

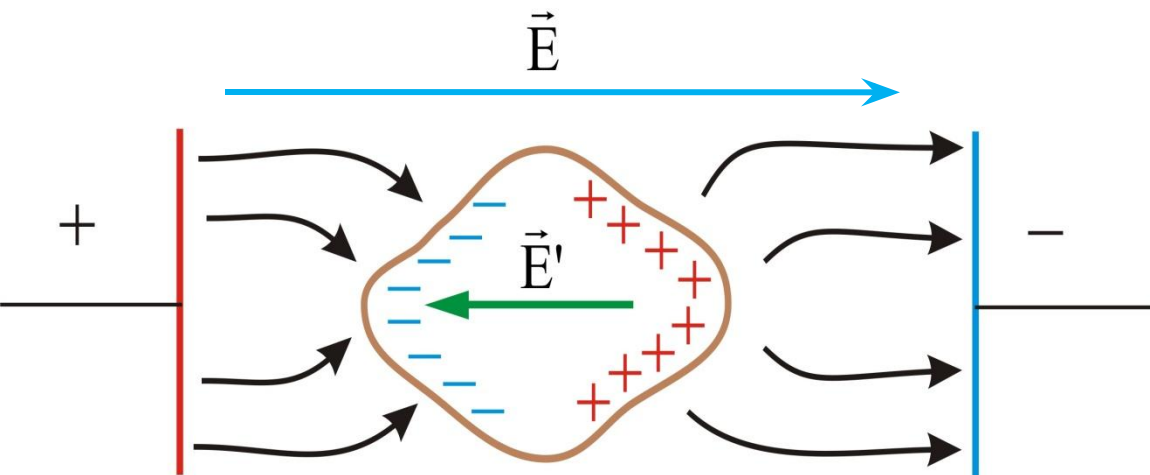
## Лекция 4-2020. Электрическое поле заряженных проводников. Энергия электростатического поля.

- 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.

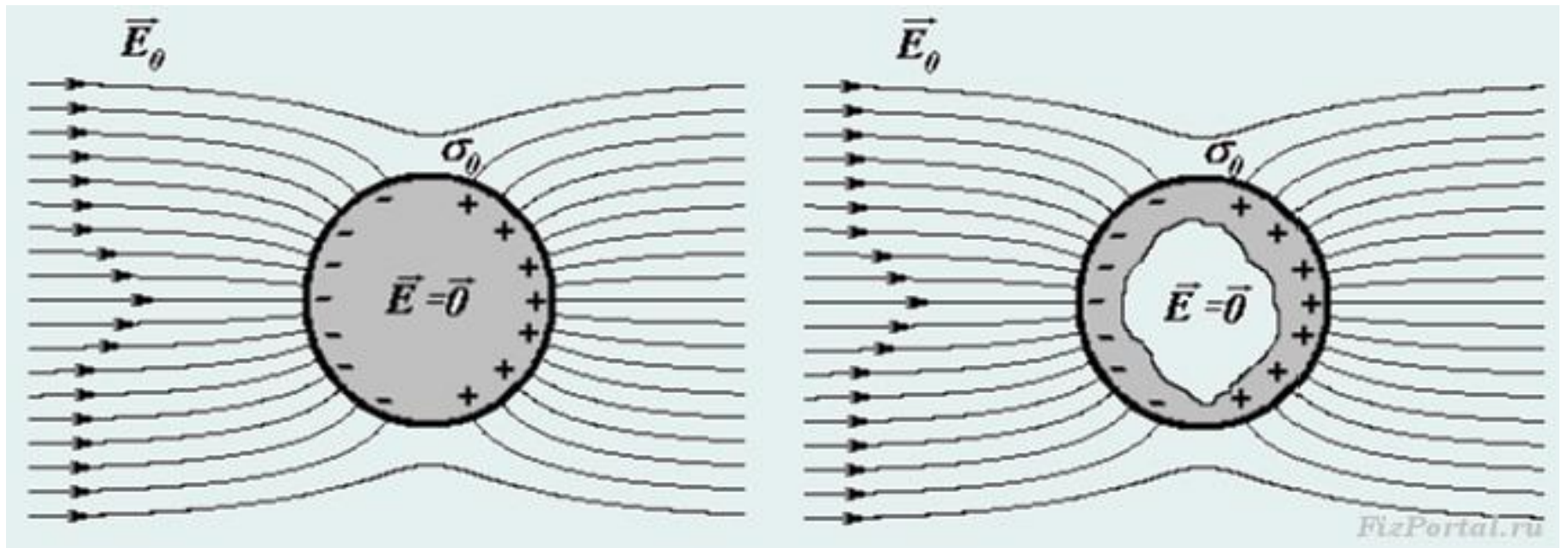
[Муаммар аль-Каддафи](#)



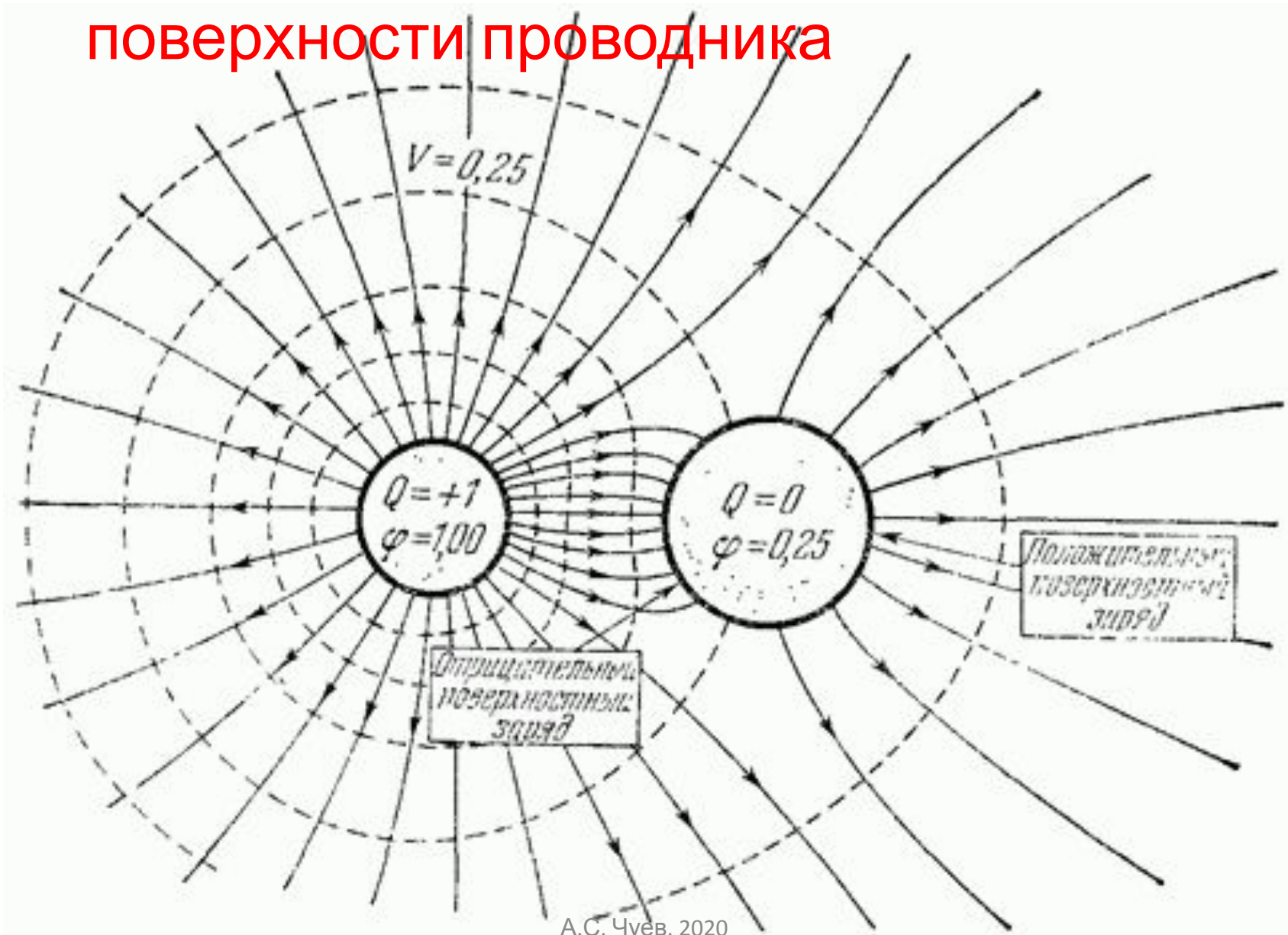
В установившемся состоянии в проводнике, помещенном в электростатическое поле мы имеем:

