

Електростатика

3.1. Електричний заряд. Закон Кулона. Напруженість електростатичного поля, принцип суперпозиції електричних полів.

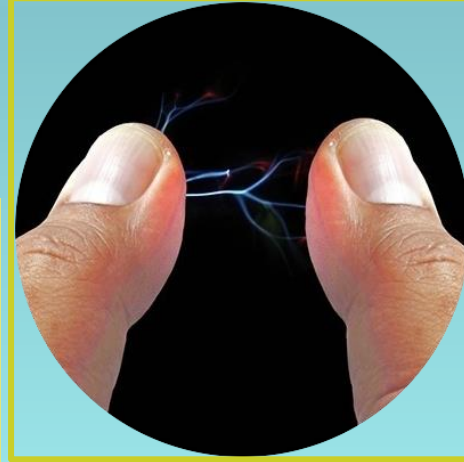
3.2. Потік вектора напруженості електростатичного поля. Теорема Гаусса. Електричне поле заряджених нескінченних нитки та площини

3.3. Робота електростатичного поля. Потенціал електростатичного поля. Циркуляція напруженості електростатичного поля. Зв'язок між напруженістю і потенціалом електростатичного поля

3.4. Електричний диполь. Поляризація діелектриків, характеристики їх поляризованого стану. Вектор електричного зсуву. Сегнетоелектрики. П'єзоелектричний ефект.

3.5. Провідники в електростатичному полі. Електроємність провідника, конденсатора. Енергія електростатичного поля

Електростатика



1. Вимірювання фізичних величин з високою точністю у ручному й автоматичному режимах забезпечують:

- **електровимірювальні прилади** (амперметри, вольтметри, ватметри, омметри, електрлічильники тощо).
- **вимірювальні перетворювачі** (шунти, дільники напруги, вимірювальні трансформатори, терморезистори, термопари, тензорезистори, ємнісні й індуктивні перетворювачі та ін.),
- **електровимірювальні установки та вимірювальні інформаційні системи.**

2. Для перетворення електричної енергії одного класу напруги або струму на інший клас напруги або струму використовують **трансформатори**, для взаємоперетворення механічної та електричної енергії – **електричні машини** (генератори та електродвигуни).

3. Засобами автоматизації і контролю виробничих процесів є **напівпровідникові прилади**, які широко застосовуються у різних пристроях, зокрема в системах керування електроприводами будівельних машин і механізмів (регулювання швидкості у димососах котельень, ліфтах, підйомних і транспортних механізмах тощо). До напівпровідникових приладів належать **напівпровідникові діоди, тиристори і транзистори**, що застосовуються у випрямлячах, підсилювачах, інверторах, згладжувальних фільтрах, електричних приводах.

4. Ручне або автоматичне зварювання контактним або електродуговим методом у повітряному чи інертно газовому середовищах здійснюється за допомогою **електрообладнання зварювальних установок.**

5. У виготовленні залізобетонних виробів важливе значення мають **електропрогрів бетону і ґрунту** електродним, індукційним, інфрачервоним методами або непрямим методом теплової обробки та методом електропропарювання.

6. Ефективна експлуатація промислових і житлових об'єктів забезпечується **електрообладнанням інженерних систем будівель.**

7. Найсучаснішими системами устаткування приватного житла є системи типу “розумний будинок”, у яких передбачено утримання будинку за допомогою програмовано-автоматизованих систем керування.

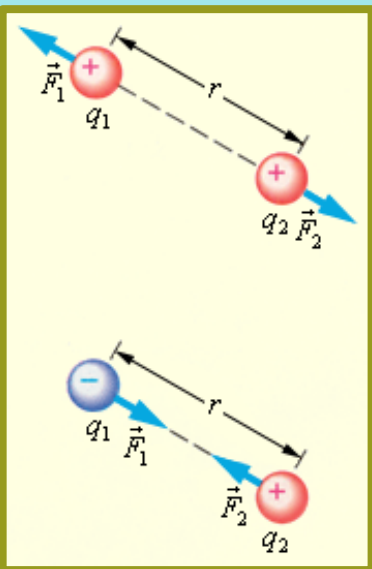
3.1. Електричний заряд. Закон Кулона.

Електричний заряд – одна з фундаментальних властивостей матерії, що не існує окремо від носіїв заряду та кількісно характеризує здатність носіїв заряду вступати в електромагнітну взаємодію та визначає сили та енергію такої взаємодії.

Експериментально встановлено, що в природі є всього два види електричних зарядів – **позитивні і негативні**.

Одноіменні заряди відштовхуються, а різноіменні притягуються.

Носієм найменшого негативного елементарного заряду є електрон, а найменшого позитивного – протон.



Величину найменшого елементарного заряду визначив дослідним шляхом Р. Міллікен:

$$|q_e| = |q_p| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Властивості заряду:

1. Інваріантність елементарного заряду: числове значення заряду не залежить від стану інерціальних систем відліку, в яких він визначається

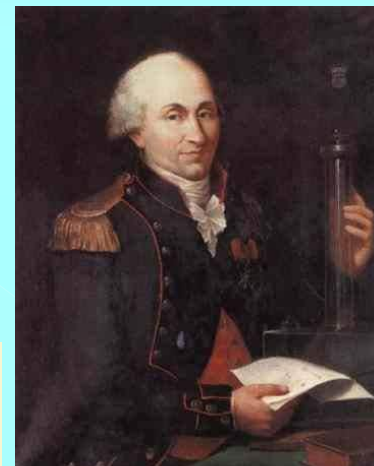
2. Дискретність – загальний заряд матеріального об'єкту дорівнює добутку елементарного заряду на кількість заряджених частинок:

$$q = N \cdot q_e$$

3. Закон збереження електричного заряду:

В усіх процесах взаємоперетворень **повний електричний заряд** замкненої системи є величиною постійною, яка дорівнює **алгебраїчній сумі** її позитивних та негативних зарядів.

$$\sum_{i=1}^N q_i = \text{const}$$

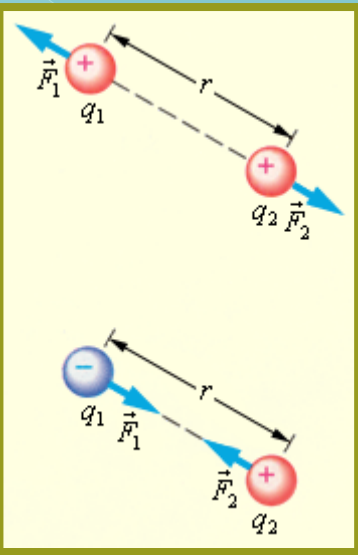


Кулон Шарль

3.1. Електричний заряд. Закон Кулона.

