

# Электростатика



# Тема 5. ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

- 5.1. Напряженность и потенциал электростатического поля в проводнике.
- 5.2. Определение напряженности электростатического поля вблизи проводника.
- 5.3. Экспериментальная проверка распределения заряда на проводнике.
- 5.4. Конденсаторы.
  - 5.4.1. Электрическая емкость. Конденсаторы.
  - 5.4.2. Соединение конденсаторов.
  - 5.4.3. Расчет емкостей различных конденсаторов.
  - 5.4.4. Энергия заряженного конденсатора.
- 5.5. Энергия электростатического поля.

# 5.1. Напряженность и потенциал электростатического поля в проводнике

В проводниках имеются электрически заряженные частицы – носители заряда (электроны в металлах, ионы в электролитах) способные перемещаться по всему объему проводника под действием внешнего электростатического поля.

*Носителями заряда в металлах являются электроны проводимости.* Они возникают при конденсации паров металла за счет обобществления валентных электронов.

*При отсутствии электрического поля металлический проводник является электрически нейтральным* – электростатическое поле создаваемое положительными и отрицательными зарядами внутри него компенсируется.

- ▶ При внесении металлического проводника во внешнее электростатическое поле, **электроны проводимости перемещаются (перераспределяются)** до тех пор, пока всюду внутри проводника поле электронов проводимости и положительных ионов не скомпенсирует внешнее поле.
- ▶ **В любой точке внутри проводника, находящимся в электростатическом поле  $E = 0$ ;  $d\varphi = 0$ ; т. е.  $\varphi = \text{const}$ .**
- ▶ **Диэлектрическая проницаемость**
- ▶ **На поверхности проводника напряженность направлена по нормали к этой поверхности**, иначе, под действием составляющей  $E_\tau$ , касательной к поверхности, заряды перемещались бы по проводнику, а это противоречило бы их статическому распределению.
- ▶ Вне заряженного проводника – поле есть, следовательно, должен быть вектор  $\mathbf{E}$ , и направлен он перпендикулярно поверхности!

$$\epsilon_{\text{ме}} \rightarrow \infty.$$

$$\mathbf{E}$$

# 5.4. Конденсаторы

## 5.4.1. Электрическая емкость.

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

$$q = C\varphi \quad (5.4.1)$$

- ▶ Коэффициент пропорциональности называют **электроемкостью** — физическая величина, численно равна заряду, который необходимо сообщить проводнику для того, чтобы изменить его потенциал на единицу.
- ▶ Единица измерения емкости в СИ — фарада  $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ В}$ .

Если потенциал поверхности шара

то 
$$\varphi_{\text{шар.}} = \frac{(5.4.3)Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R}$$

$$C_{\text{шар.}} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R \quad (5.4.4),$$