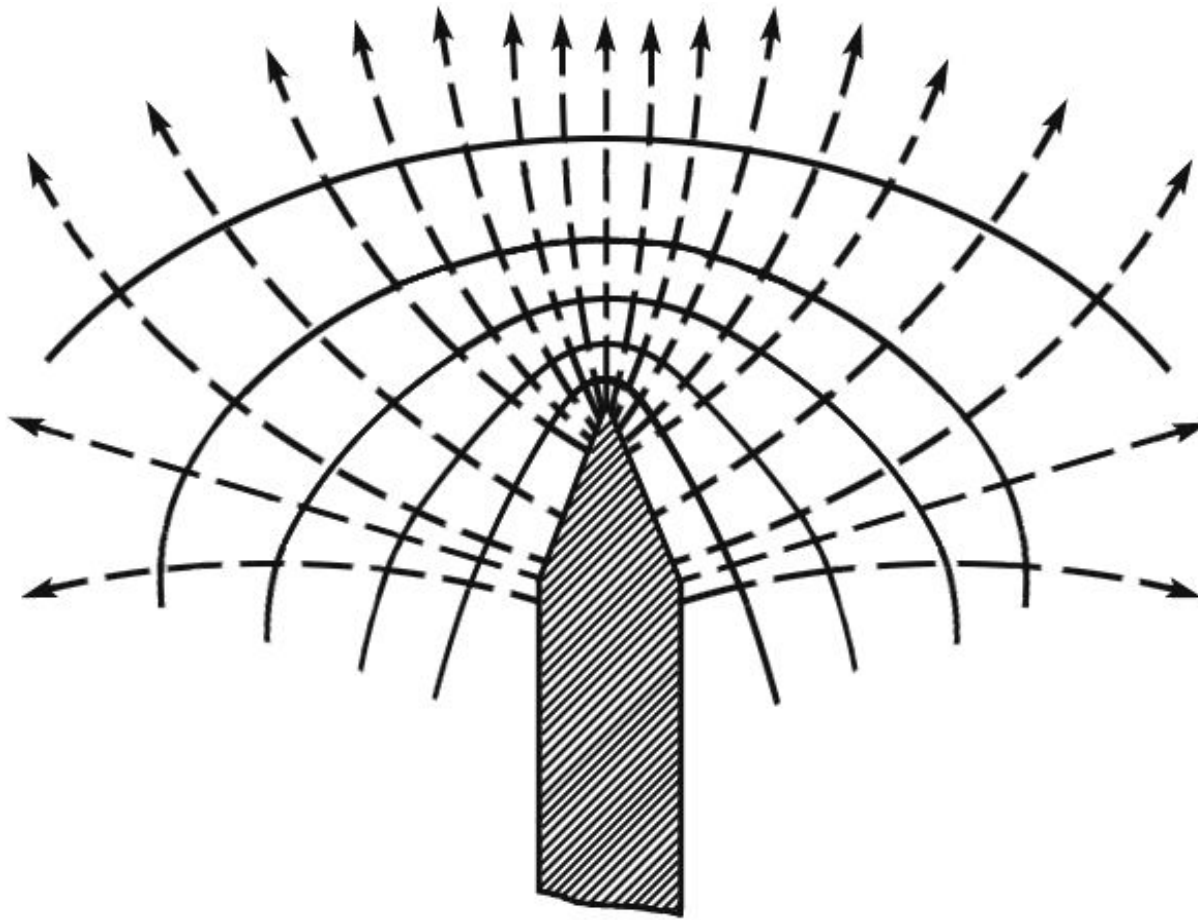
- Появление у заряженной поверхности на металле заряда противоположного знака – **электростатическая индукция**. Этот процесс очень краток  $\sim 10^{-8}$  секунд.
- **Электростатическое экранирование** – внутри проводника поле не проникает.
- Во всех точках внутри проводника  $\mathbf{E} = \mathbf{0}$ , 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

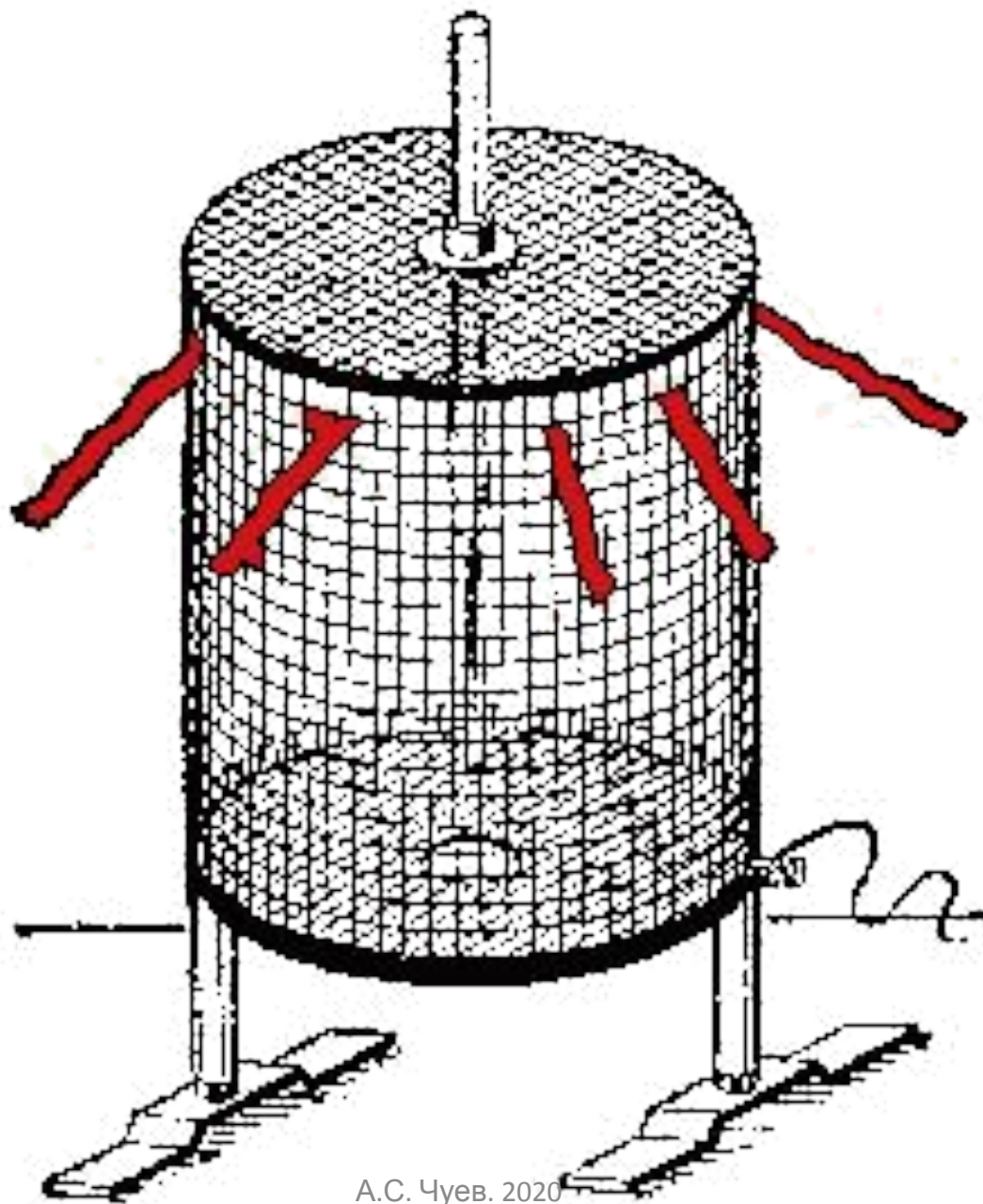


# Поле вблизи на и вблизи поверхности проводника





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



# Электрическая емкость. Конденсаторы.

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

$$q = C\varphi$$

Коэффициент пропорциональности  $C$  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  $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ В}$ .
- Размерность емкости: **определить самостоятельно.**



**Конденсатор** – система двух разноименно заряженных проводников, разделенных диэлектриком

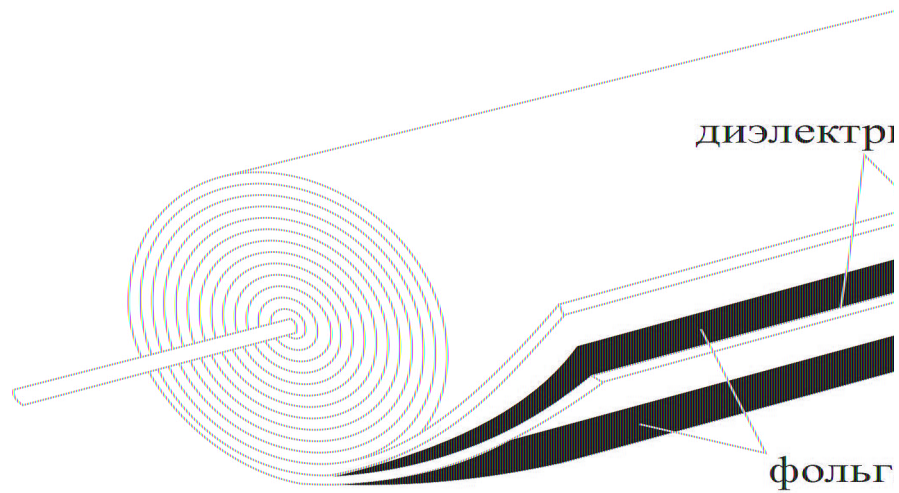


## Типы конденсаторов

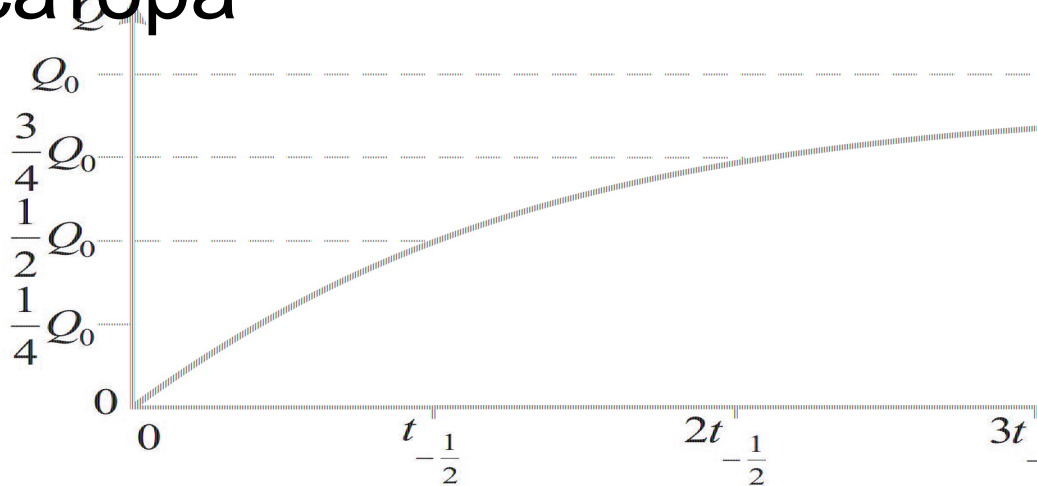
- постоянной и переменной емкости и различаются по роду диэлектрика между пластинами



