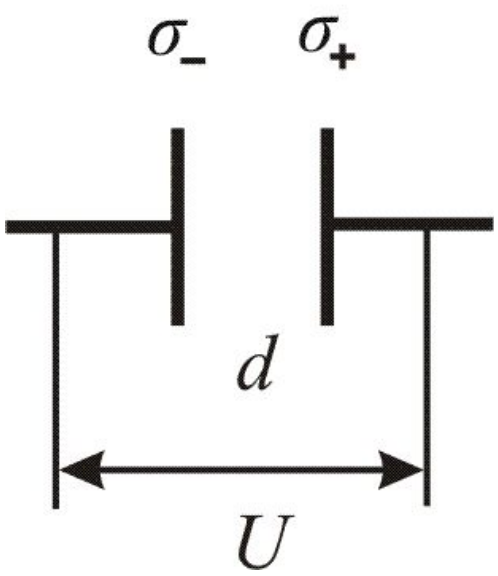
При помещении диэлектрика в электрическое поле он поляризуется



Расчет емкости различных конденсаторов

Емкость плоского конденсатора.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}; \qquad \varphi_1 - \varphi_2 = \int E \mathrm{d}x = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} d$$



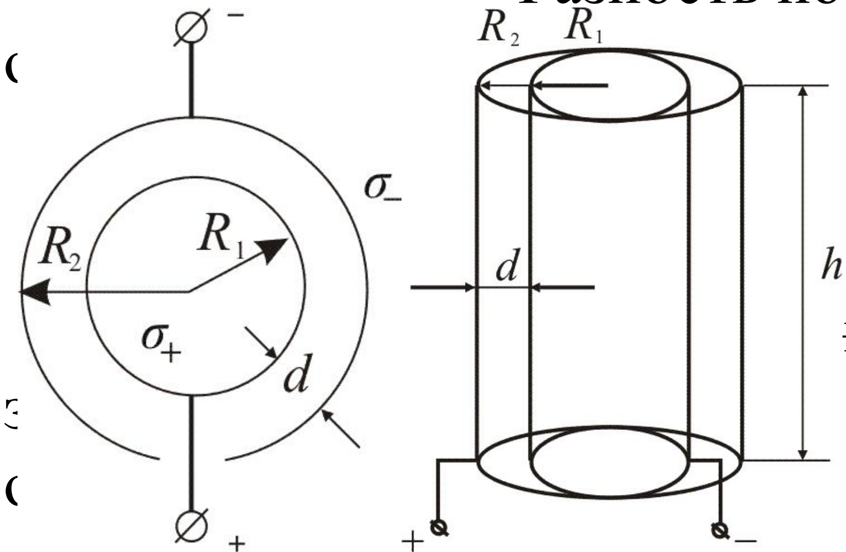
где d – расстояние между пластинами.
Так как заряд $q = \sigma S$, то

$$\boxed{C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d}}$$

Емкость цилиндрического конденсатора.

Разность потенциалов между

конденсатора



$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon}\ln\frac{R_2}{R_1}$$

ая плотност

цилиндрических

$q = \lambda l$, (l – длина конденсатора)

$$\lambda h = q$$

$$\boxed{C = \frac{q}{\Delta\varphi}}$$

$$\boxed{C_{цил.} = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon h}{\ln\frac{R_2}{R_1}}}$$

Далее вывод формулы

Вывод формулы цилиндрического конденсатора

$$E = \frac{1}{\varepsilon_0}\frac{\lambda}{2\pi r} \qquad \lambda = \frac{q}{h} \qquad E = \frac{1}{\varepsilon_0}\frac{q}{2\pi r h}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{R_1}^{R_2} E\,\mathrm{d}r = \int_{\mathrm{R}_1}^{\mathrm{R}_2} \frac{q\,\mathrm{d}r}{2\pi\varepsilon_0 r h} = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 h}\int_{R_1}^{R_2}\frac{\mathrm{d}r}{r};$$

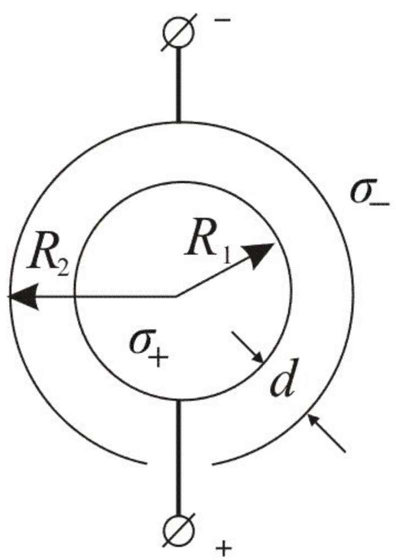
$$\boxed{\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\mathrm{q}}{2\pi\varepsilon_0 h}\ln\frac{R_2}{R_1}} \qquad \boxed{C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{2\pi\varepsilon_0 h}{\ln\dfrac{R_2}{R_1}}}$$

Если зазор между обкладками мал: $d = R_2 - R_1$, то $d << R_1$, тогда

$$\ln\frac{R_2}{R_1} \approx \frac{R_2 - R_1}{R_1} \qquad \boxed{C_{цил.} = \frac{2\pi\varepsilon_0 h R_1}{R_2 - R_1} = \varepsilon_0\frac{S}{d}}$$

Емкость сферического конденсатора

Разность потенциалов между обкладками сферического конденсатора, где R_1 и R_2 – радиусы радиусы сфер.



$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

$$\Delta\varphi = \frac{q}{C},$$

$$\boxed{C = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1}}$$

Далее вывод формулы

Вывод формулы сферического конденсатора (без учета диэлектрика)

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{R_1}^{R_2} E\mathrm{d}r = \int_{R_1}^{R_2} \frac{q\mathrm{d}r}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\int_{R_1}^{R_2}\frac{\mathrm{d}r}{r^2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right);$$

$$\boxed{C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{4\pi\varepsilon_0}{\dfrac{1}{R_1} - \dfrac{1}{R_2}};}$$

В тонком сферическом конденсаторе $R_1 \approx R_2$; $S = 4\pi R^2$; $R_2 - R_1 = d$ – расстояние между обкладками. Тогда

$$\mathrm{C}_{сфер.} = \frac{4\pi\varepsilon_0 R^2}{d} = \varepsilon_0 \frac{S}{d}.$$

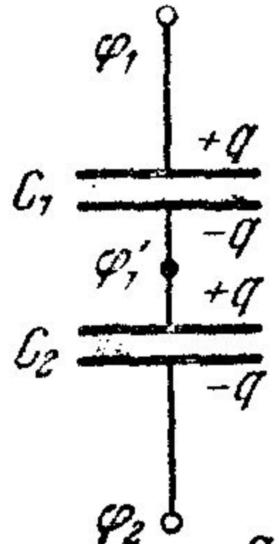
Таким образом, емкость тонкого сферического конденсатора,

$$\boxed{C_{\text{сфер.}} = \varepsilon_0 \frac{S}{d},}$$

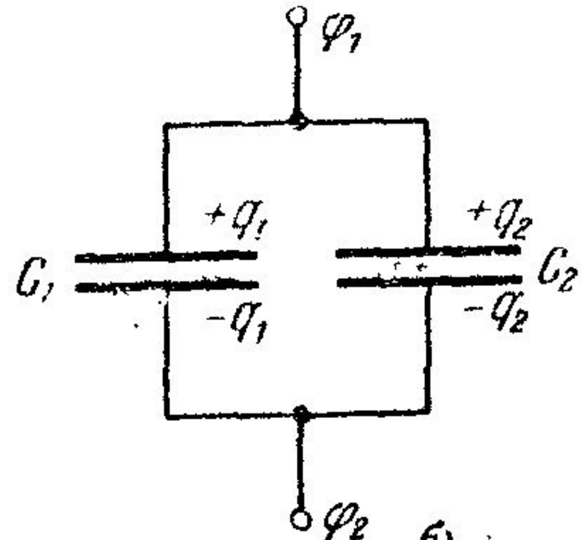
совпадает с формулой емкости плоского конденсатора.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$