Закон взаємодії *нерухомих точкових* зарядів у вакуумі називається *законом Кулона*:

сила взаємодії двох нерухомих точкових зарядів у вакуумі прямо пропорційна добутковій величин цих зарядів q_1 і q_2 , обернено пропорційна квадратові відстані r між ними та спрямована вздовж прямої, що сполучає ці заряди.



$$F_0 = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

k – коефіцієнт пропорційності.

в СІ

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

електрична стала

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

Дослідження взаємодії двох нерухомих точкових зарядів виконали незалежно один від одного Г. Кавендіш у 1772 р., результати досліджень якого були опубліковані лише у 1879 р., і Ш. Кулон у 1785 р.

Після вміщення двох точкових зарядів у будь-яке непровідне середовище *сила їхньої взаємодії зменшується* через явище поляризації діелектричного середовища.

Явище поляризації полягає у відносному зміщенні заряджених частинок атомів молекул (електронів і ядер) під впливом електричного поля зарядів, вміщених у діелектричне середовище.

Кількісний вплив середовища на взаємодію між зарядами враховують введенням *відносної діелектричної проникності середовища* – величини, що відображає, *в скільки разів сила взаємодії точкових електричних зарядів у вакуумі більша, ніж сила їхньої взаємодії у середовищі, що є безрозмірною величиною*

$$\epsilon = \frac{\vec{F}_0}{\vec{F}}$$

Закон Кулона щодо взаємодії двох точкових зарядів у середовищі у *векторній формі* має вигляд:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{\epsilon r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$$

\vec{r} – радіус-вектор, проведений до того заряду, на який визначається дія з силою \vec{F}

3.1. Електричне поле. Напруженість електростатичного поля, силові лінії поля, принцип суперпозиції електричних полів.

Електричне поле – особливий вид матерії, що є складовою загального електромагнітного поля, яке створюється **зарядженими частинками, зарядженими тілами** або **змінним у часі магнітним полем**, через яке відбувається електрична взаємодія.

Електростатичне поле – це електричне поле, що утворюється нерухожими зарядами, тобто не змінюється з часом.

Електричне поле має дві характеристики: силову – **напруженість** \vec{E} та енергетичну – **потенціал** φ

Напруженість електростатичного поля – векторна фізична величина, що є силовою характеристикою електричного поля, **чисельно дорівнює силі**, з якою електричне поле в певній точці простору діє **на одиничний позитивний пробний заряд**.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Одиницею вимірювання напруженості є 1 В/м, про це свідчать такі перетворення: $1 \text{ Н/Кл} = 1 (\text{Н} \cdot \text{м}) / (\text{Кл} \cdot \text{м}) = 1 \text{ Дж} / (\text{Кл} \cdot \text{м}) = 1 \text{ В/м}$.

Пробним зарядом називають позитивний точковий, досить малий заряд, значення якого не буде спотворювати початкового характеру поля своїм власним полем

Одержимо формулу напруженості електростатичного поля **точкового заряду** q на відстані r :

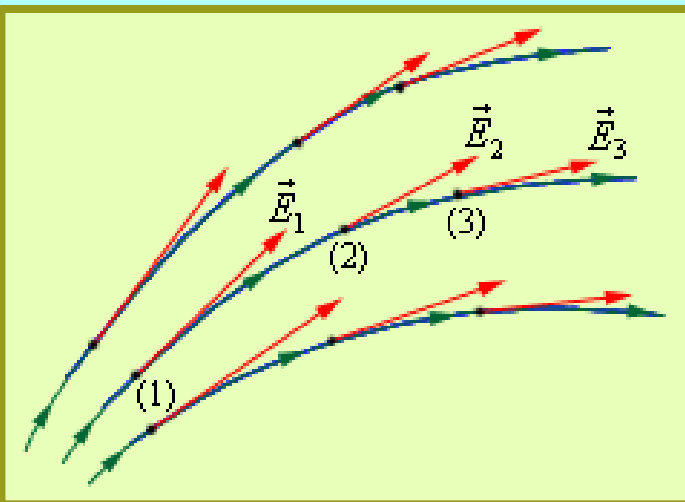
$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot q_0}{\epsilon r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$$

Отже:

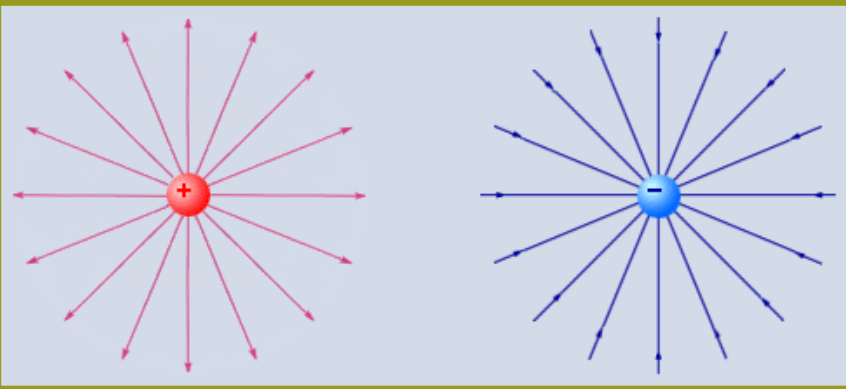
$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

Для графічного зображення картини поля навколо заряду чи системи зарядів використовують **силові лінії** (або **лінії напруженості**) **електростатичного поля** – лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектора напруженості \vec{E}

Щільність силових ліній характеризує модуль вектора напруженості електростатичного поля $|\vec{E}|$



3.1. Напруженість електростатичного поля, силові лінії поля, принцип суперпозиції електричних полів.



Найпростіший вигляд має картина силових ліній електростатичного поля:

1. Точкових зарядів, силові лінії **позитивних** зарядів «виходять» із заряду і «напрявлені» у нескінченність, негативних – «напрявлені» з нескінченності і «входять» у заряд.
2. Системи двох точкових рівновеликих зарядів, різних за знаками, силові лінії завжди беруть початок на позитивних зарядах і закінчуються на негативних.