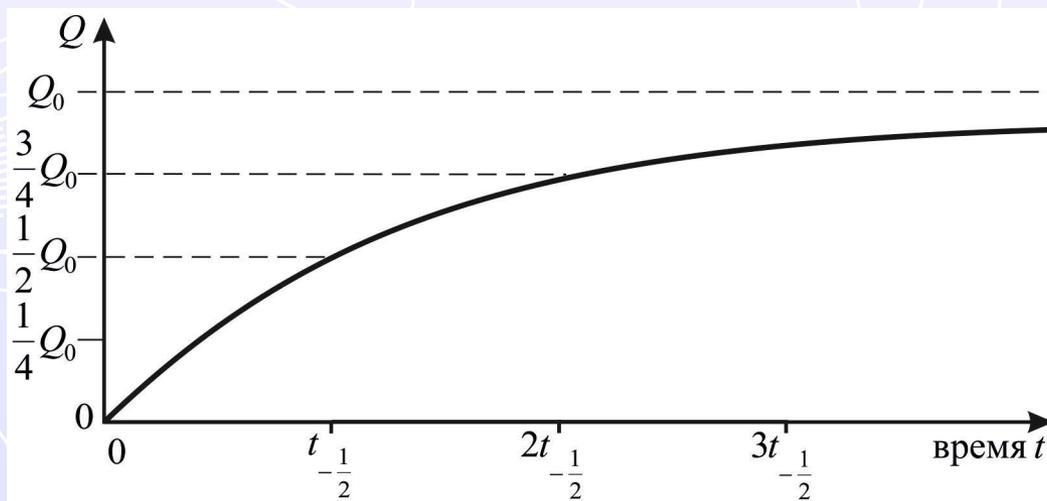
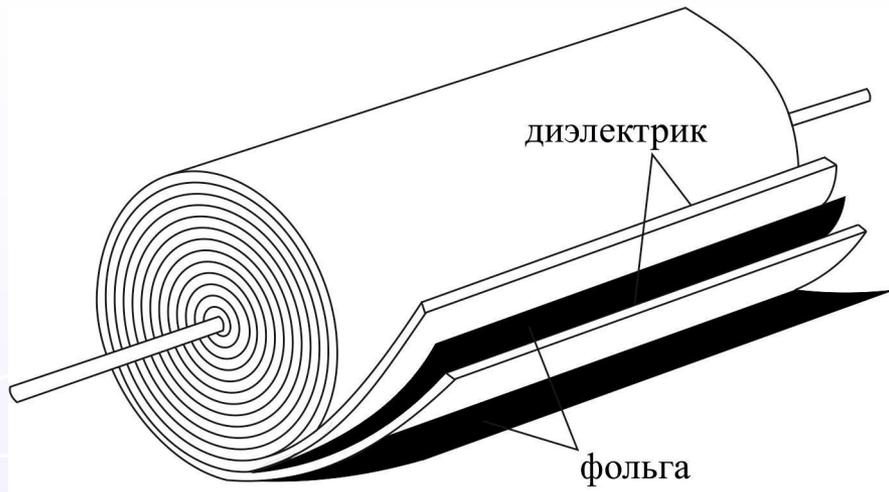
▶ Если  $\epsilon = 1$  (воздух, вакуум) и  $R = R_{\text{земли}}$ , то

$$C_3 = 7 \cdot 10^{-4} \text{ Ф или } 700 \text{ мкФ.}$$

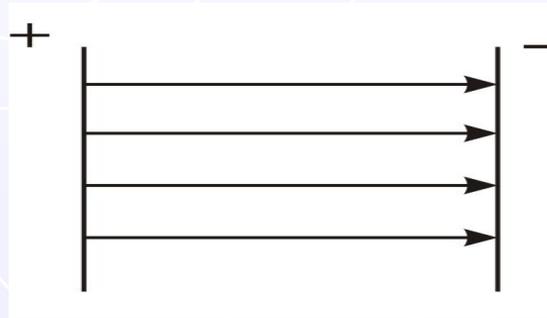
▶ Чаще на практике используют и более мелкие единицы: 1 нФ (нанофарада) =  $10^{-9}$  Ф и 1 пкФ (пикофарада) =  $10^{-12}$  Ф.

Необходимость в устройствах, накапливающих заряд есть, а уединенные проводники обладают малой емкостью. Обратите внимание, что электроемкость проводника увеличивается, если к нему поднести другой проводник – явление электростатической индукции.

**Конденсатор** – два проводника называемые *обкладками* расположенные близко друг к другу.



Конструкция такова, что внешние окружающие конденсатор тела не оказывают влияние на емкость конденсатора. Это будет выполняться, если *электростатическое поле будет сосредоточено внутри конденсатора между обкладками.*



Конденсаторы бывают *плоские, цилиндрические и сферические.*

Так как электростатическое поле находится внутри конденсатора, то линии электрического смещения начинаются на положительной обкладке и заканчиваются на отрицательной – и нигде не исчезают. Следовательно, заряды на обкладках *противоположны по знаку, но одинаковы по величине.*

Емкость конденсатора:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U} \quad (5.4.5)$$

- ▶ Найдем формулу для емкости плоского конденсатора.
- ▶ Напряженность между обкладками равна

$$E = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon S} \quad (5.4.6)$$

где:  $S$  – площадь пластин (обкладок);  $q$  – заряд конденсатора

$$U = Ed = \frac{qd}{\varepsilon_0 \varepsilon S},$$

$$(5.4.7) \quad C = \frac{q}{U} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$$

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика между обкладками.