а)



б)

$$C = C_1 + C_2.$$

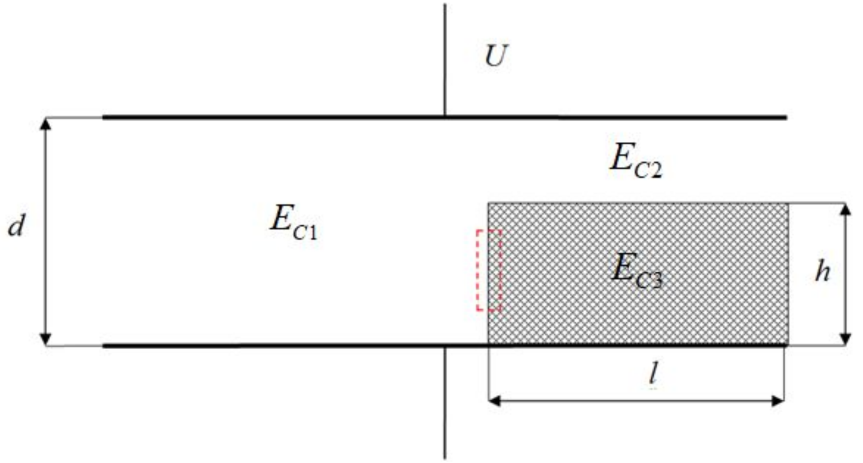
Тема для реферата по физике

Парадокс электростатики

$$U_{C1} = U$$

$$U_{C2} = U\frac{\varepsilon(d-h)}{\varepsilon(d-h)+h}$$

$$U_{C3} = U\frac{h}{\varepsilon(d-h)+h}$$



а)

$$E_{C1} = \frac{U}{d}$$

$$E_{C2} = \frac{\varepsilon U}{\varepsilon(d-h)+h}$$

$$E_{C3} = \frac{U}{\varepsilon(d-h)+h}$$

$$\boxed{\frac{E_{C2}}{E_{C1}} = \frac{\varepsilon d}{\varepsilon(d-h)+h}}$$

$$\frac{E_{C2}}{E_{C3}} = \varepsilon$$

$$\boxed{\frac{E_{C3}}{E_{C1}} = \frac{d}{\varepsilon(d-h)+h}}$$

б)

Энергия заряженного конденсатора

При полном разряде конденсатора, заряженного до напряжения U, между обкладками проходит заряд dq, при этом ***работа***

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

Работа равна убыли потенциальной энергии конденсатора:

$$\mathrm{d}A = -\,\mathrm{d}W.$$

Так как $q = CU$, то $\mathrm{d}A = CUdU$, а полная работа

$$\boxed{A = \int \mathrm{d}A.}$$

$$A = -W = C\int_U^0 U\mathrm{d}U = \frac{1}{2}CU^2$$

$$\boxed{W_c = \frac{CU^2}{2}}$$

Энергию конденсатора можно определить и по другим формулам:

$$\boxed{W_c = \frac{q^2}{2C} = \frac{1}{2}qU}$$

Энергия электростатического поля (в вакууме)

Носителем энергии в конденсаторе является электростатическое поле.

$$W=\frac{CU^2}{2}=\frac{\varepsilon_0 SU^2}{2d}\frac{d}{d}=\frac{\varepsilon_0}{2}\left(\frac{U}{d}\right)^2 Sd$$

$\frac{U}{d}=E;$ *Sd* = *V* – объем. Отсюда: $\boxed{W=\frac{\varepsilon_0 E^2}{2}V}$

Если поле **однородно**, то можно посчитать ***удельную энергию - w*:**

$$w = \frac{W}{V};$$

$$\boxed{w = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}}$$

Так как $D = \varepsilon_0 \varepsilon E$, то

$$\boxed{w = \frac{ED}{2}}$$

Формулы справедливы только для однородного поля.

Энергия системы неподвижных зарядов

Если поле создано двумя точечными зарядами q_1 и q_2, то

$$W_1 = q_1\varphi_{12} \qquad\qquad W_2 = q_2\varphi_{21}$$

Здесь φ_{12} – потенциал поля, создаваемого зарядом q_2 в точке, где расположен заряд q_1, φ_{21} – потенциал поля от заряда q_1 в точке с зарядом q_2.

Для вакуума можно записать

$$\varphi_{12} = \frac{q_2}{4\pi\varepsilon_0 r} \qquad \varphi_{21} = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

r – расстояние между зарядами.

Из двух последних систем уравнений следует, что

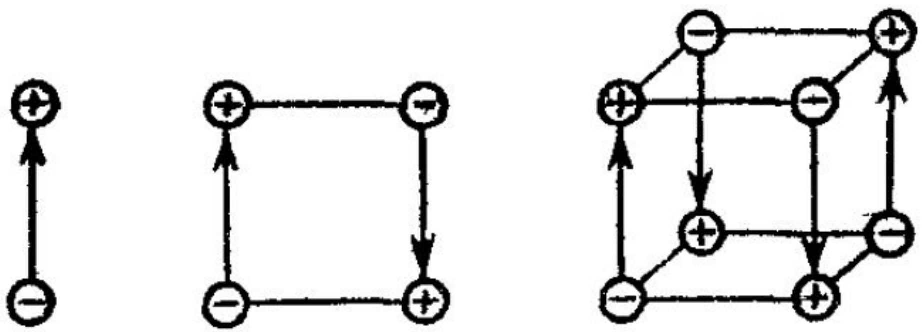
$$W_1 = W_2 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r} = W \qquad W = \frac{1}{2}W_1 + \frac{1}{2}W_2 = \frac{1}{2}(q_1\varphi_{12} + q_2\varphi_{21}).$$

Энергия системы из N зарядов, :

$$\boxed{W = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N} q_i\varphi_i}$$