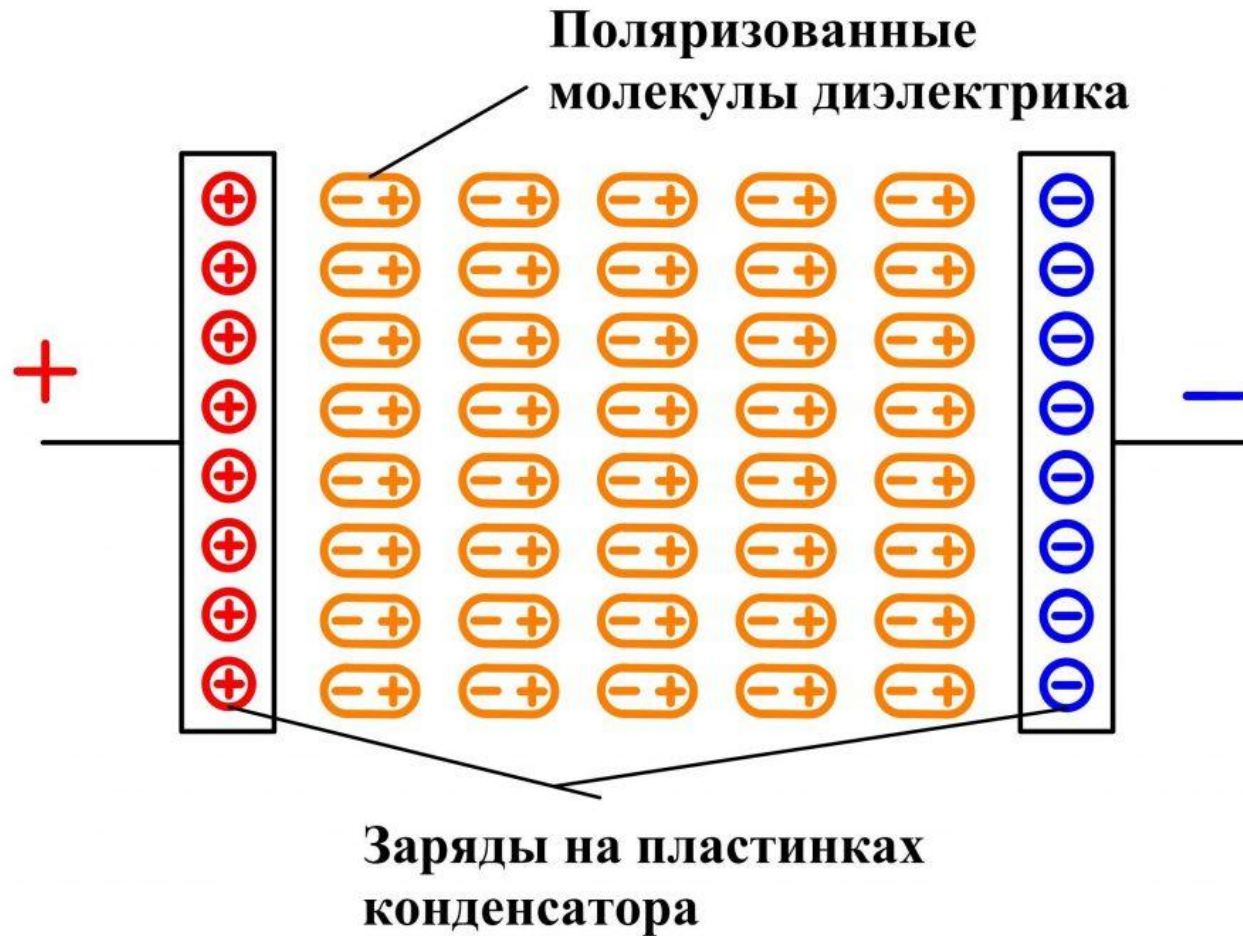
- бумажные, керамические, воздушные ...



# Переходной процесс заряда конденсатора



# При помещении диэлектрика в электрическое поле он поляризуется

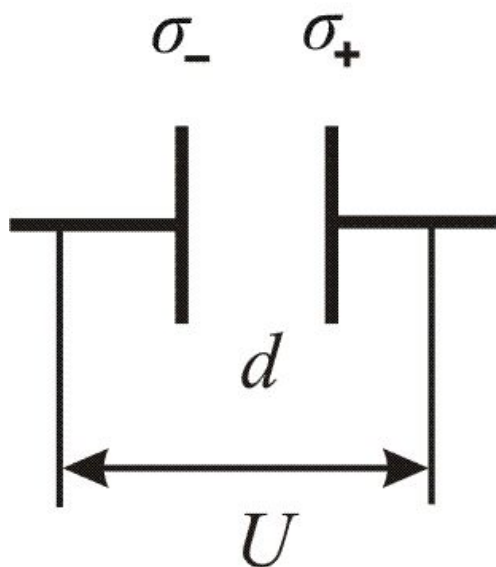


# Расчет емкости различных конденсаторов

## *Емкость плоского конденсатора.*

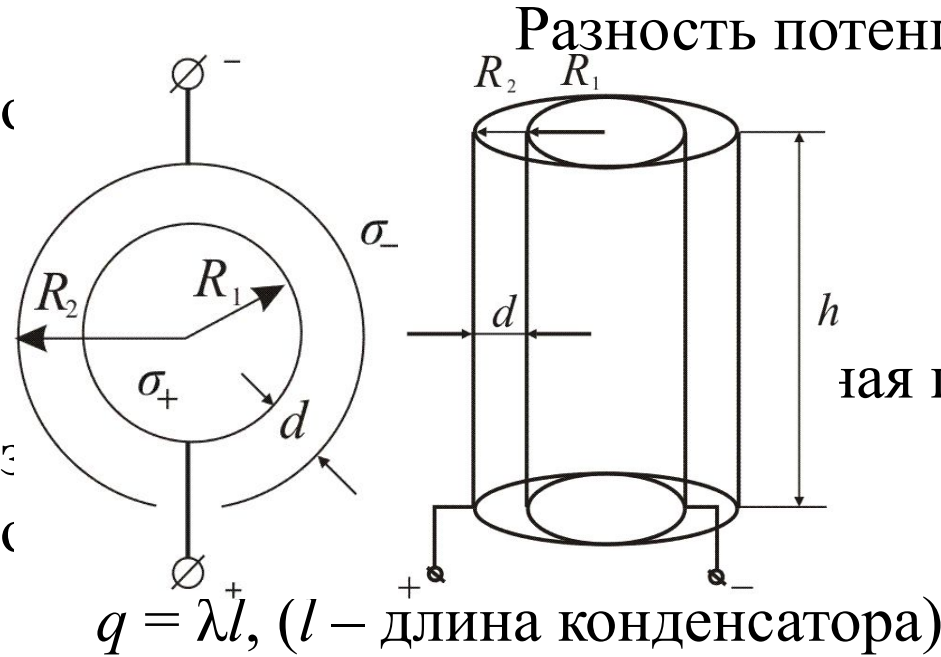
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}; \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \int E dx = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} d$$

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



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

# Емкость цилиндрического конденсатора.



Разность потенциалов между

конденсатора

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

ная плотность

цилиндрических

$$\lambda h = q$$

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

$$C_{\text{цил.}} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon h}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$

Далее вывод формулы

## Вывод формулы цилиндрического конденсатора

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

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{R_1}^{R_2} E dr = \int_{R_1}^{R_2} \frac{q dr}{2\pi\varepsilon_0 r h} = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 h} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r};$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 h} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

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

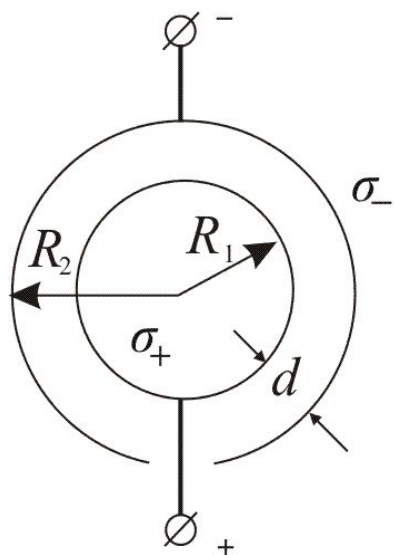
Если зазор между обкладками мал:  $d = R_2 - R_1$ , то  $d \ll R_1$ , тогда

$$\ln \frac{R_2}{R_1} \approx \frac{R_2 - R_1}{R_1}$$

$$C_{\text{цил.}} = \frac{2\pi\varepsilon_0 h R_1}{R_2 - R_1} = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

## Емкость сферического конденсатора

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



$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

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

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$

Далее вывод формулы

## Вывод формулы сферического конденсатора (без учета диэлектрика)

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{R_1}^{R_2} E dr = \int_{R_1}^{R_2} \frac{q dr}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right);$$

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{4\pi\epsilon_0}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}};$$



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

$$C_{\text{сфер.}} = \frac{4\pi\epsilon_0 R^2}{d} = \epsilon_0 \frac{S}{d}.$$

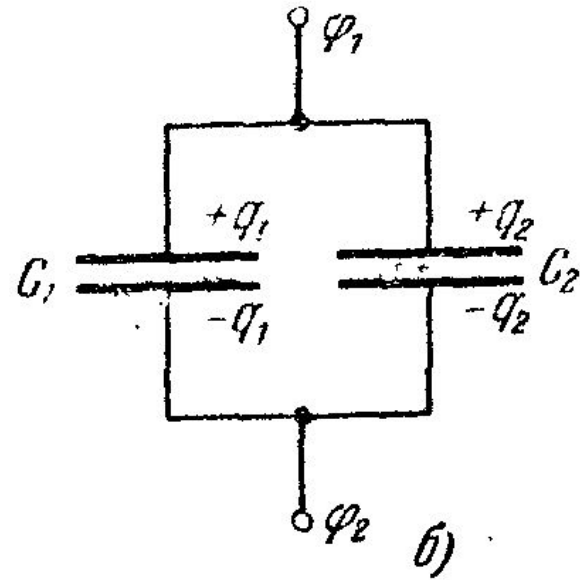
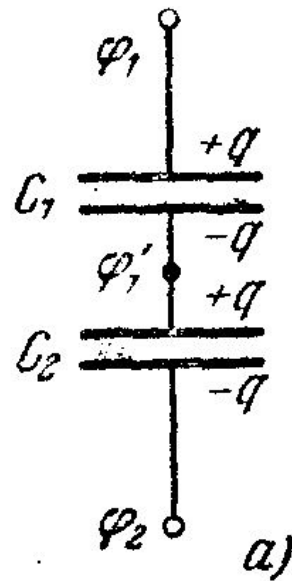
Таким образом, емкость тонкого сферического конденсатора,

$$C_{\text{сфер.}} = \epsilon_0 \frac{S}{d},$$

совпадает с формулой емкости плоского конденсатора.