- ▶ Как видно из формулы, диэлектрическая проницаемость вещества очень сильно влияет на емкость конденсатора. Это можно увидеть и экспериментально: заряжаем электроскоп, подносим к нему металлическую пластину – получили конденсатор (за счет электростатической индукции, потенциал увеличился).

- ▶ Вносим между пластинами диэлектрик с  $\epsilon$ , больше чем у воздуха и потенциал конденсатора изменяется.
- ▶ Отсюда можно получить единицы измерения  $\epsilon_0$ :

$$\epsilon_0 = \frac{Cd}{\epsilon S}$$

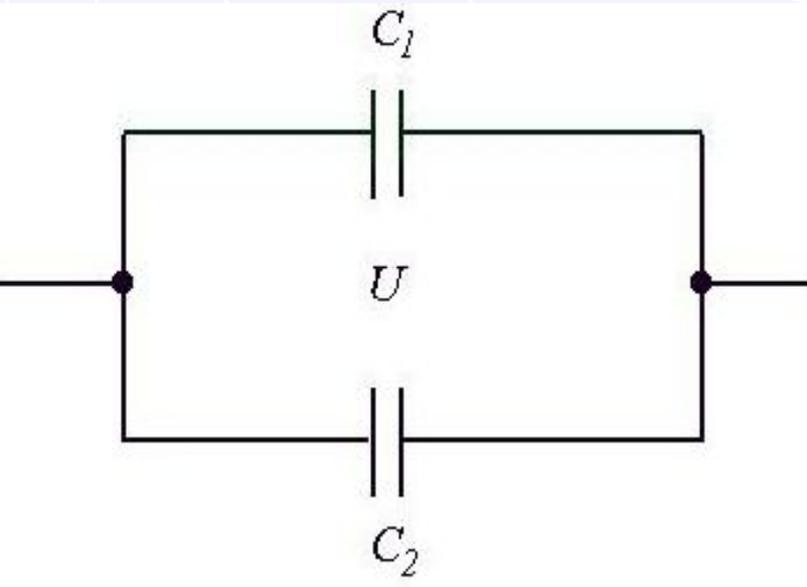
$$[\epsilon_0] = \frac{[C] \cdot [d]}{[S]} = \frac{\Phi \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = \frac{\Phi}{\text{м}}$$

Помимо емкости каждый конденсатор характеризуется  $U_{\text{раб}}$  (или  $U_{\text{пр.}}$  – максимальное допустимое напряжение).

## 5.4.2. Соединение конденсаторов

**Емкостные батареи** – комбинации параллельных и последовательных соединений конденсаторов.

### 1) Параллельное соединение (рис. 5.6):



Общим является напряжение  $U$

$$q_1 = C_1 U;$$

$$q_2 = C_2 U;$$

Суммарный заряд:

$$q = q_1 + q_2 = U(C_1 + C_2). \quad (5.4.9)$$

Результирующая емкость:

$$C = \frac{q}{U} = C_1 + C_2 \quad (5.4.10)$$

Сравните с параллельным соединением сопротивлений  $R$ :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (5.4.11)$$