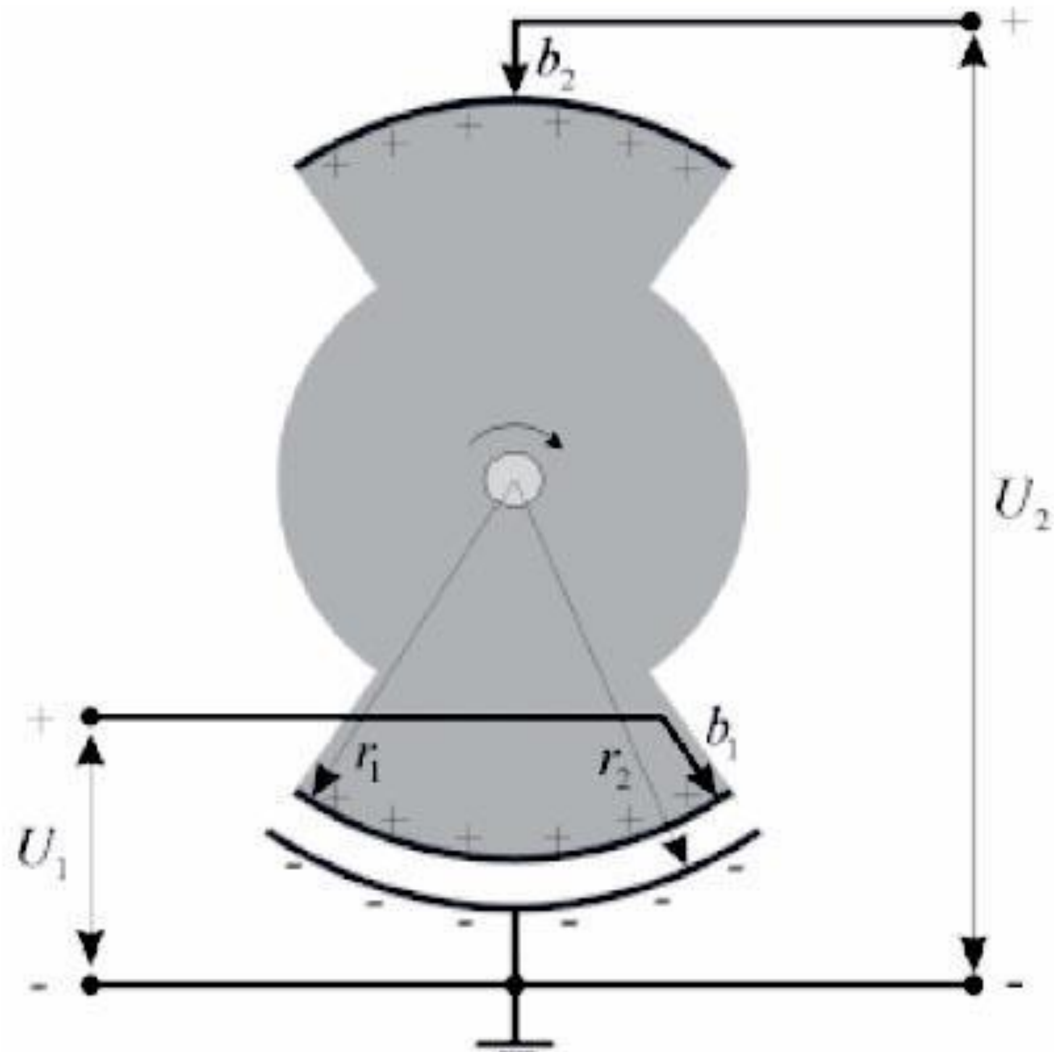
$\varphi_i = \sum_{k\neq i}\varphi_k$ – потенциал в точке, где расположен заряд q_i, создаваемый всеми остальными зарядами (кроме q_i).

Соединения конденсаторов - самостоятельно



Из двух диполей с противоположными по направлению дипольными моментами можно составить так называемый *квадруполь*. Его поле убывает обратно пропорционально четвертой степени расстояния. Из двух квадруполей можно составить *октуполь*, поле которого убывает как $\frac{1}{r^5}$.

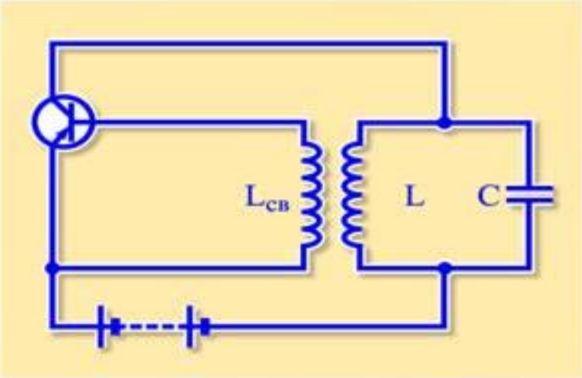
Емкостной генератор высоковольтного напряжения

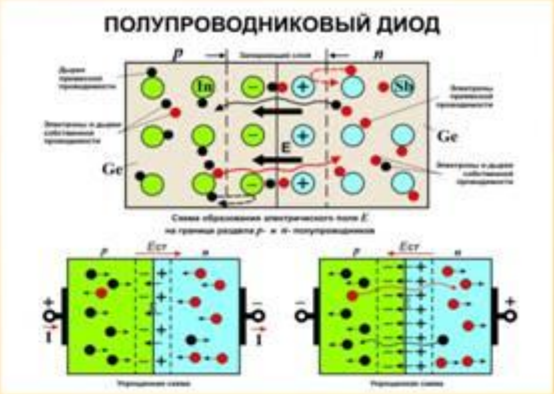


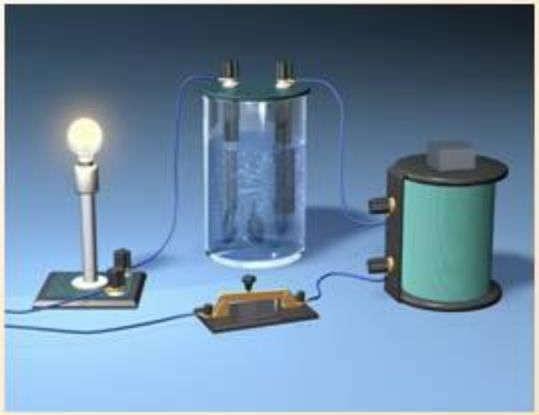
Тема «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК» (прорабатывается студентами самостоятельно)

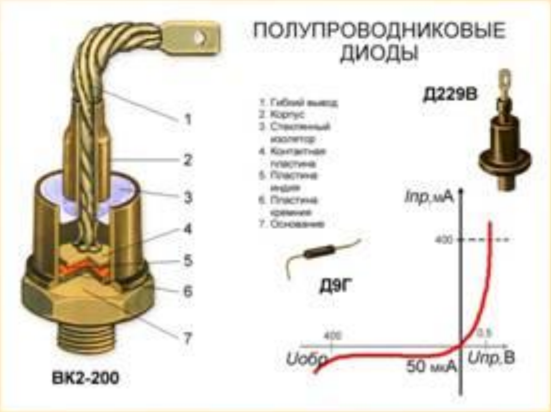
- Носители тока в средах
- Сила и плотность тока
- Уравнение непрерывности
- Электрическое поле в проводнике с током
- Сторонние силы
- Закон Ома и Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах