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

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



$$C = C_1 + C_2.$$

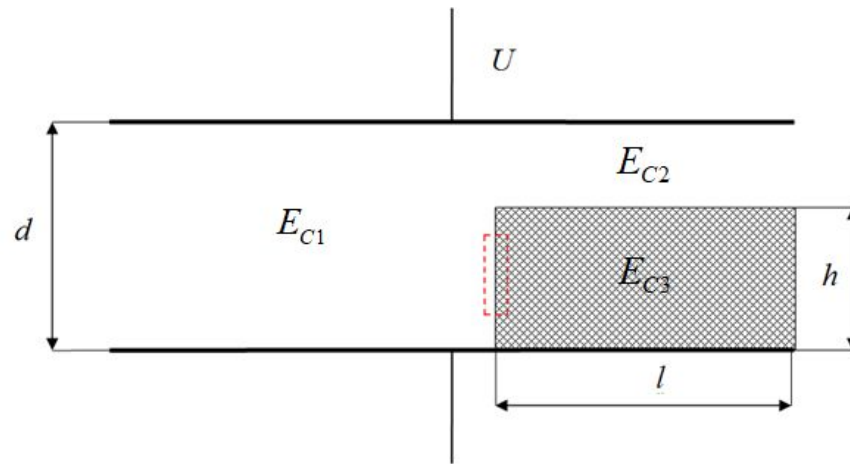
# Тема для реферата по физике

## Парадокс электростатики

$$U_{C1} = U$$

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

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

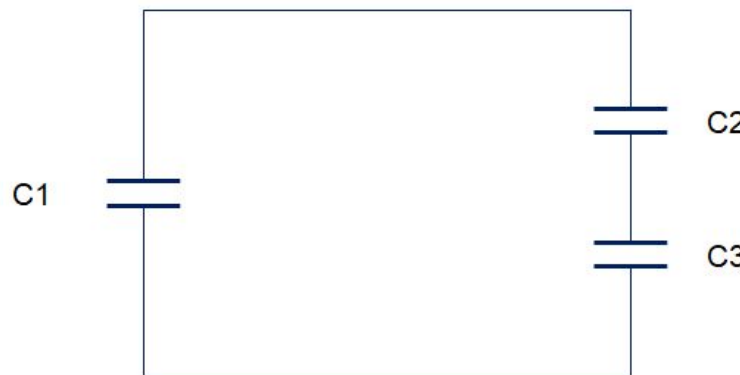


a)

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

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

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



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

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

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

# Энергия заряженного конденсатора

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

$$dA = Udq.$$

*Работа равна убыли потенциальной энергии конденсатора:*

$$dA = -dW.$$

Так как  $q = CU$ , то  $dA = CUdU$ , а полная работа

$$A = \int dA.$$

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

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

Энергию конденсатора можно определить и по другим формулам:

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

# Энергия электростатического поля (в вакууме)

*Носителем энергии в конденсаторе является электростатическое поле.*

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

$\frac{U}{d} = E$ ;  $Sd = V$  – объем. Отсюда:

$$W = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} V$$

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

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

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

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

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

Формулы справедливы **только для** однородного поля.

# Энергия системы неподвижных зарядов

Если поле создано двумя точечными зарядами  $q_1$  и  $q_2$ , то

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

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



Для вакуума можно записать

$$\varphi_{12} = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$\varphi_{21} = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$r$  – расстояние между зарядами.

Из двух последних систем уравнений следует, что

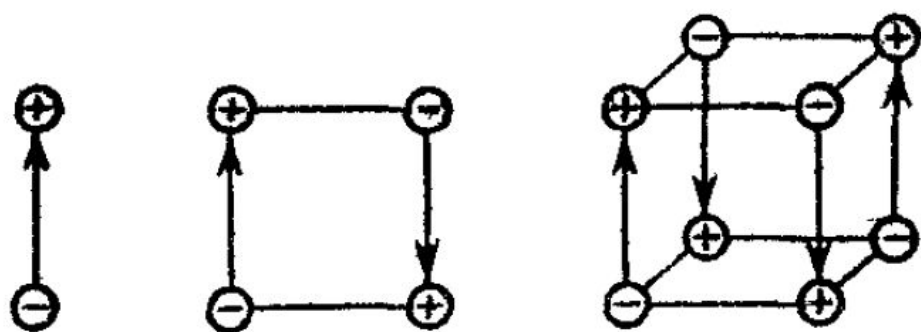
$$W_1 = W_2 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r} = W \quad W = \frac{1}{2} W_1 + \frac{1}{2} W_2 = \frac{1}{2} (q_1 \varphi_{12} + q_2 \varphi_{21}).$$

**Энергия системы из  $N$  зарядов, :**

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

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

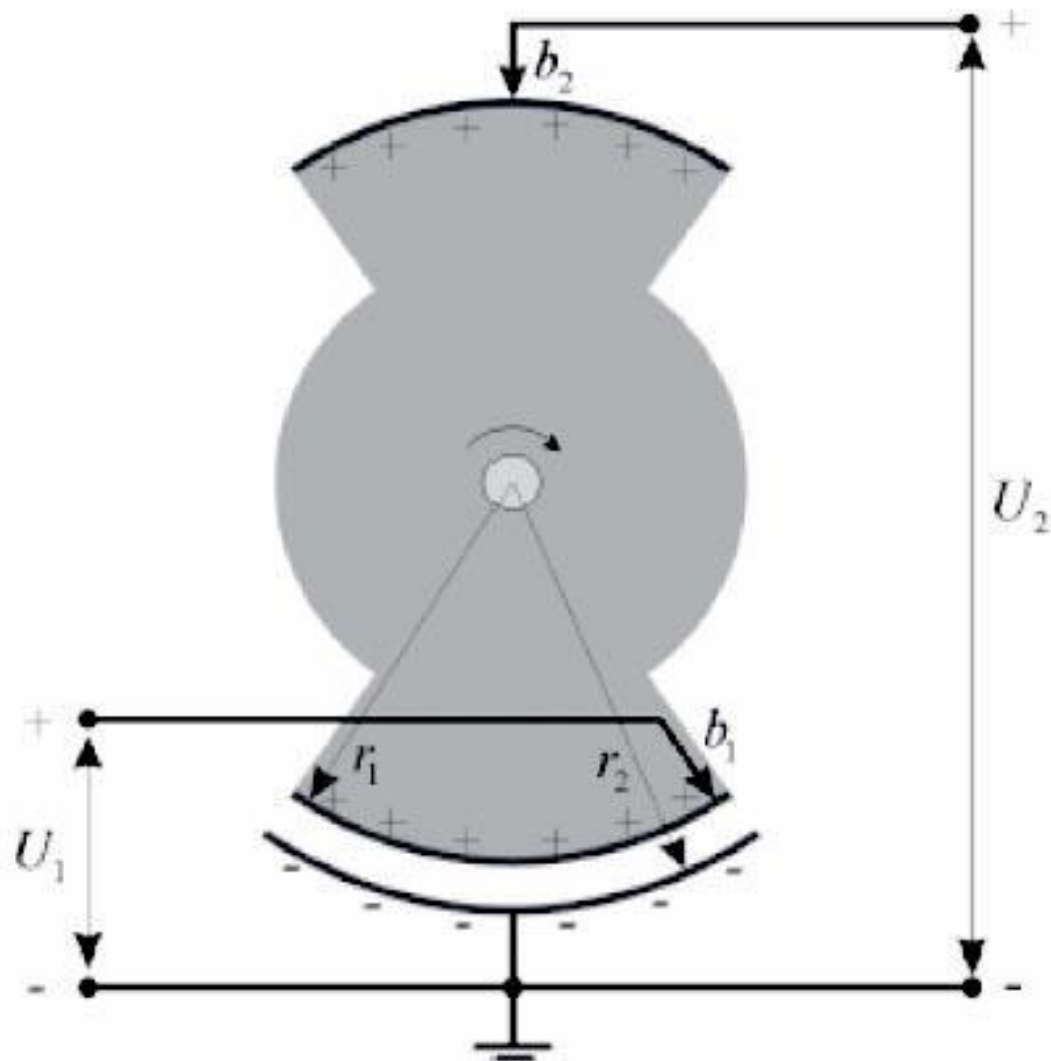
**Соединения конденсаторов - самостоятельно**



Из двух диполей с противоположными по направлению дипольными моментами можно составить так называемый *квадруполь*. Его поле убывает обратно пропор-

ционально четвертой степени расстояния. Из двух квадруполей можно составить *октуполь*, поле которого убывает как  $\frac{1}{r^5}$ .