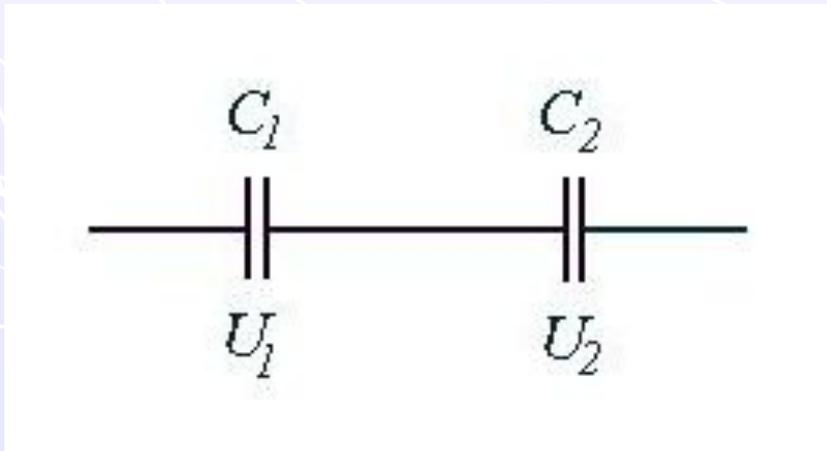
Таким образом, при параллельном соединении конденсаторов, их емкости складываются.

## 2) Последовательное соединение :

Общим является заряд  $q$

$$U_1 = \frac{q}{C_1}; \quad U_2 = \frac{q}{C_2};$$

$$U = \sum U_i = q \sum \frac{1}{C_i} \quad (5.4.12)$$



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

$$\frac{1}{C} = \sum \frac{1}{C_i} \quad (5.4.14)$$

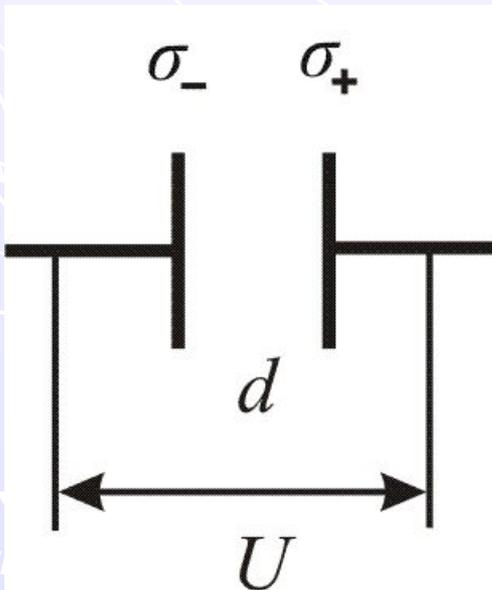
$$R = R_1 + R_2 \quad (5.4.13)$$

## 5.4.3. Расчет емкостей различных конденсаторов

### 1. Емкость плоского конденсатора.

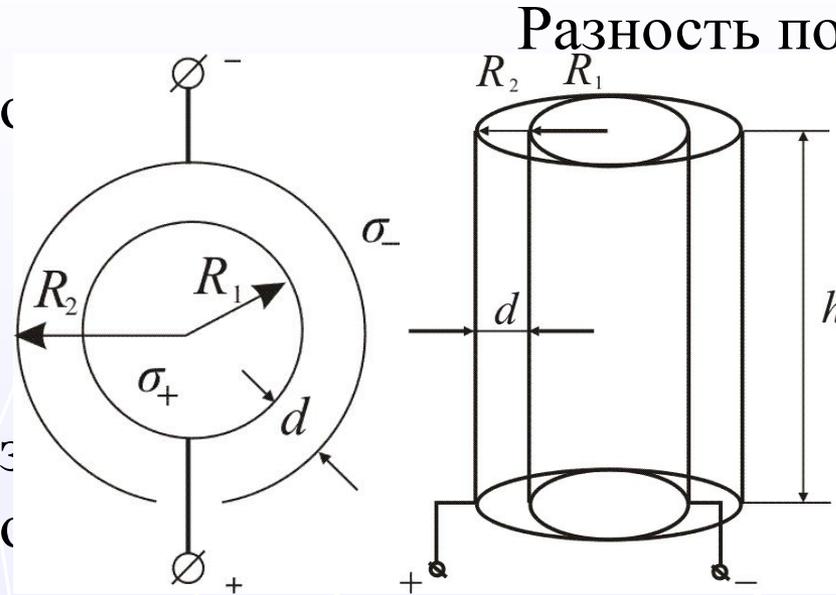
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}; \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \int_{x_2}^{x_1} E dx = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon} d$$