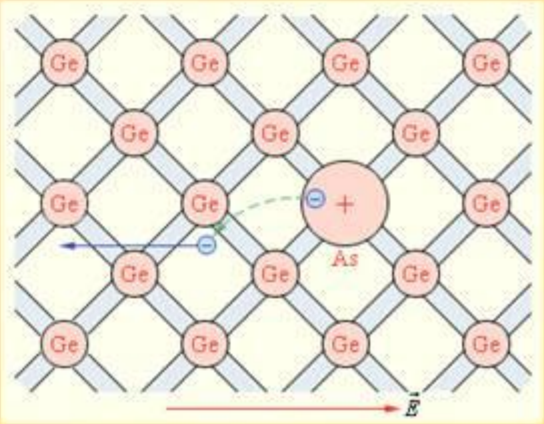
Ток в различных средах





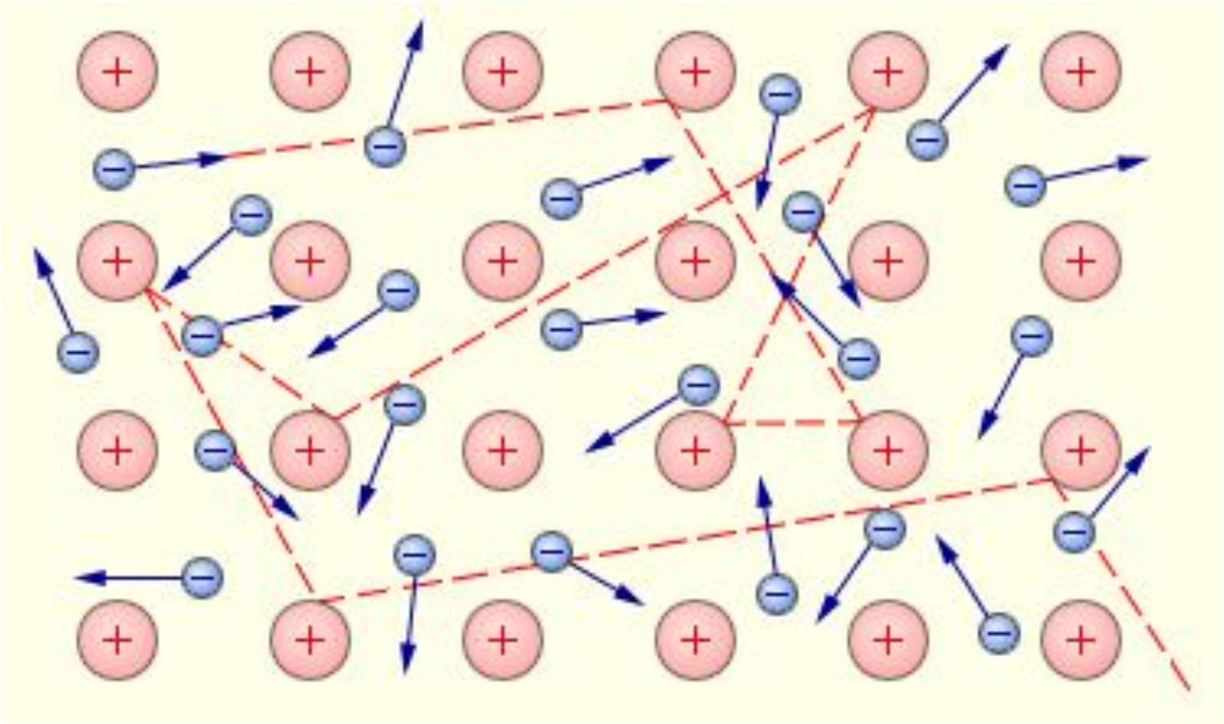


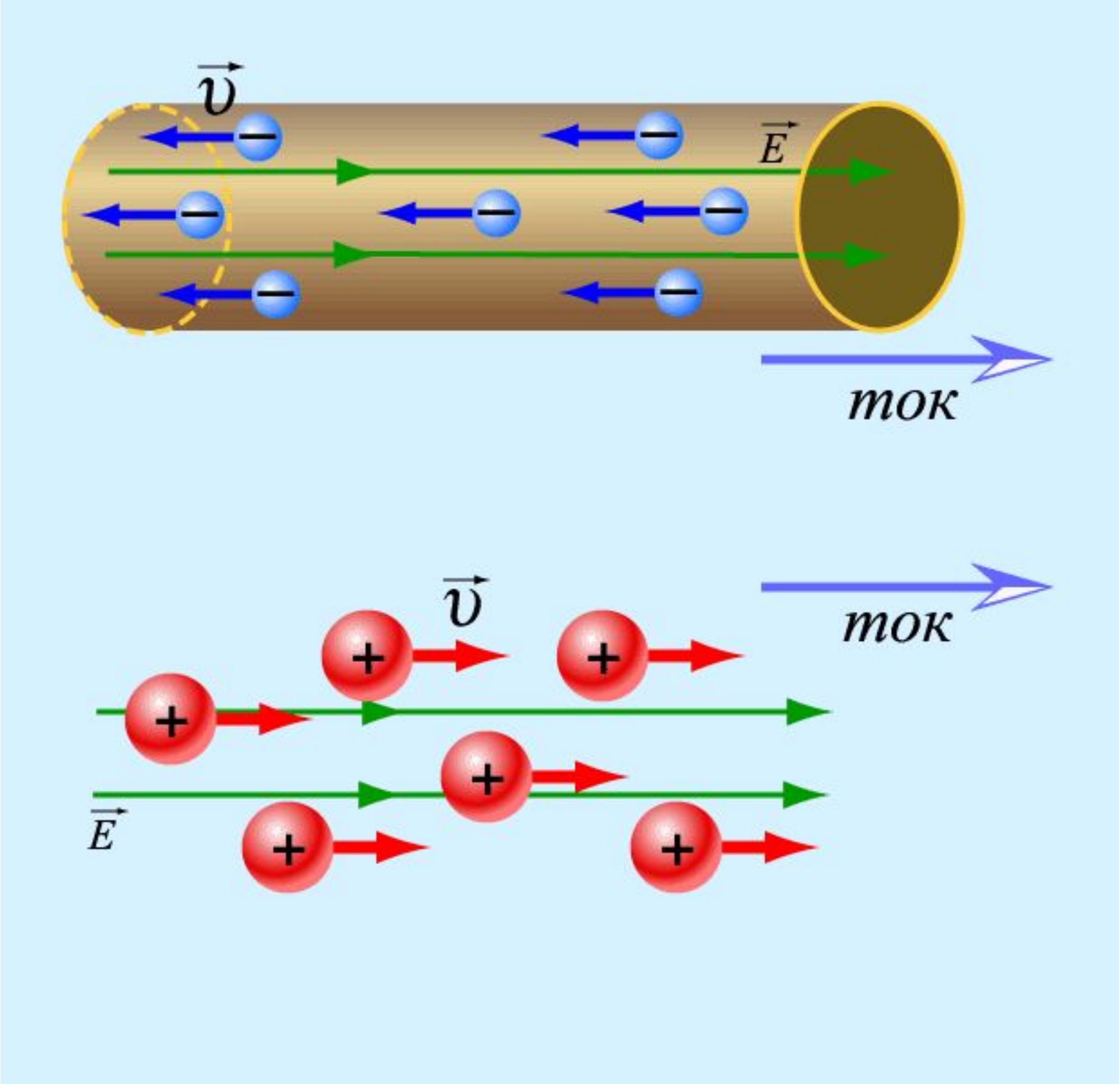




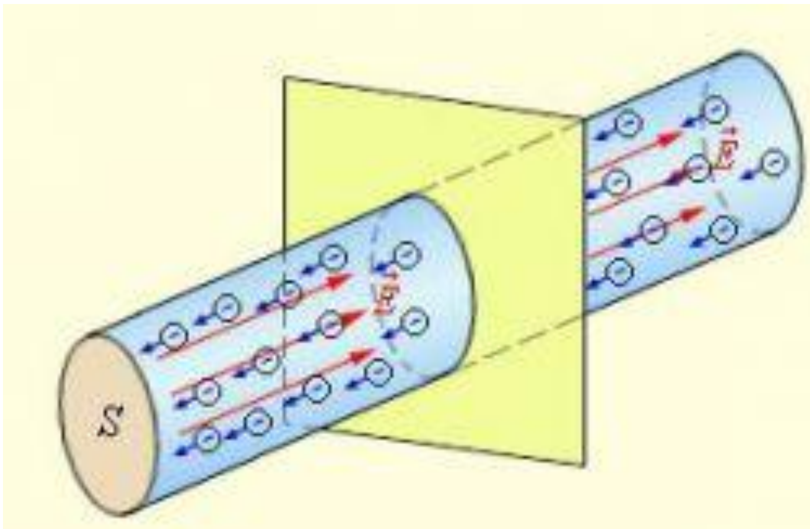
главная

Носители тока в средах.
Сила и плотность тока.