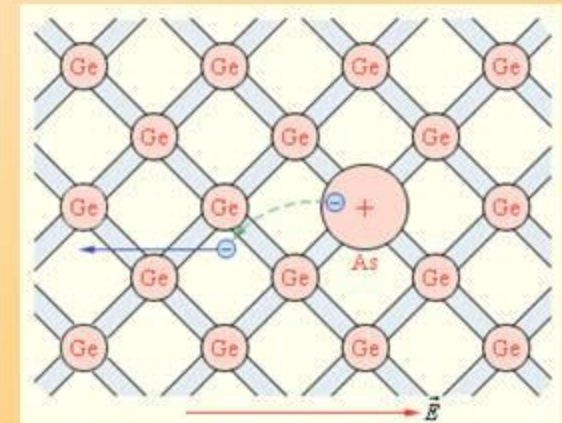
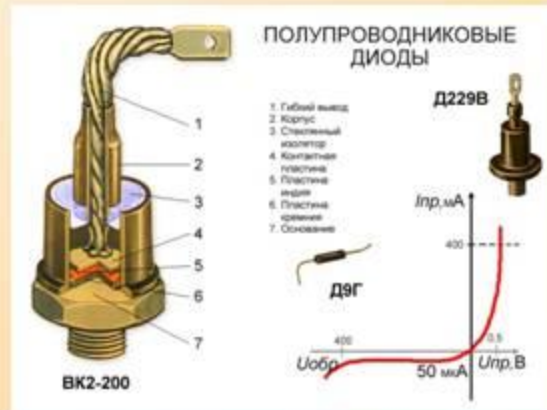
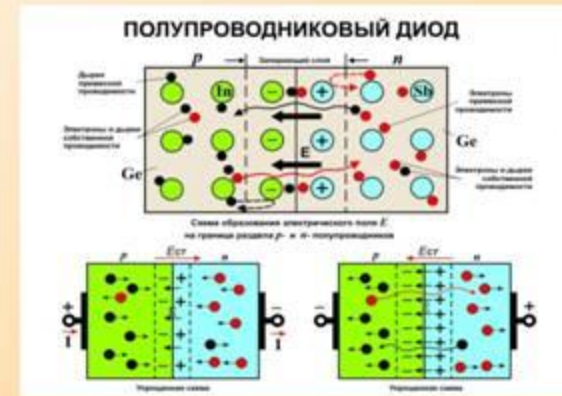
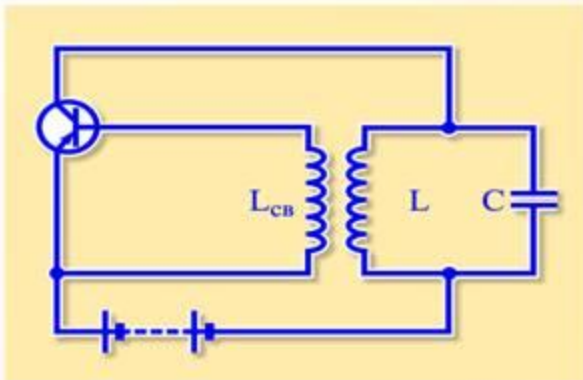
# Ёмкостной генератор высоковольтного напряжения



# Тема «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК» (прорабатывается студентами самостоятельно)

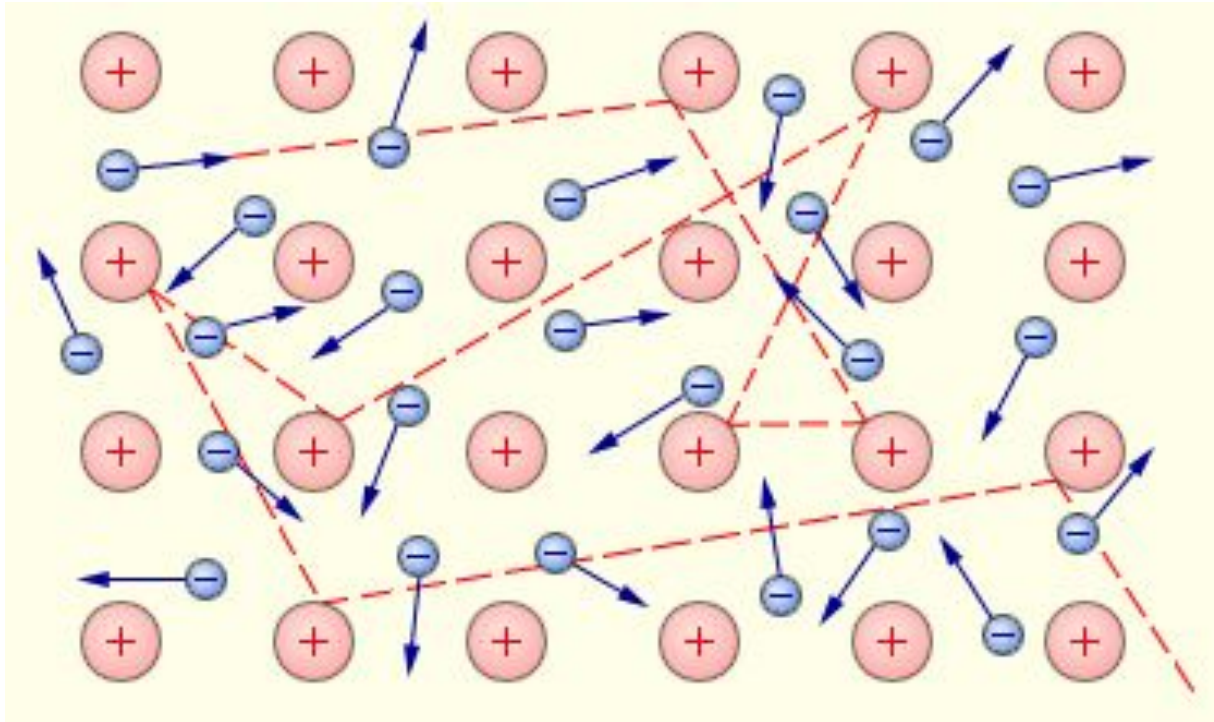
- Носители тока в средах
- Сила и плотность тока
- Уравнение непрерывности
- Электрическое поле в проводнике с током
- Сторонние силы
- Закон Ома и Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах

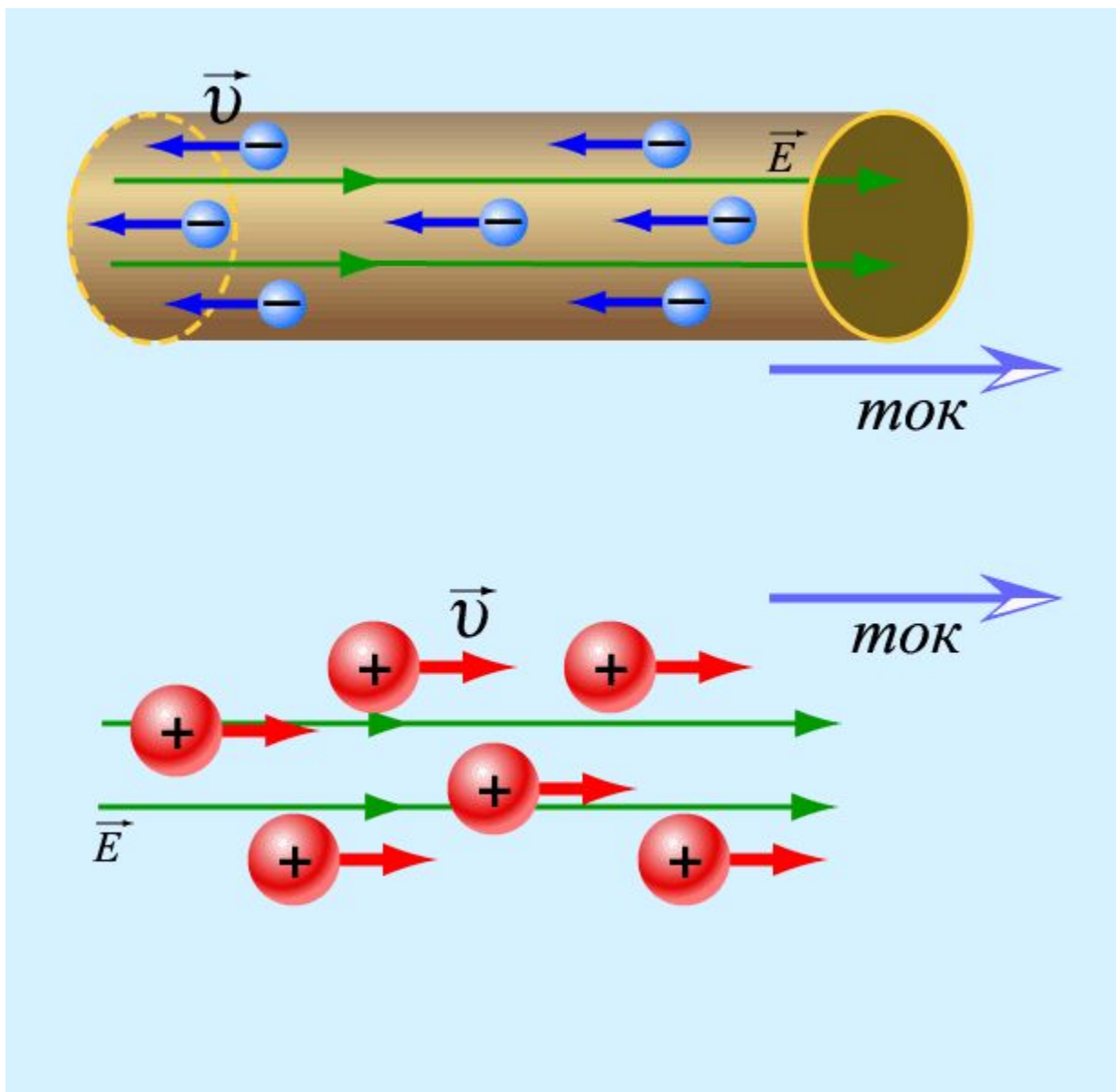
# Ток в различных средах



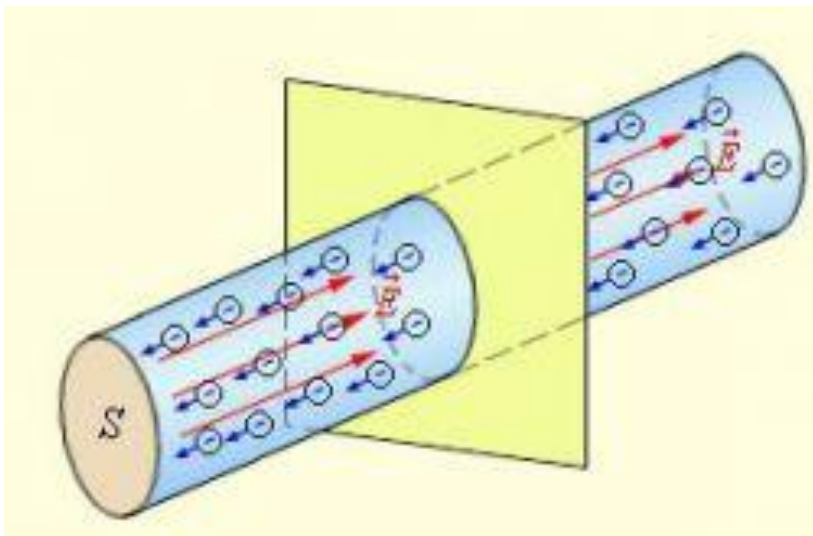
главная

# Носители тока в средах. Сила и плотность тока.





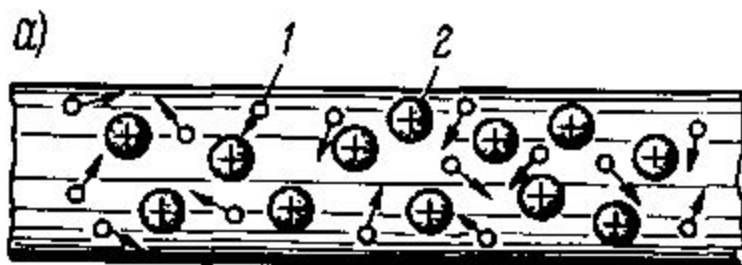
# Электрическое поле в проводнике с током



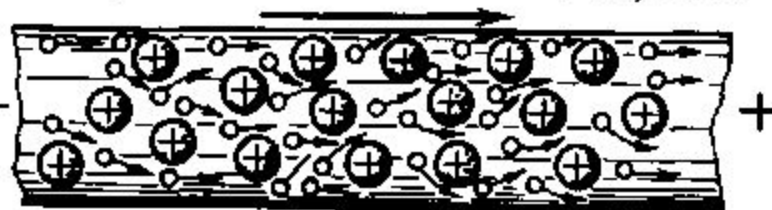
$$I = dq / dt$$

$$j = I/S$$

$$j = evn$$



б) Направление движения электронов



Принятое направление тока



# Уравнение непрерывности

$$\oint_S \vec{j} \cdot \vec{n} dS = - \frac{\partial q}{\partial t}$$

Интегральная  
форма

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

Дифференциальная  
форма

Закон Ома

$$I = \frac{U}{R} = \frac{Edl}{\rho \frac{dS}{dS}} = \frac{EdS}{\rho}$$

С учетом, что  $j = \frac{dI}{dS} = \frac{1}{\rho} E$

Получим

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

**Это закон Ома в дифференциальной форме.**

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

# Сторонние силы

Сторонние силы-  
непотенциальные силы

**Сторонние силы-**  
любые силы, действующие на  
электрические заряды  
кроме сил электростатического  
происхождения.

PPt4WEB.ru

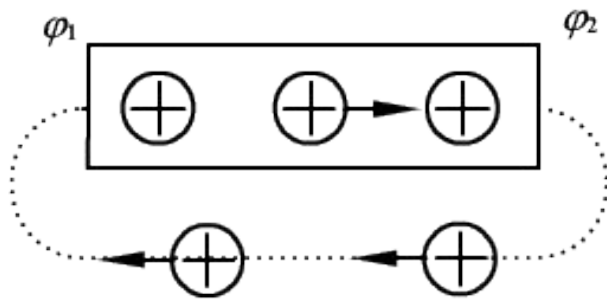
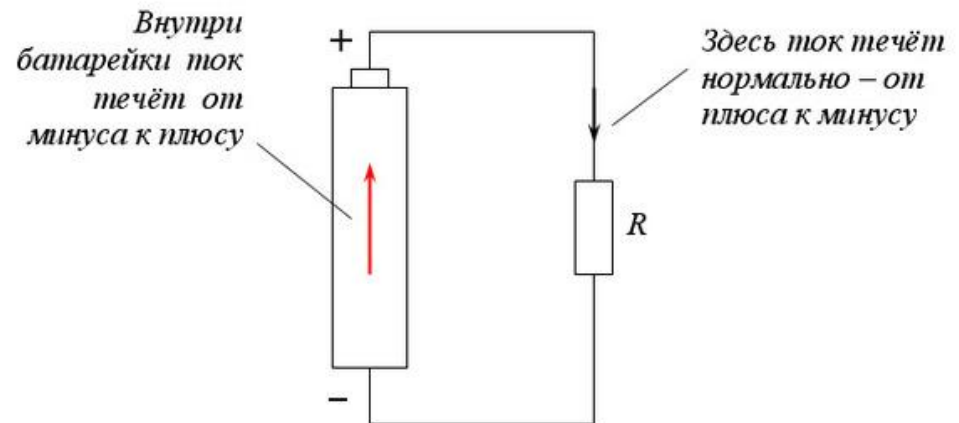


рис. 17.1



# Работа и мощность тока. Закон Джоуля – Ленца

- Рассмотрим произвольный участок цепи, к концам которого приложено напряжение  $U$ . За время  $dt$  через каждое сечение проводника проходит заряд  $dq = Idt$ .
- При этом силы электрического поля, действующего на данном участке, совершают работу:  $dA = Udq = UI dt$ .
- Общая работа:  $A = IUt = IRIt$

**Тепловая мощность тока** в элементе проводника  $\Delta l$ , сечением  $\Delta S$ , объемом

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

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

**Тепловая мощность тока**  $\Delta N = \overset{\Delta V}{j} \overset{\Delta V}{E} \Delta V$

**Удельная (по объему) мощность тока**  $\frac{\Delta N}{\Delta V} = \overset{\Delta V}{j} \overset{\Delta V}{E}$

Используя закон Ома в дифф.