Для визначення **конфігурації** та напруженості електростатичного поля **системи точкових нерухомих зарядів** застосовують **принцип суперпозиції електростатичних полів**:

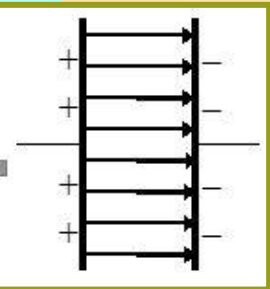
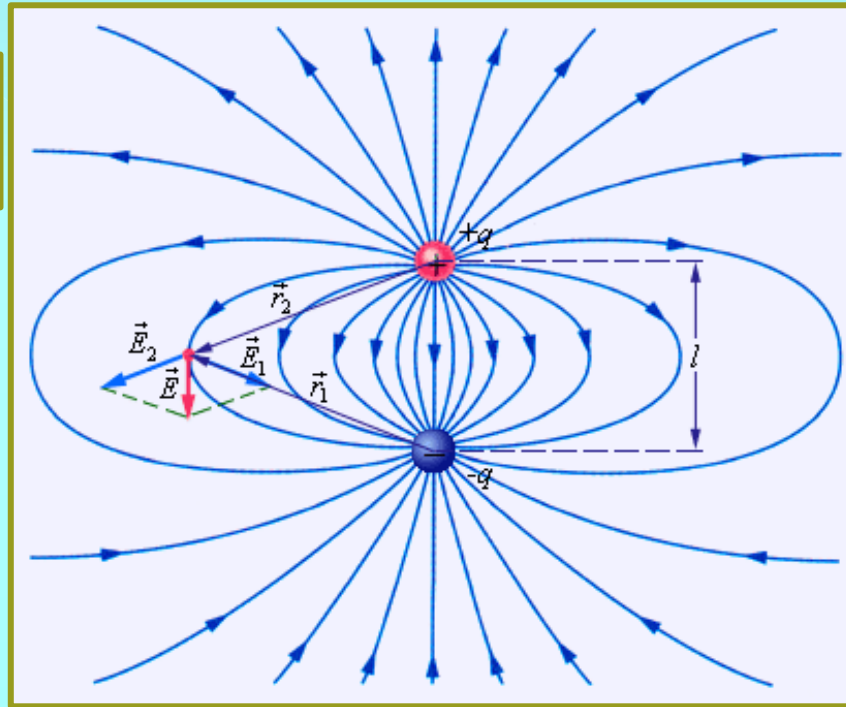
Напруженість електростатичного поля системи зарядів дорівнює **векторній сумі** напруженостей, створених у цій точці поля окремими точковими зарядами системи:

$$\vec{E}_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

Окремим випадком електростатичного поля є **однорідне електростатичне поле** – поле, величина й напрям вектора напруженості якого однакові в кожній точці поля:

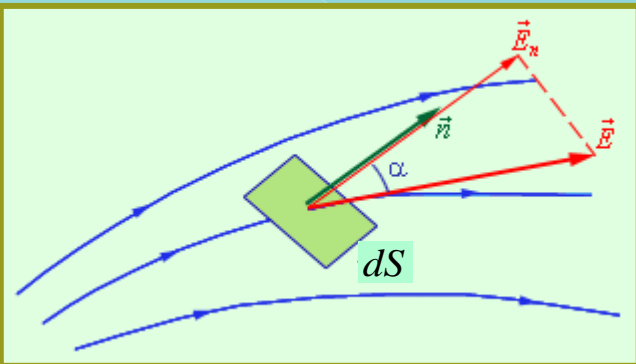
$$\vec{E} = \text{const}$$

Прикладом однорідного електростатичного поля є поле плоского зарядженого конденсатора, картина силових ліній якого має вигляд паралельних прямих



3.2. Теорема Гаусса для електростатичних полів та її застосування

Потоком вектора напруженості електростатичного поля $d\Phi_E$ через елементарну поверхню dS називають скалярну фізичну величину, яка чисельно дорівнює скалярному добутку вектора напруженості \vec{E} на елемент цієї поверхні:



$$d\Phi_E = (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = E \cdot dS \cdot \cos(\vec{E}, \vec{n})$$

\vec{n} – одиничний вектор нормалі до поверхні dS

Якщо поле неоднорідне і поверхня не плоска, то її уявно поділяють на елементи dS які наближено можна вважати плоскими, а поле в її межах – однорідним.

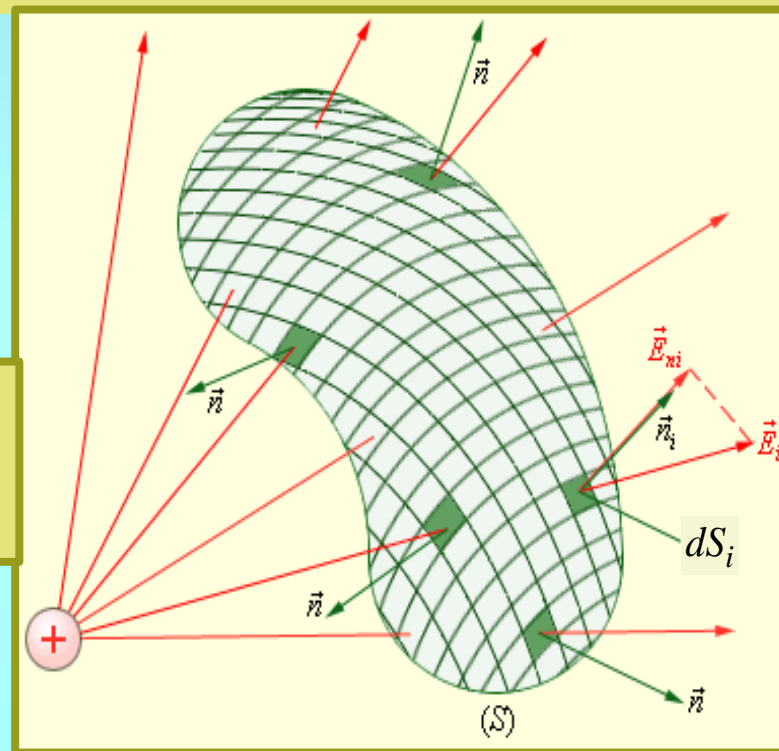
Повний потік вектора напруженості електростатичного поля через поверхню обчислюється як поверхневий інтеграл:

$$\Phi_E = \int_S E \cdot dS \cdot \cos(\vec{E}, \vec{n}) = \int_S E_n \cdot dS$$

E_n – проекція вектора напруженості \vec{E} на нормаль \vec{n}

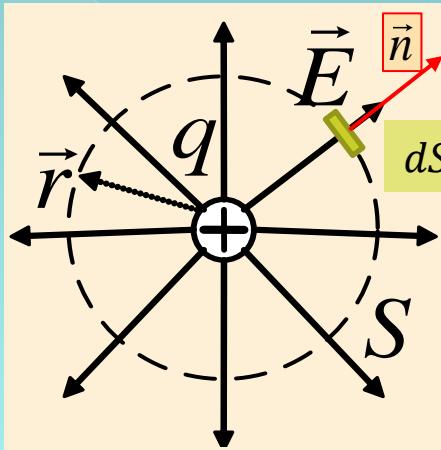
Теорема Гаусса: потік вектора напруженості електростатичного поля через довільну замкнену поверхню в однорідному непровідному діелектрику дорівнює алгебраїчній сумі електричних зарядів, обмежених цією поверхнею, поділений на $\epsilon\epsilon_0$:

$$\Phi_E = \oint_S (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i$$



3.2. Теорема Гаусса для електростатичних полів та її застосування

Приклад 1. Електричне поле точкового заряду.



$$\Phi_E = \oint_S (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i$$

Для обчислення вектора напруженості електричного поля із застосуванням теореми Гаусса в електричному полі необхідно **обрати таку замкнену поверхню**, щоб розв'язати задачу як можна простіше.