$\vec{\upsilon}$
$\vec{E}$
ток
$\vec{\upsilon}$
ток
$\vec{E}$

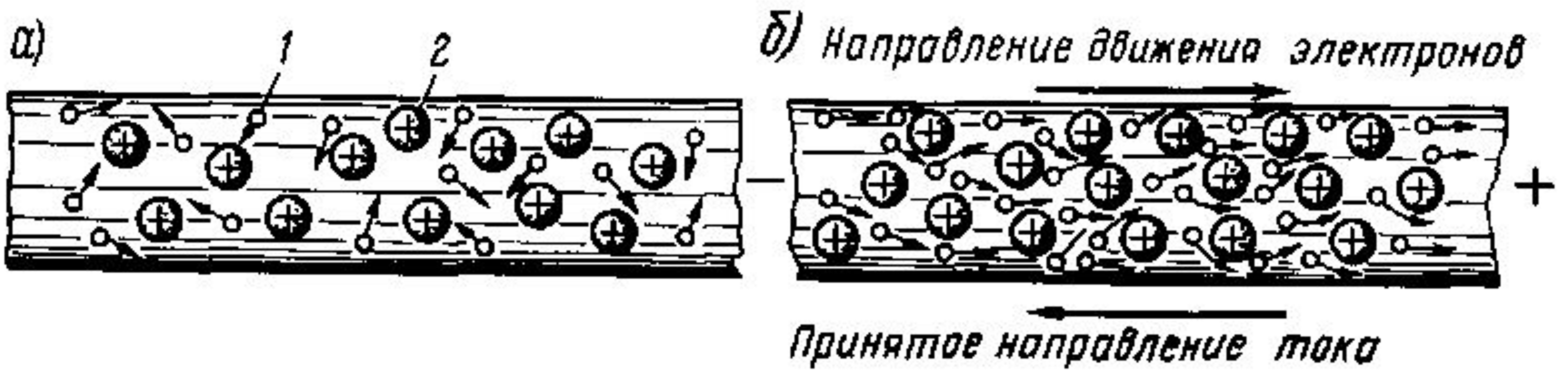
Электрическое поле в проводнике с током



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

$$j = I/S$$

$$\vec{j} = e\vec{\mathrm{v}}n$$



Уравнение непрерывности

$$\oint_{S} \vec{j}\,\partial\vec{S} = -\frac{\partial q}{\partial t}$$

Интегральная форма

$$\mathrm{div}\,\vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Дифференциальн ая форма

Закон Ома

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

С учетом, что $j = \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}S} = \frac{1}{\rho}E$

Получим

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

Это закон Ома в дифференциальной форме.

Здесь $\sigma = 1/\rho$ – *удельная электрическая проводимость.*

Сторонние силы

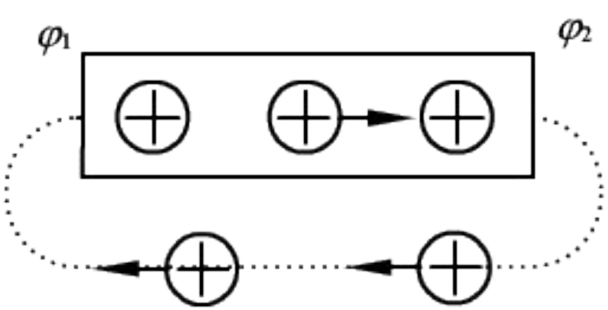
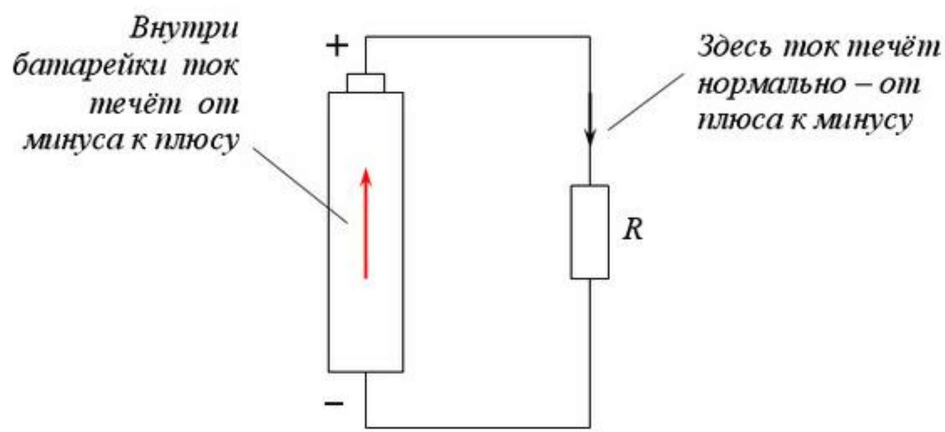


рис. 17.1



Работа и мощность тока. Закон Джоуля – Ленца

- Рассмотрим произвольный участок цепи, к концам которого приложено напряжение *U*. За время d*t* через каждое сечение проводника проходит заряд $\mathrm{d}q = I\mathrm{d}t.$
- При этом силы электрического поля, действующего на данном участке, совершают работу: $$\mathrm{d}A = U\mathrm{d}q = UI\mathrm{d}t.$$
- Общая работа: $\boxed{A = IUt = IRIt}$

Тепловая мощность тока в элементе проводника Δ*l*, сечением Δ*S*, объемом

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

равна:

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

Тепловая мощность тока

$$\Delta N = \vec{j}\vec{E}\Delta V$$

Удельная (по объему) мощность тока

$$n = \frac{\Delta N}{\Delta V} = \vec{j}\vec{E}$$

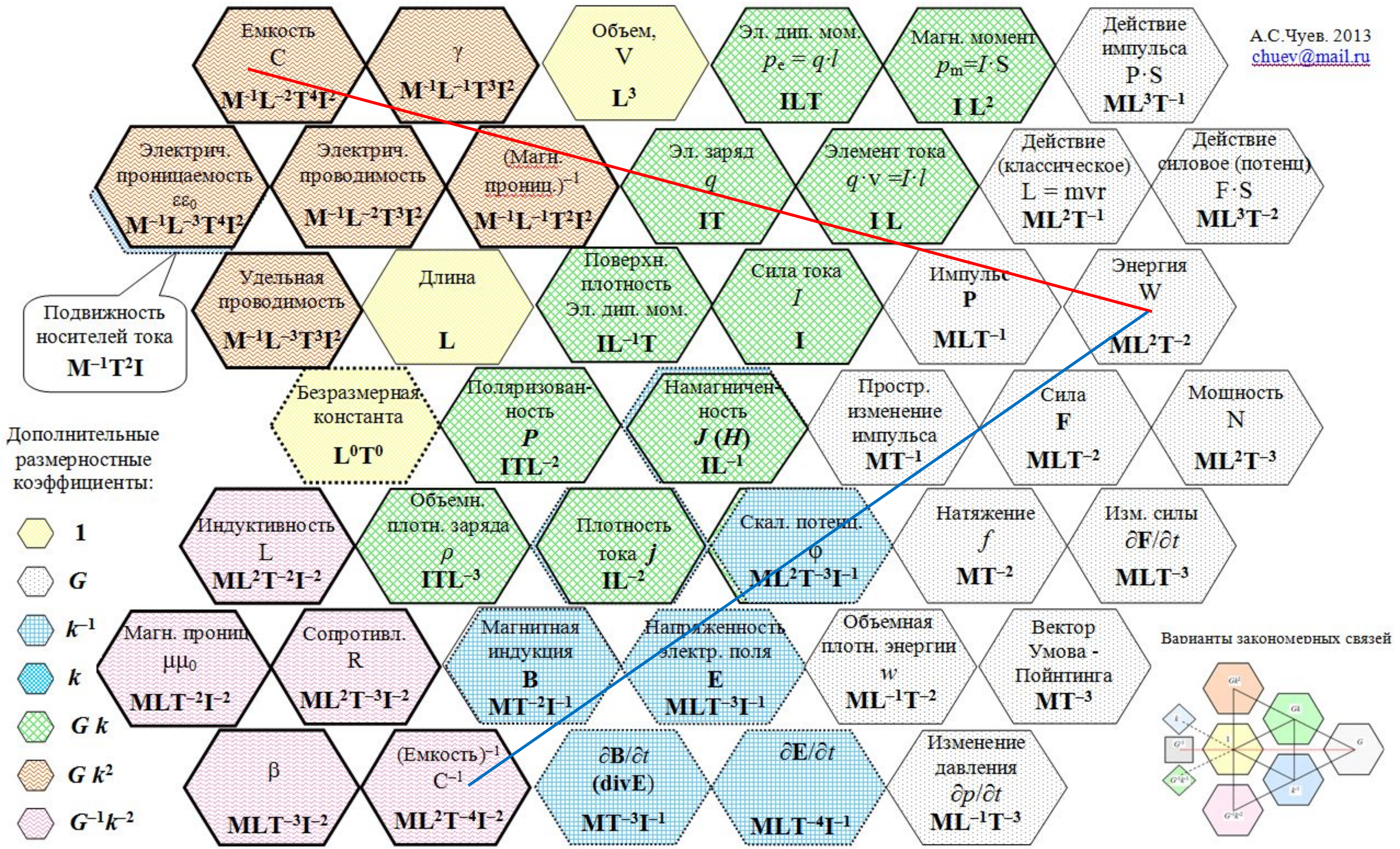
Используя закон Ома в дифф. форме

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

Получим дифф. форму закона Джоуля-Ленца

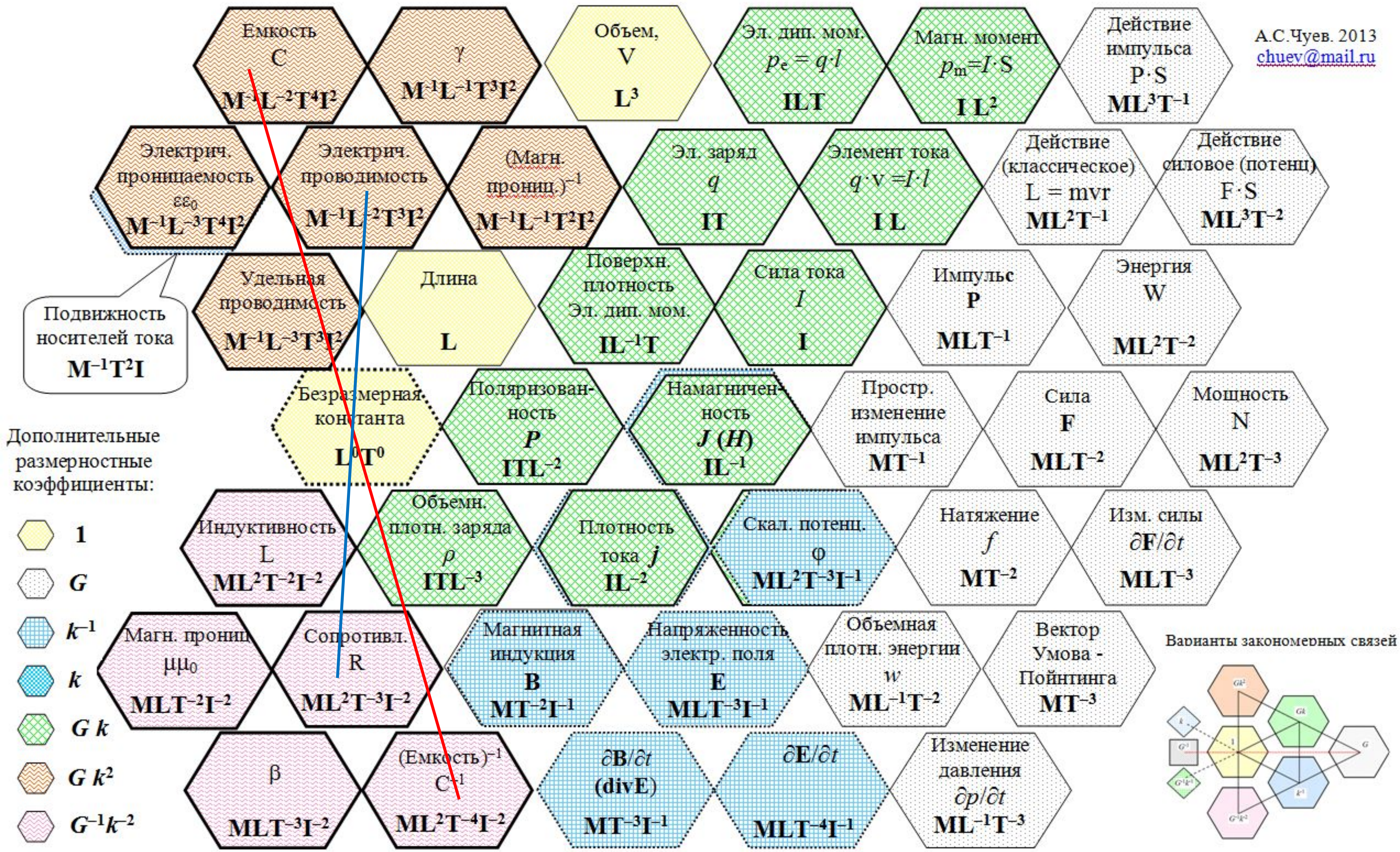