где  $d = x_2 - x_1$  – расст. м/у пластинами.  
Так как заряд  $q = \sigma S$ , то



$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \stackrel{(5.4.16)}{=} \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{d}$$

# 1. Емкость цилиндрического конденсатора.



Разность потенциалов между  
 конденсатора  
 (5.4.17)  

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

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

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

$$(5.4.18) \quad \Delta\varphi = \frac{l\lambda \ln \frac{R_2}{R_1}}{2\pi\epsilon_0\epsilon l} = \frac{q}{C}$$

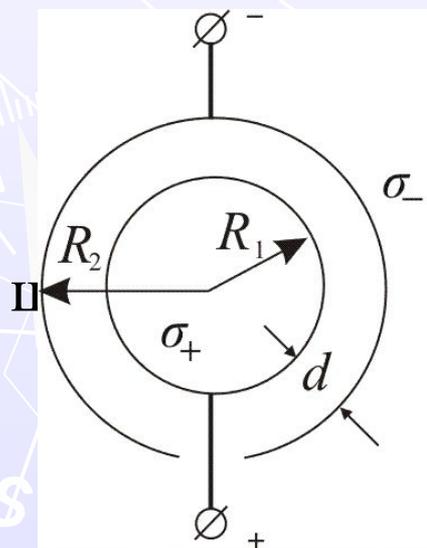
(5.4.19)

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

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

$$C_{\text{цил.}} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1} \approx \epsilon_0\epsilon \frac{S}{d}$$

### 3. Емкость шарового конденсатора.



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

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

$$\Delta\varphi = \frac{q}{C}, \quad C = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$

Рис. 5.10

В шаровом конденсаторе  $R_1 \approx R_2$ ;  $S = 4\pi R_2$ ;  $R_2 - R_1 = d$  – расстояние между обкладками. Тогда

$$C_{\text{шар.}} = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R^2}{d} = \varepsilon_0\varepsilon \frac{S}{d}.$$

Таким образом, емкость шарового конденсатора,

$$C_{\text{шар.}} = \varepsilon_0\varepsilon \frac{S}{d},$$

что совпадает с емкостями плоского и цилиндрического конденсатора.

## 5.4.4. Энергия заряженного конденсатора

Если замкнуть обкладки конденсатора, то по проволоке потечет ток, который может даже расплавить ее. Значит, конденсатор запасает энергию. Вычислим ее.

Конденсатор разряжается  $U'$  – мгновенное значение напряжения на обкладках. Если при этом значении напряжения между обкладками проходит заряд  $dq$ , то *работа*

$$dA = U'dq. \quad (5.4.24)$$

*Работа равна убыли потенциальной энергии конденсатора:*

$$dA = -dWc. \quad (5.4.25)$$

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

$$A = \int dA.$$

$$A = -W_c = C \int_U^0 U dU \stackrel{(5.4.26)}{=} \frac{1}{2} CU^2$$

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

Энергию конденсатора можно посчитать и по другим формулам:

$$W_c = \frac{q^2}{2C} \stackrel{(5.4.28)}{=} \frac{1}{2} qU$$

Где же сосредоточена энергия конденсатора? На обкладках? То есть на зарядах? А может, в пространстве между обкладками? Только опыт может дать ответ на этот вопрос.

В пределах электростатики дать ответ на этот вопрос невозможно. Поля и заряды, их образовавшие не могут существовать обособленно. Их не разделить. Однако переменные поля могут существовать независимо от возбуждавших их зарядов (излучение солнца, радиоволны, ...) и они переносят энергию. Эти факты заставляют признать, что носителем энергии является электростатическое поле.