Для **поля точкового заряду** такою поверхнею є сфера радіуса r із центром у точці розміщення заряду, яка охоплює заряд q .

Повний потік вектора напруженості електростатичного поля через обрану сферичну поверхню

$$\Phi_E = \oint_S (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = E \cdot \oint_{4\pi r^2} dS = 4\pi r^2 E$$

За теоремою Гаусса отримаємо:

$$\Phi_E = 4\pi r^2 E = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0}$$

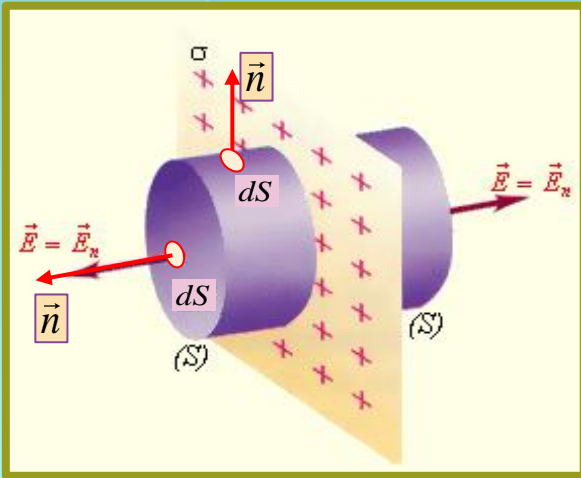
Звідси

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$$

Даний вираз повністю збігається із формулою визначення напруженості електричного поля точкового заряду

3.2. Теорема Гаусса для електростатичних полів та її застосування

Приклад 2. Електричне поле рівномірно зарядженої нескінченної площини.



Площину можна вважати нескінченною, якщо відстанню від точки, в якій визначають напруженість електростатичного поля, до площини можна нехтувати з огляду на її геометричні розміри.

Нехай дана площина заряджена рівномірно з поверхневою густиною заряду:

$$\sigma = \frac{dq}{dS}$$

Для обчислення за теоремою Гаусса раціонально обрати **замкнену поверхню у вигляді прямого циліндра**, розміщеного симетрично відносно зарядженої площини, з основами, що мають площу S , паралельними їй.

Потік вектора напруженості через циліндричну поверхню:

$$\Phi_E = \oint_S (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = \oint_{S_{\text{бічн. пов.}}} EdS \underbrace{\cos(\vec{E}, \vec{n})}_{=0} + 2 \oint_{S_{\text{основи}}} EdS \underbrace{\cos(\vec{E}, \vec{n})}_{=1} = 2ES$$

За теоремою Гаусса:

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{\sigma S}{\epsilon\epsilon_0}$$

Прирівняємо праві частини останніх рівнянь:

$$2ES = \frac{\sigma S}{\epsilon\epsilon_0}$$

Напруженість поля поблизу рівномірно зарядженої нескінченної площини:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}$$

Для напруженості поля двох рівномірно заряджених площин (**поле плоского конденсатора**)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$$

3.2. Теорема Гауса для електростатичних полів та її застосування

Приклад 3. Електричне поле рівномірно зарядженого нескінченного провідника.

Нехай нескінченний провідник заряджений рівномірно з лінійною густиною заряду:

$$\tau = \frac{dq}{dl}$$

Для обчислення напруженості поля провідника виберемо замкнену поверхню у вигляді прямого циліндра з довжиною l і радіусом r , розміщеного концентрично відносно зарядженого провідника.

Потік вектора напруженості через циліндричну поверхню:

$$\Phi_E = \oint_{S_{\text{бічн.пов.}}} E dS \underbrace{\cos(\vec{E}, \vec{n})}_{=1} + 2 \oint_{S_{\text{основи}}} E dS \underbrace{\cos(\vec{E}, \vec{n})}_{=0} = ES_{\text{бічн.пов.}} = E \cdot 2\pi r l$$

За теоремою Гауса:

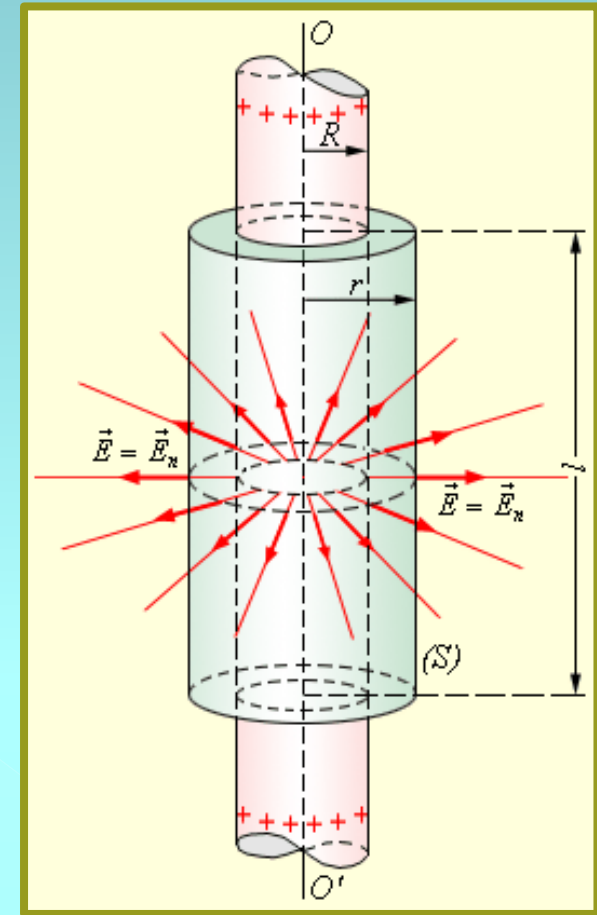
$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{\tau l}{\epsilon\epsilon_0}$$

Прирівняємо праві частини останніх рівнянь:

$$2\pi r l E = \frac{\tau l}{\epsilon\epsilon_0}$$

Напруженість поля на відстані від рівномірно зарядженого нескінченного провідника:

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

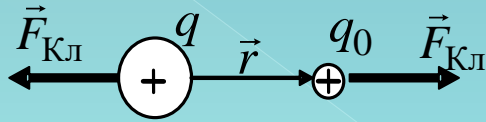


Вектор електричного зміщення (індукції електростатичного поля) \vec{D} є так само силовою характеристикою електростатичного поля, але, на відміну від напруженості **індукцію** створюють лише вільні електричні заряди. Тобто його значення не залежить від середовища, в якому розміщені ці заряди:

$$\vec{D} = \epsilon\epsilon_0 \vec{E}$$

3.3. Робота електростатичного поля.