$$\overset{\Delta V}{j} = \overset{\Delta V}{\sigma E}$$

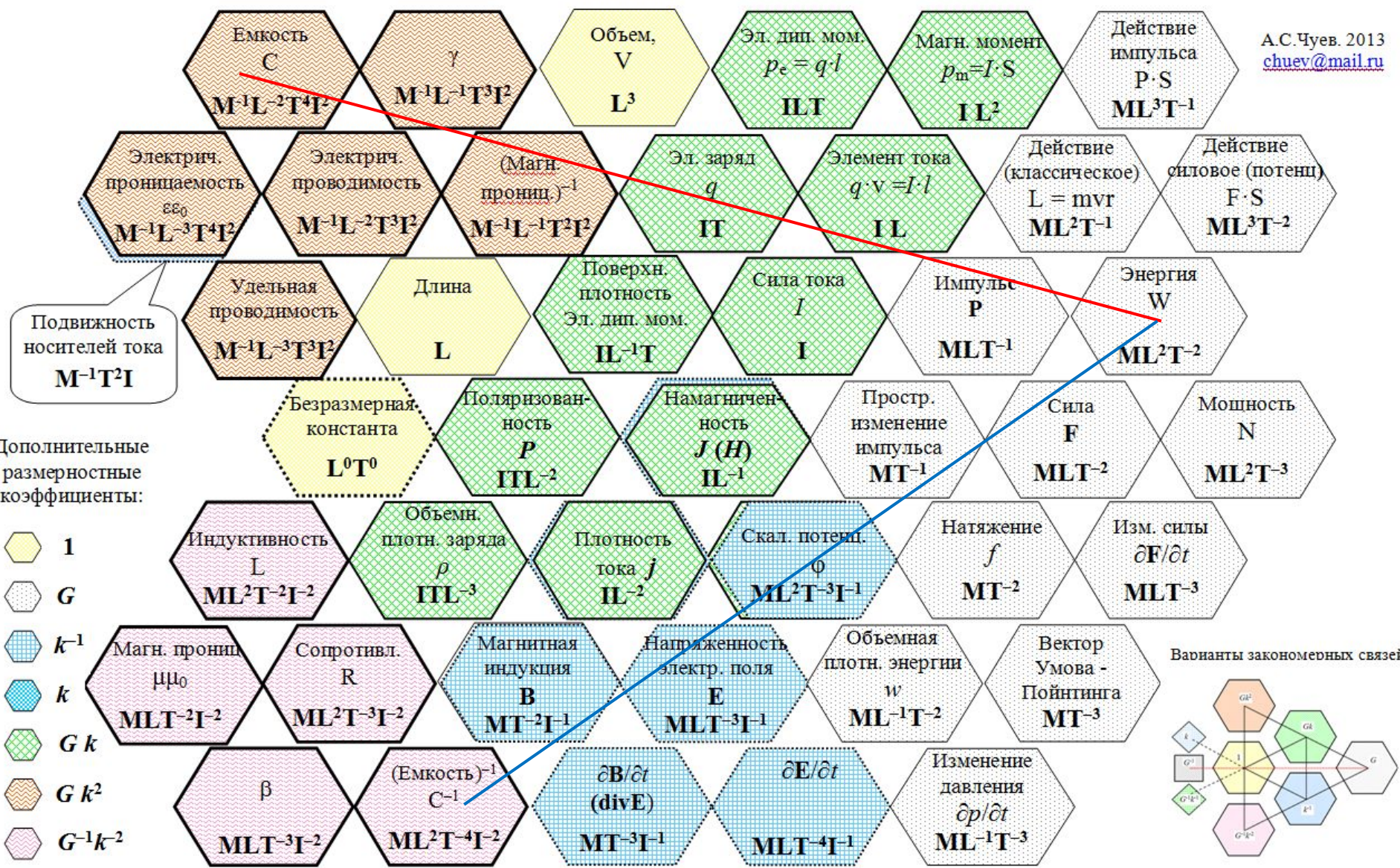
форме

Получим дифф. форму закона Джоуля-Ленца

$$n = \sigma E^2$$

# Система электромагнитных величин и их взаимосвязей

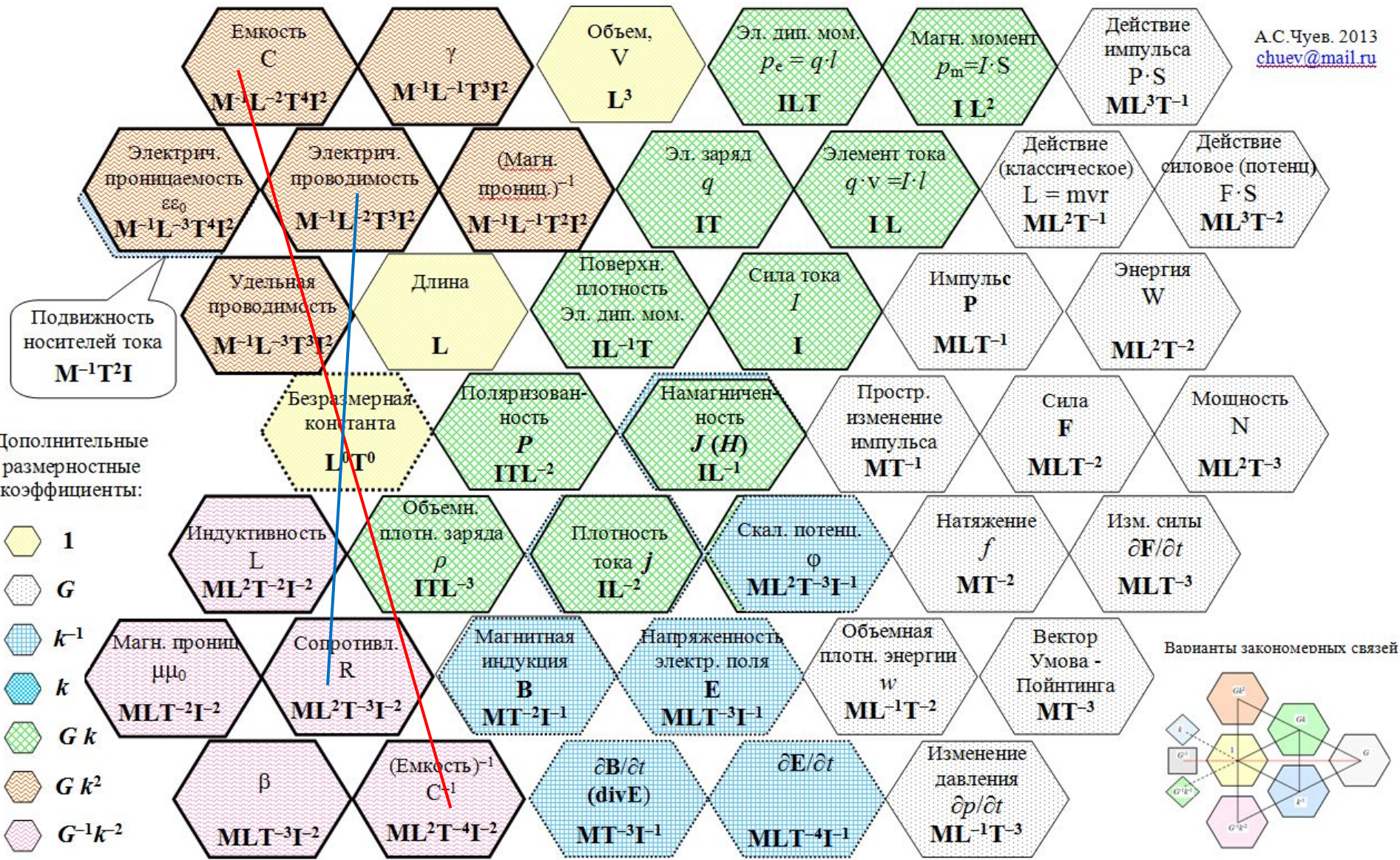
А.С. Чуев. 2013  
[chuev@mail.ru](mailto:chuev@mail.ru)



Системные связи, иллюстрирующие формулы для энергии заряженного конденсатора

# Система электромагнитных величин и их взаимосвязей

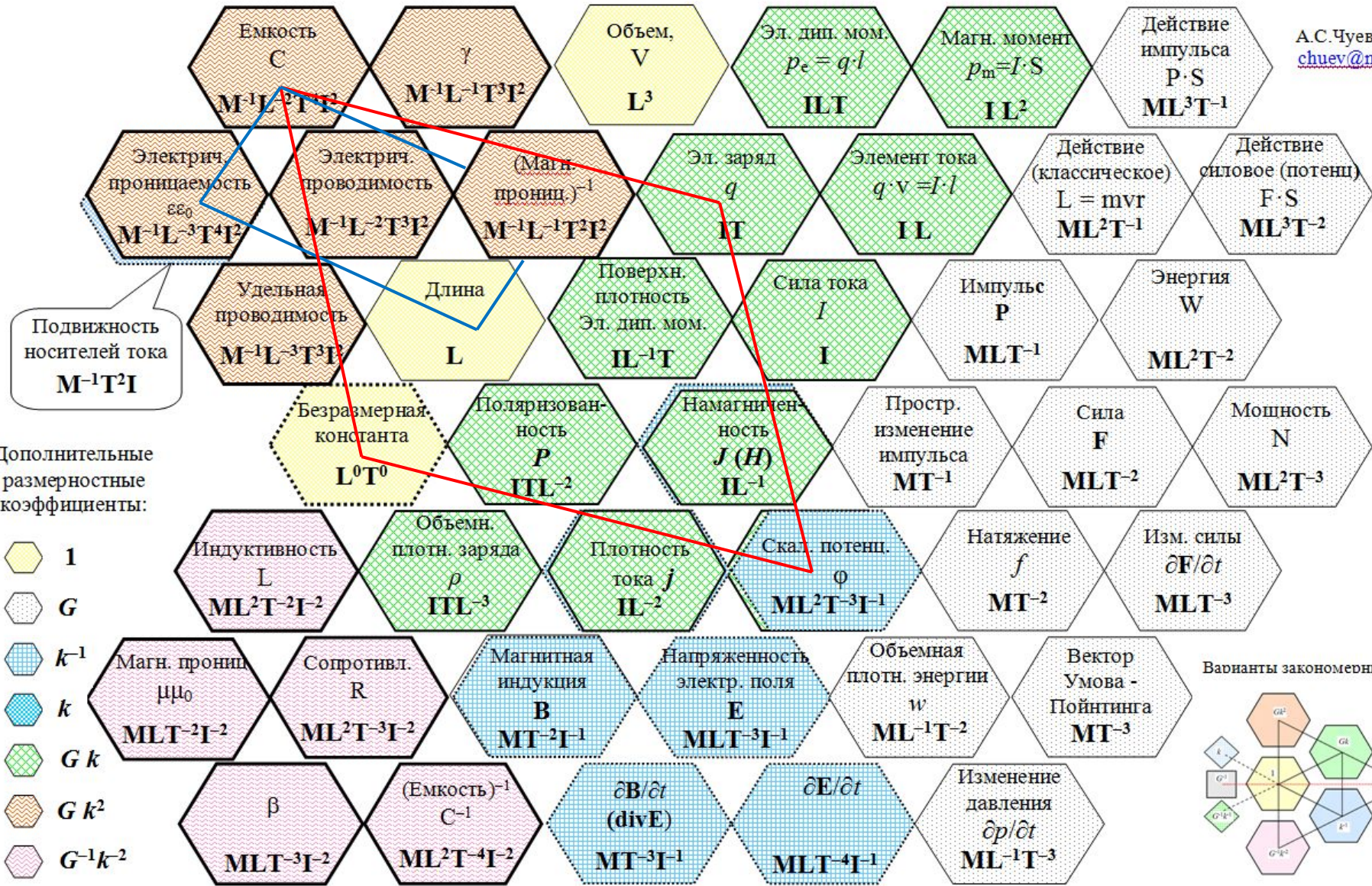
А.С. Чуев. 2013  
[chuev@mail.ru](mailto:chuev@mail.ru)