$$\boxed{n = \sigma E^2}$$

Система электромагнитных величин и их взаимосвязей



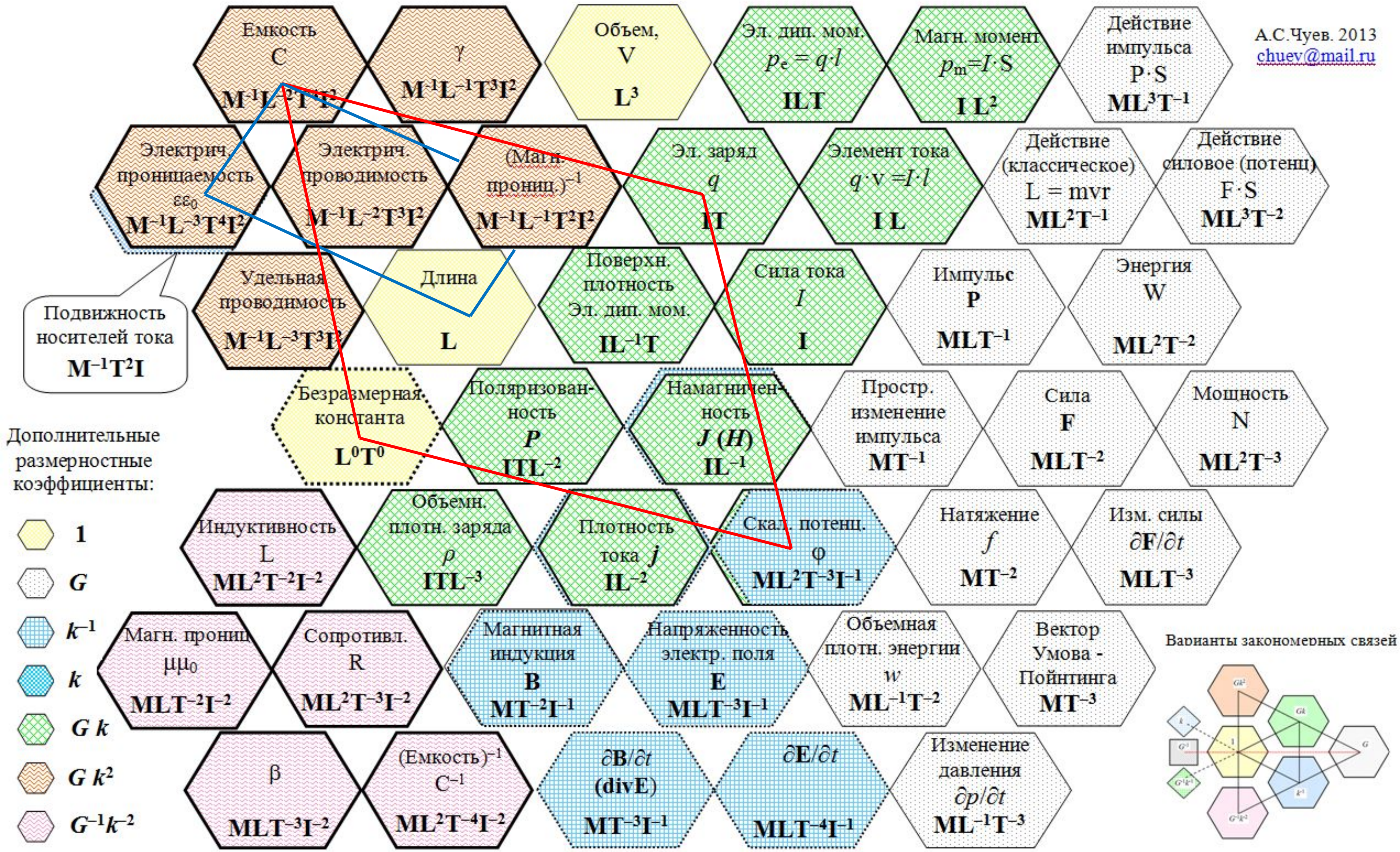
Системные связи, иллюстрирующие формулы для энергии заряженного конденсатора

Система электромагнитных величин и их взаимосвязей



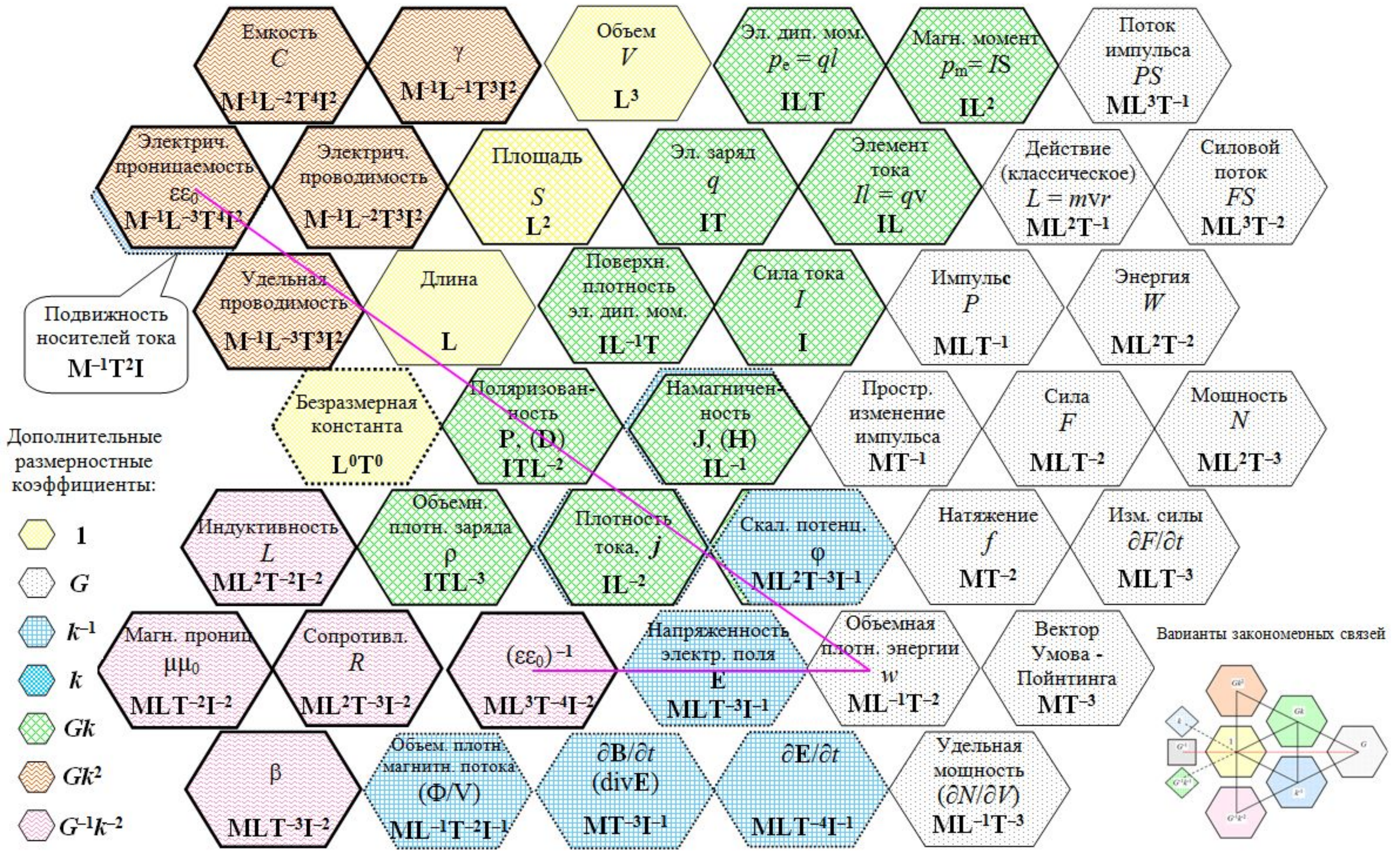
Системные связи, показывающие расположение обратных друг другу структурно-средовых величин