Потенціал електростатичного поля, еквіпотенціальні поверхні.



Знайдемо роботу кулонівських сил електричного поля заряду q , виконану над зарядом q_0 з даної точки у нескінченність:

Покладемо, що потенціальна енергія на нескінченності $W_{\Pi}(\infty) = 0$, тоді:

$$A_{r\infty} = \int_r^{\infty} (\vec{F}_{\text{Кл}} \cdot d\vec{r}) = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_r^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(-\frac{1}{r} \right) \Big|_r^{\infty} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

Отже, **потенціальна енергія** заряду q_0 в даній точці електричного поля заряду q :

$$W_{\Pi} = \frac{q \cdot q_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

Потенціалом називають скалярну фізичну величину, що є енергетичною характеристикою електростатичного поля, чисельно рівну потенціальній енергії одиничного позитивного заряду, розміщеного в даній точці поля:

$$\varphi = \frac{W_{\Pi}}{q_0} \left[1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right] = [\text{В}]$$

Отже потенціал поля точкового позитивного заряду q на відстані r .

$$\varphi_r = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

Потенціал у даній точці поля $\varphi(r)$ чисельно дорівнює роботі сил поля при переміщенні пробного одиничного позитивного заряду із даної точки поля у нескінченність.

$$\varphi(r) = \frac{W_{\Pi}(r) - W_{\Pi}(\infty)}{q_0} = \frac{A_{r\infty}}{q_0}$$

Потенціал – величина **адитивна**, тобто потенціал поля, створеного системою зарядів, дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів, створених у цій точці кожним зарядом окремо:

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i$$

Різниця потенціалів між двома точками поля 1 і 2 визначається роботою сил електричного з переміщення пробного одиничного позитивного заряду між ними:

$$\Delta\varphi_{12} = \frac{A_{12}}{q_0}$$

3.3. Робота електростатичного поля.

Потенціал електростатичного поля, еквіпотенціальні поверхні.

Різниця потенціалів між двома точками 1 і 2 поблизу точкового заряду:

$$\Delta\varphi_{12} = \frac{A_{12}}{q_0} = \frac{A_{1\infty} - A_{\infty 2}}{q_0} = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

З цієї формули випливає, що різниця потенціалів **не залежить від форми траєкторії** переміщення заряду силами поля між точками 1 – 2, а визначається лише початковим і кінцевими положенням точок.

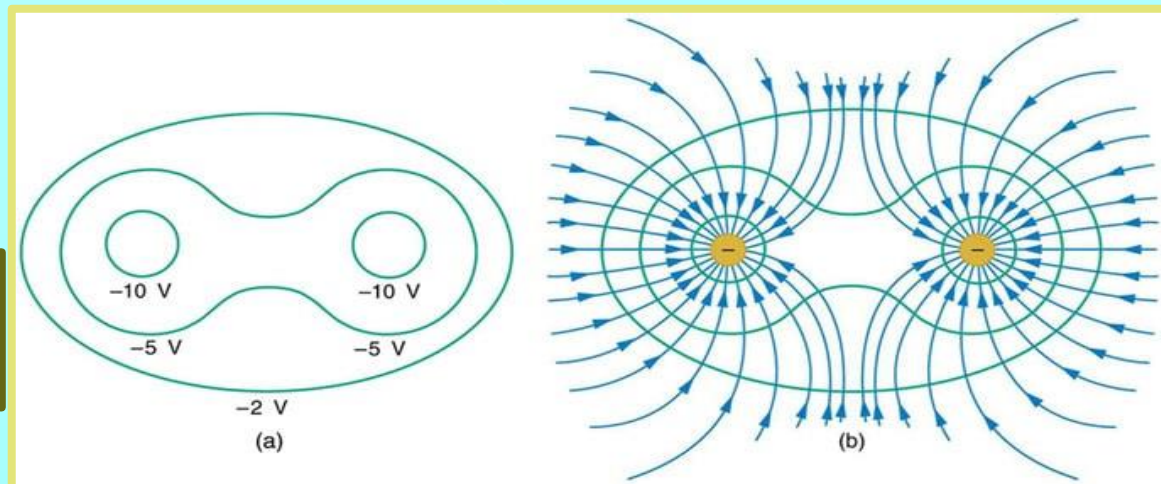
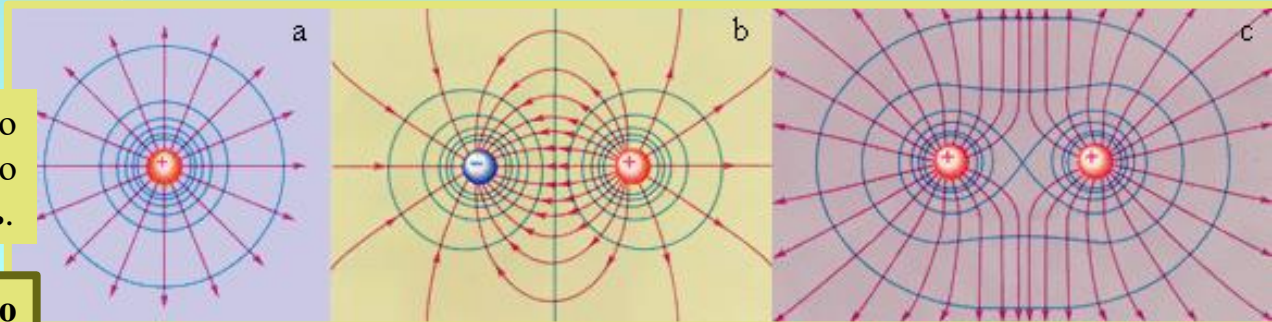
Таку властивість мають **потенціальні поля**, тому **електростатичне поле теж є потенціальним**.

Графічно картину електростатичного поля можна зобразити за допомогою системи еквіпотенціальних поверхонь.

Еквіпотенціальною поверхнею називають геометричне місце точок поля, потенціали яких є однаковими:

$$\varphi(r) = \text{const}$$

Силкові лінії напруженості завжди перпендикулярні до еквіпотенціальних поверхонь.



3.3. Робота електростатичного поля.

Теорема про циркуляцію вектора напруженості електричного поля.