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

# Система электромагнитных величин и их взаимосвязей

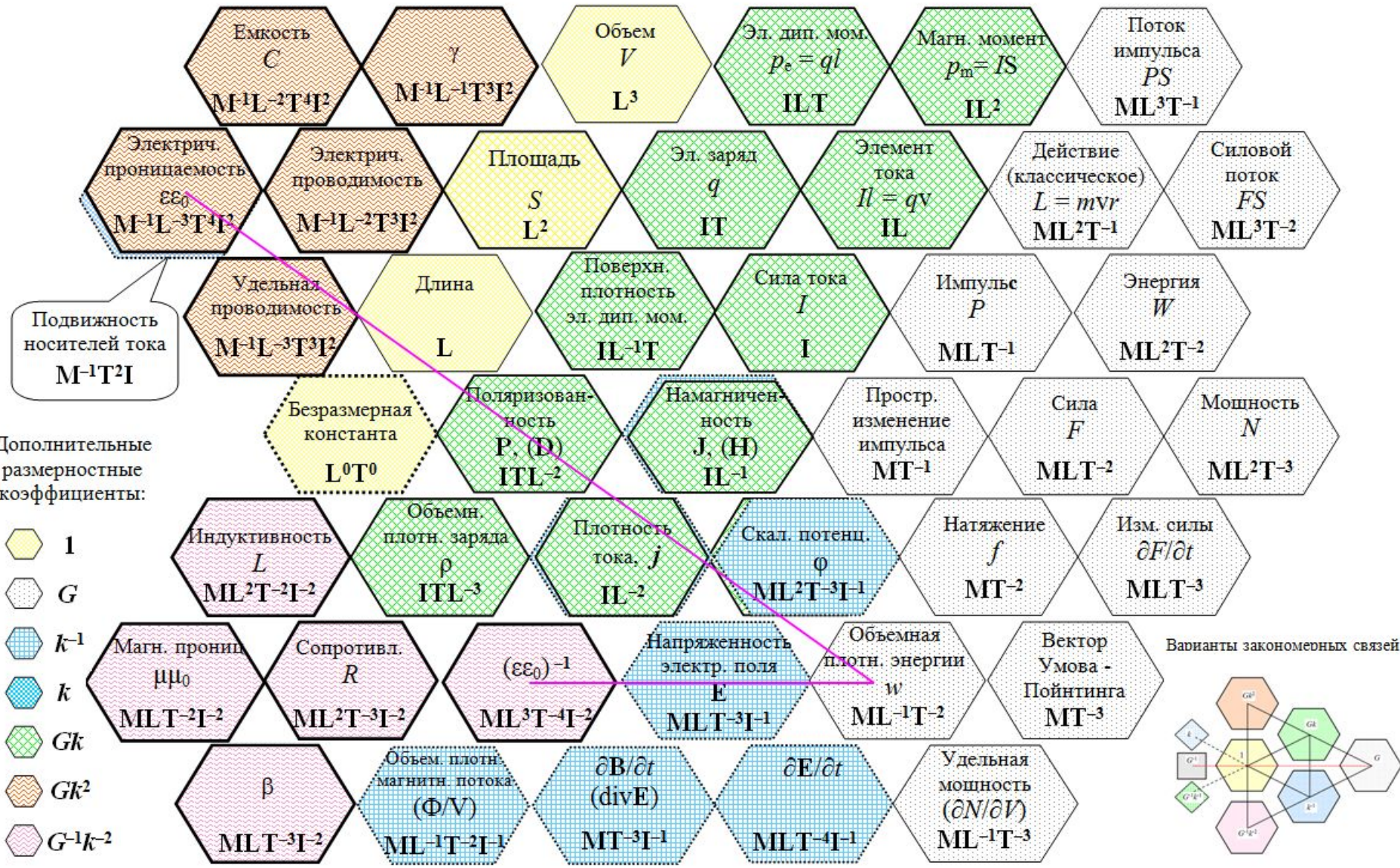
А.С.Чуев. 2013  
[chuev@mail.ru](mailto:chuev@mail.ru)



Системные связи, иллюстрирующие формулы для емкость конденсатора

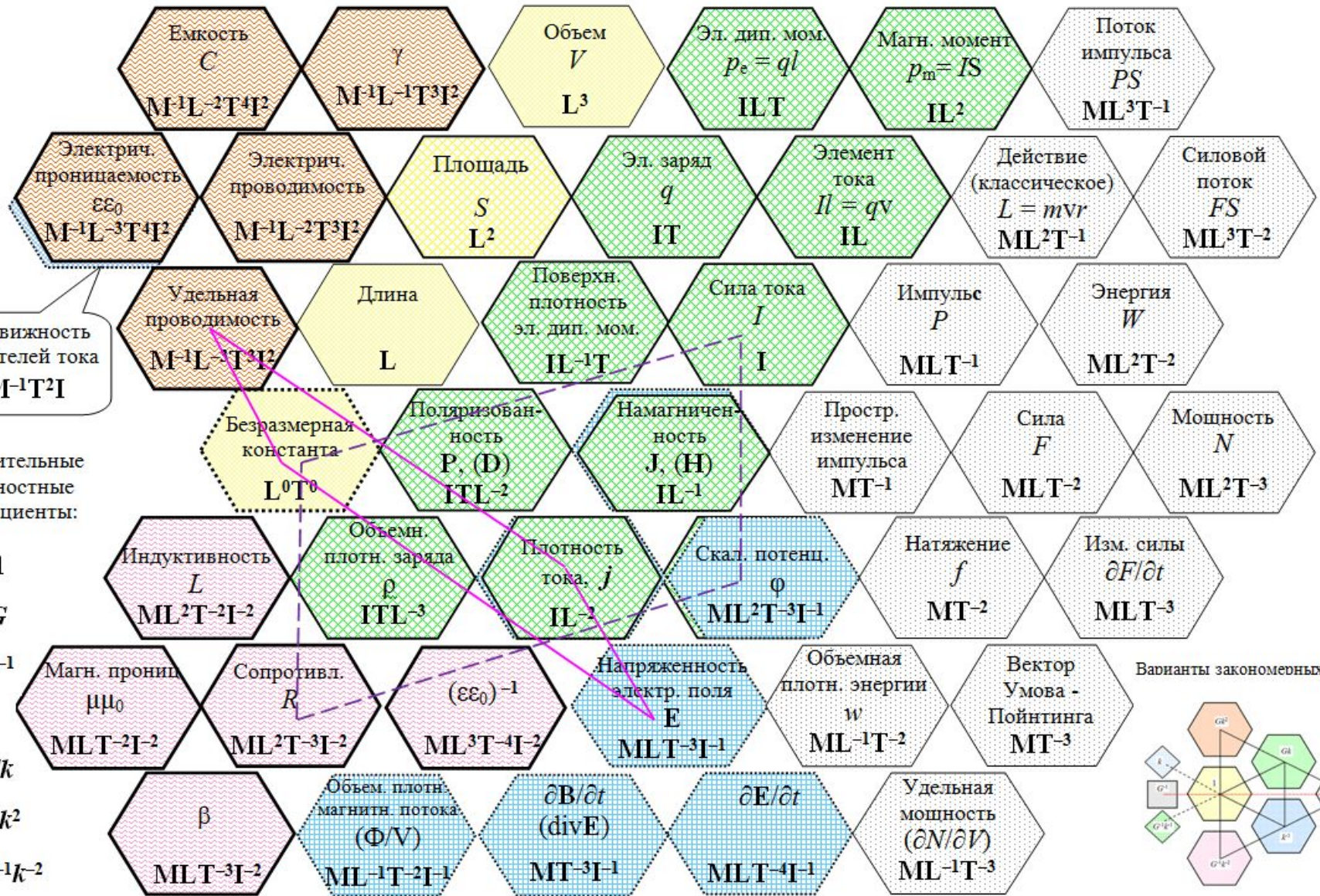


# Система физических величин и закономерностей (ФВЗ)



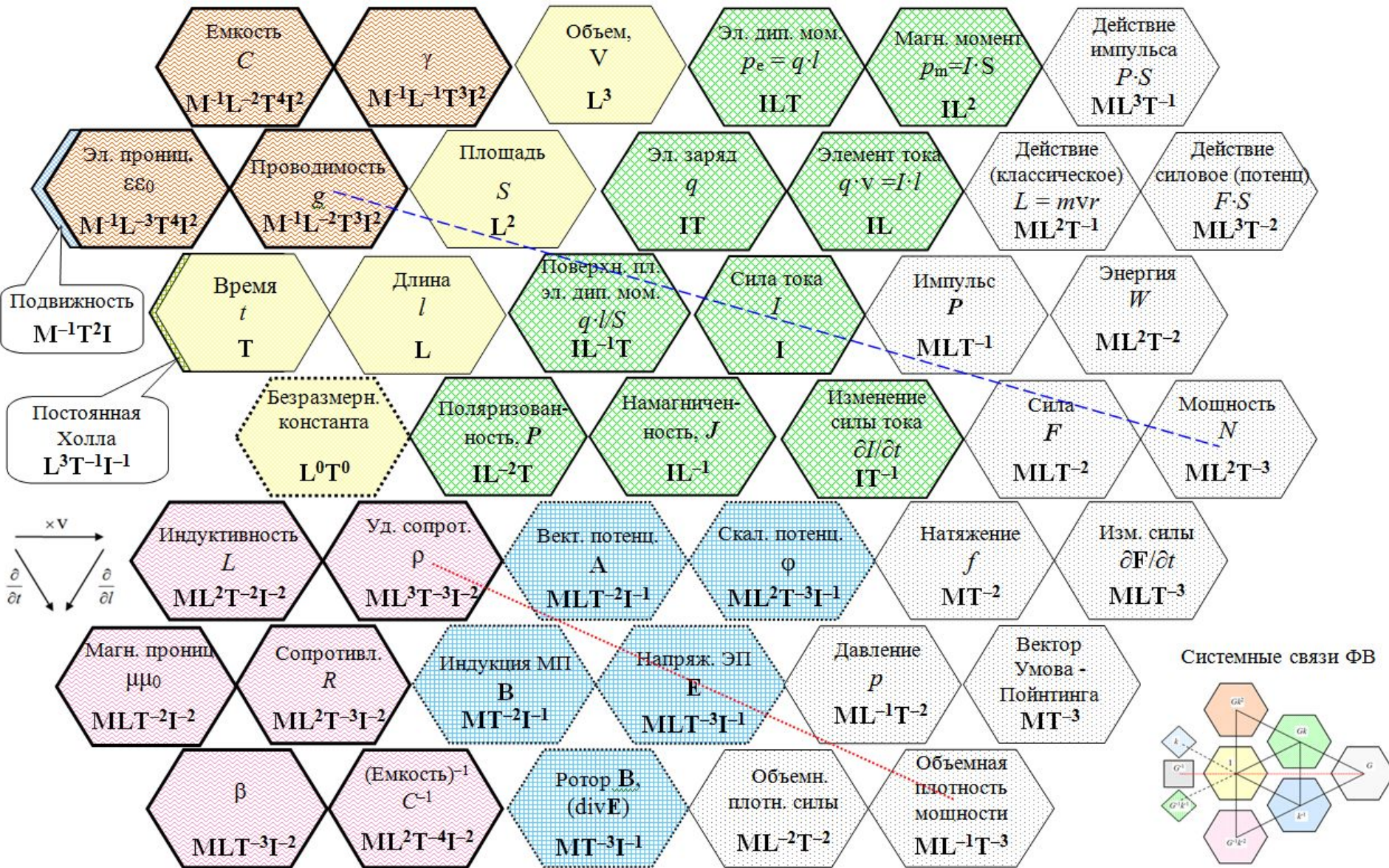
Системные связи, иллюстрирующие объемную плотность энергии эл. поля

# 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