Система электромагнитных величин и их взаимосвязей



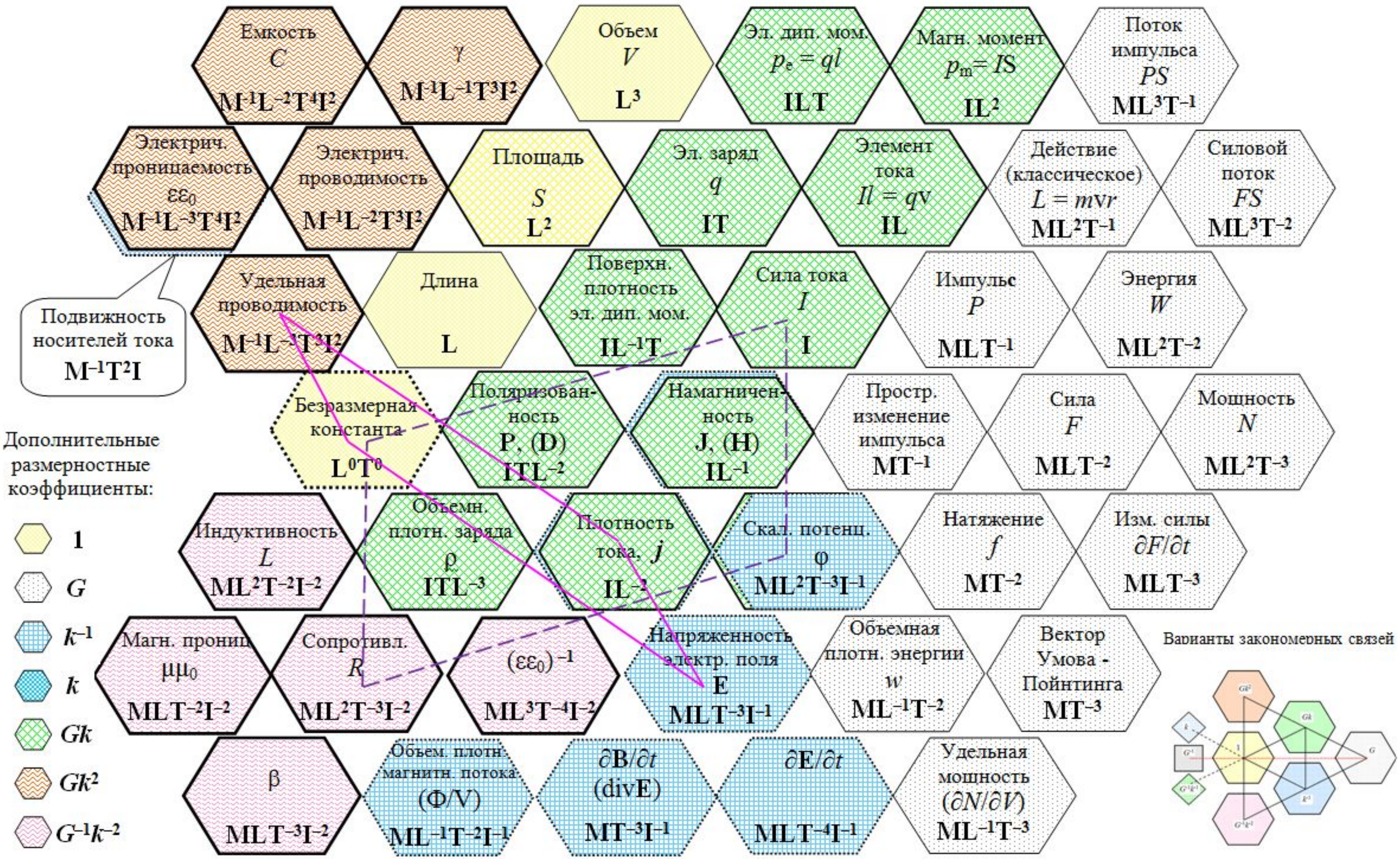
Системные связи, иллюстрирующие формулы для емкость конденсатора

Система физических величин и закономерностей (ФВиЗ)



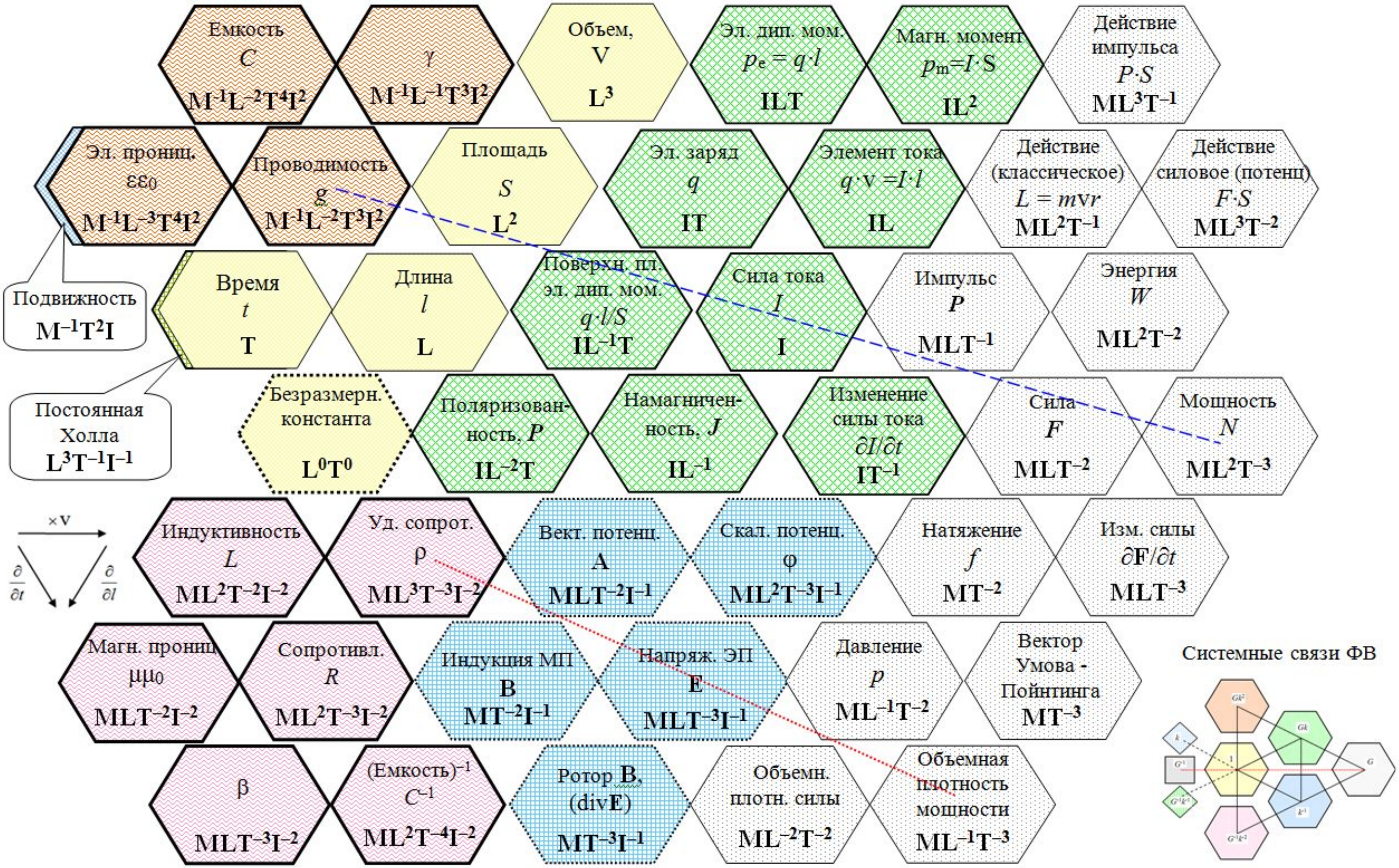
Системные связи, иллюстрирующие объемную плотность энергии эл. поля

Система физических величин и закономерностей (ФВиЗ)



Системные связи, иллюстрирующие закон Ома в интегральной и дифференциальной формах

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ



Системные связи, иллюстрирующие закон Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах

Презентация по току
и тест

Конец лекции 4