Повна робота під час переміщення точкового заряду в електричному полі:

$$A_{1,2} = \int_{r_1}^{r_2} (\vec{F}_{\text{кл}} \cdot d\vec{r}) = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(-\frac{1}{r} \right) \Big|_{r_1}^{r_2} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1} - \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_2} = q_0 \left(\frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1} - \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_2} \right)$$

Повна робота під час переміщення точкового заряду в електричному полі дорівнює **різниці потенціалів** між двома положеннями точкового заряду в цьому полі:

$$A_{1,2} == q_0 (\varphi_1 - \varphi_2)$$

Або робота вздовж довільного замкненого контуру дорівнює нулеві:

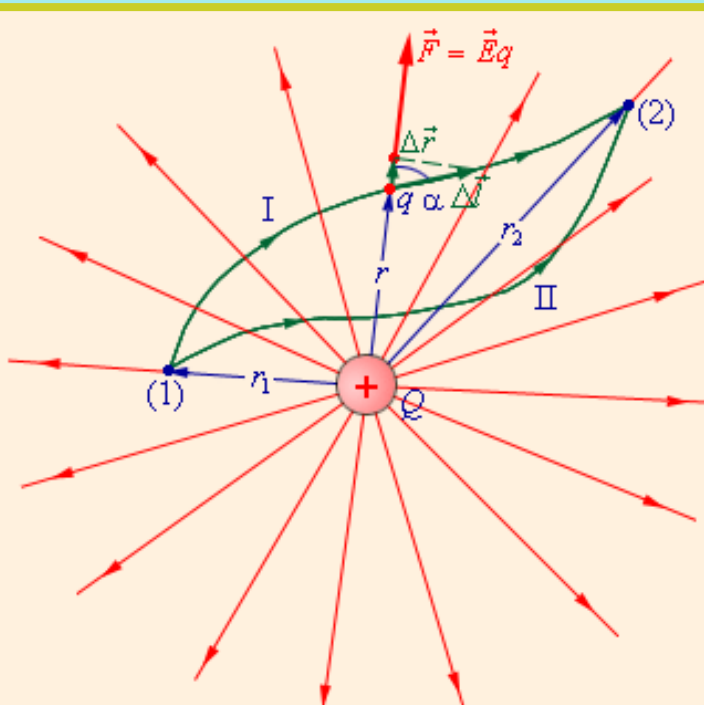
$$A_{12} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Математично цю умову можна записати так:

$$A = \oint_L (\vec{F}_{\text{кл}} \cdot d\vec{r}) = \oint_L q_0 E \cdot \underbrace{dl \cos \alpha}_{dr} = q_0 \oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$$

Оскільки $q_0 \neq 0$, то

$$\oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = 0$$



Лінійний інтеграл обчислений за довільним замкненим контуром L називають **циркуляцією вектора напруженості електричного поля**.

Теорема про циркуляцію вектора напруженості електричного поля (умова потенціальності електростатичного поля): векторне поле напруженості \vec{E} називається потенціальним, якщо циркуляція вектора по довільно замкненому контуру дорівнює нулеві.

Цей запис потенціальності електростатичного поля є **одним з фундаментальних рівнянь електростатики**, яке відображає той факт, що **силові лінії електростатичного поля є незамкненими**: вони починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних або спрямовуються в нескінченність (для позитивних зарядів) чи з нескінченності (для негативних).

3.3. Зв'язок між напруженістю і потенціалом електростатичного поля

Оскільки напруженість і потенціал за фізичним змістом є різними характеристиками тих самих точок поля, між ними має бути зв'язок.

Для цього **визначимо роботу** з перенесення пробного заряду q_0 між точками 1 і 2 однорідного електростатичного поля **двома різними способами**

1. Елементарна робота з переміщення заряду визначається різницею потенціалів:

$$dA_{12} = -q_0 \cdot d\varphi$$

2. Силою Кулона (напруженістю електричного поля):

$$dA_{12} = F_{\text{кл}} \cdot dr = q_0 E \cdot dr$$

Прирівняємо праві частини останніх рівнянь:

$$-q_0 \cdot d\varphi = q_0 E \cdot dr$$

Тоді:

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}$$

або у векторному вигляді:

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\varphi$$

де

$$\overrightarrow{\text{grad}} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$$

– оператор градієнта

Знак мінус означає, що вектор напруженості електростатичного поля спрямований у бік зменшення потенціалу.

Різниця потенціалів електростатичного поля між двома точками:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 (\vec{E}_{\text{кл}} d\vec{l})$$

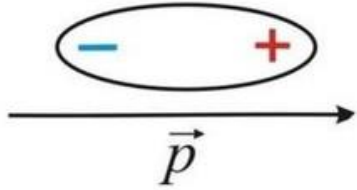
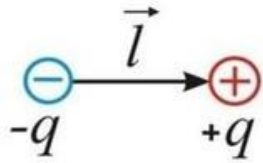
Для однорідного поля напруженість за абсолютним значенням:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U}{d}$$

де d – відстань між точками з потенціалами φ_1 та φ_2 .

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 \quad \text{– напруга.}$$

3.4. Електричний диполь.



Електричним диполем називають одну з найпростіших систем точкових зарядів, що складається з двох однакових за абсолютним значенням і протилежних за знаком точкових зарядів $+q$ та $-q$ розміщених на деякій відстані \vec{l} – **плеча диполя**, яке є вектором, проведеним від негативного до позитивного заряду.

Основною характеристикою диполя є **електричний дипольний момент** \vec{p} – векторна фізична величина, що чисельно дорівнює добутку заряду на плече диполя

Вектор дипольного моменту направлений від негативного заряду до позитивного. Одиницею вимірювання електричного дипольного моменту є 1 Кл·м.

$$\vec{p} = q\vec{l}$$

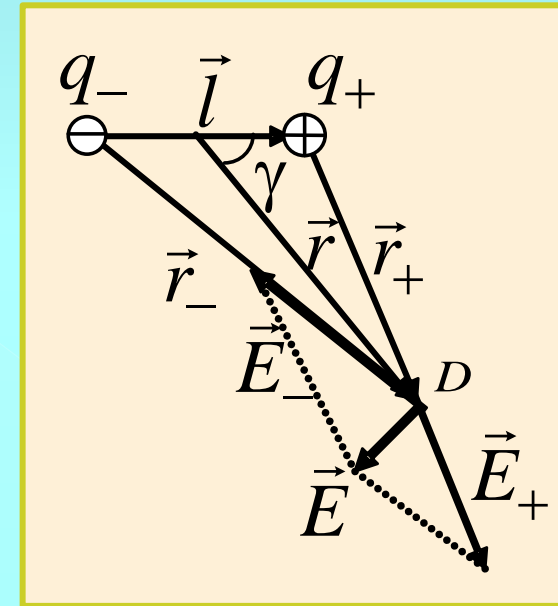
Диполь – електрично нейтральна система, але навколо нього є електричне поле.

Обчислимо напруженість електричного поля диполя E_D у довільній точці простору на відстані від центру диполя $r \gg l$.

Згідно з **принципом суперпозиції електростатичних полів**:

$$E_D = |\vec{E}_+ + \vec{E}_-| = \left| \frac{kq\vec{r}_+}{r_+^3} - \frac{kq\vec{r}_-}{r_-^3} \right| = kq \left| \frac{\vec{r} - \vec{l}/2}{(\vec{r} - \vec{l}/2)^3} - \frac{\vec{r} + \vec{l}/2}{(\vec{r} + \vec{l}/2)^3} \right| = kq \left| \frac{2\left(\vec{l} + 3l\vec{r} \cos \frac{\gamma}{2}\right)}{r^3} \right|$$

$$E_D = \frac{p\sqrt{1 + 3\cos^2 \gamma}}{r^3}$$

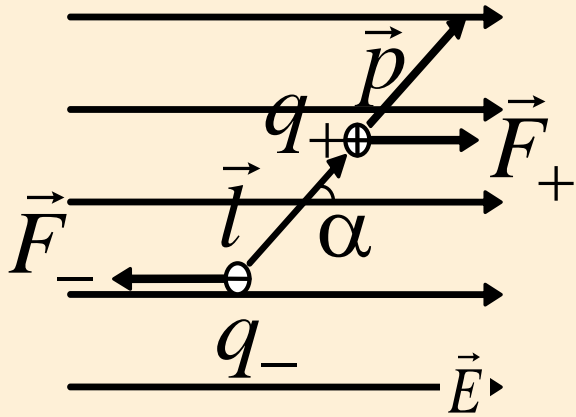


де γ – кут між віссю диполя і напрямом на обрану точку в просторі, або кут між векторами \vec{l} та \vec{r} .

3.4. Диполь у зовнішньому електричному полі

Розмістимо диполь в *однорідному* електричному полі.

Сили, що діють на позитивний і негативний заряди диполя, є однаковими за значенням і протилежними за напрямом $|\vec{F}_+| = |F_-|$, тобто утворюють пару сил.



Їхня рівнодійна дорівнює нулеві, тому переміщення диполя вздовж поля ці сили не викликають.

Орієнтація диполя вздовж ліній напруженості поля зумовлюється дією моменту пари сил:

$$M = \left(F_+ \frac{l}{2} + F_- \frac{l}{2} \right) \sin \alpha = qEl \sin \alpha$$

Отже, в однорідному електричному полі на диполь діє пара сил, яка намагається повернути диполь так, щоб кут між векторами \vec{p} та \vec{E} зменшився і *диполь розвернувся вздовж поля*.

Якщо момент сил дорівнює нулеві, то диполь перебуває у рівновазі.

Існує два положення рівноваги диполя:

- стійка рівновага – диполь паралельний лініям напруженості $\alpha = 0$;
- нестійка рівновага – диполь антипаралельний лініям напруженості $\alpha = \pi$.

3.4. Диполь у зовнішньому електричному полі

Потенціальна енергія диполя в однорідному електричному полі напруженістю \vec{E} :

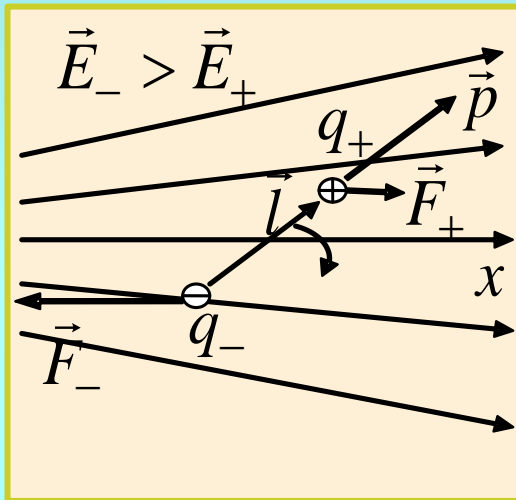
$$W_{\Pi} = q_+ \varphi_+ + q_- \varphi_- = q \Delta \varphi = qEl \cos \alpha$$

φ_+ та φ_- – потенціали точок поля, в яких знаходяться позитивний і негативний заряди відповідно

В загальній формі потенціальна енергія диполя дорівнює скалярному добутку:

$$W_{\Pi} = -(\vec{p} \cdot \vec{E})$$

Розмістимо диполь в *неоднорідному* електричному полі.



Сили, що діють на позитивний і негативний заряди диполя, є різними $|\vec{F}_-| > |\vec{F}_+|$ і їхня рівнодійна не дорівнює нулеві:

$$F = F_- - F_+ = qE - q \left(E - \frac{dE}{dx} l \right) = q \frac{dE}{dx} l$$

або у векторному вигляді:

$$\vec{F} = -\overrightarrow{\text{grad}} W_n$$

тоді

$$\vec{F} = \text{grad} (\vec{p} \cdot \vec{E})$$

Знак “-” вказує на те, що рівнодійна сил спрямована у бік зменшення потенціальної енергії.

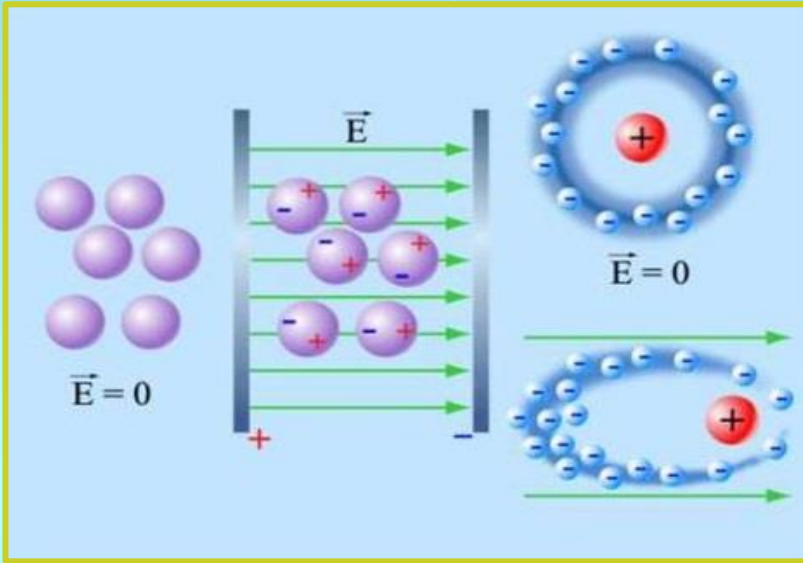
Таким чином, у *неоднорідному полі* на диполь, окрім моменту пари сил, діє ще сила у напрямі зростання напруженості поля, яка прагне **втягнути диполь** в сильнішу ділянку поля.

Цим пояснюється **притягання до наелектризованих тіл дрібних предметів**, на яких виникають індуковані заряди, які наближено можна вважати диполями

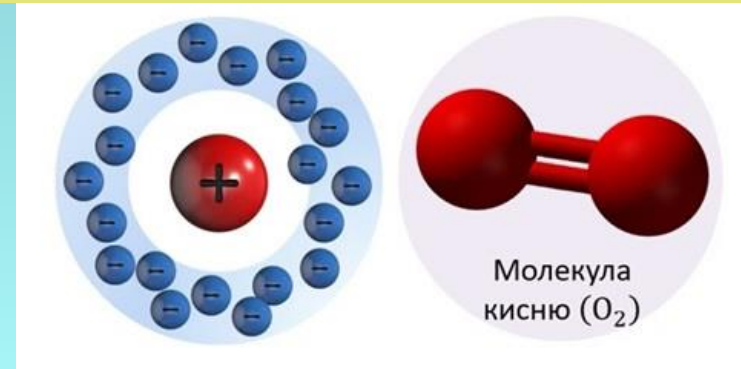
3.4. Поляризація діелектриків, характеристики їх поляризованого стану.

Діелектриком називають речовину, яка *не* проводить електричний струм за певних умов через **брак вільних носіїв заряду**.

Діелектрики відповідно до впливу на них електричного поля, поділяють на три групи: **неполярні; полярні; спонтанно поляризовані**



Неполярні – діелектрики, молекули яких до внесення в електричне поле *не мають дипольного моменту*, оскільки центри позитивних та негативних зарядів молекул збігаються (молекули мають певну симетрію)



Після внесення в електричне поле, „центри ваги” зарядів протилежного знаку зміщуються, неполярні молекули діелектрика **стають диполями**, тобто **виникає дипольний момент**, направлений вздовж силових ліній поля

Набуття діелектриком дипольного моменту під дією зовнішнього електричного поля поля називається **поляризацією**.

Для характеристики поляризації діелектриків в електричному полі вводять **вектор поляризації**, який дорівнює сумарному наведеному дипольному моменту діелектрика у одиниці об'єму:

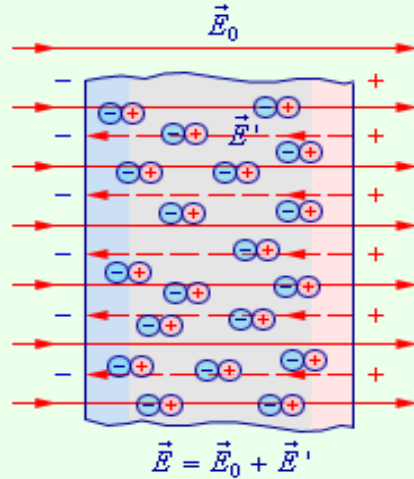
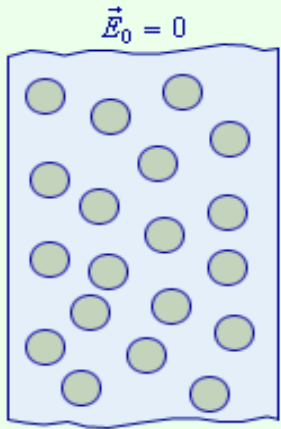
$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{p}_i}{\Delta V}$$

Вектор поляризації пов'язаний із напруженістю зовнішнього поля формулою:

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}$$

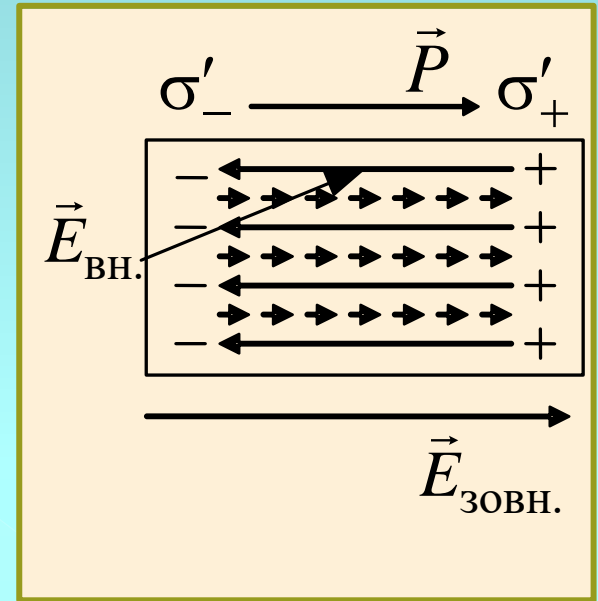
χ – діелектрична сприйнятливість діелектрика

3.4. Неполарні діелектрики.



Оскільки в електричному полі зміщуються переважно електрони через малу масу порівняно з масою ядер молекул, то *механізм поляризації неполярних діелектриків називають електронним* (іноді індукційним, оскільки дипольний момент наводиться, індукується зовнішнім полем).

Зовнішнє електростатичне поле напруженістю $\vec{E}_{\text{зовн.}}$ сприяє наведенню надлишкового заряду поверхневою густиною σ'_+ на одному боці діелектрика і σ'_- на протилежному.



Поверхнева густина заряду:

$$\sigma = \frac{dq}{dS}$$

Всередині діелектрика встановлюється власне електростатичне поле напруженістю $\vec{E}_{\text{вн.}}$, що *послаблює зовнішнє поле*, тому напруженість електричного поля всередині неполярного діелектрика внесеного у зовнішнє поле

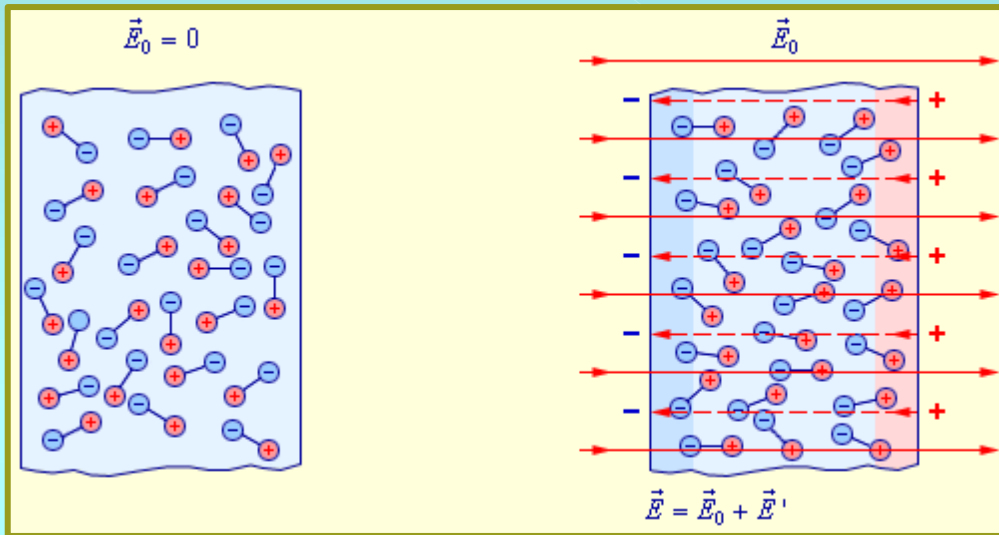
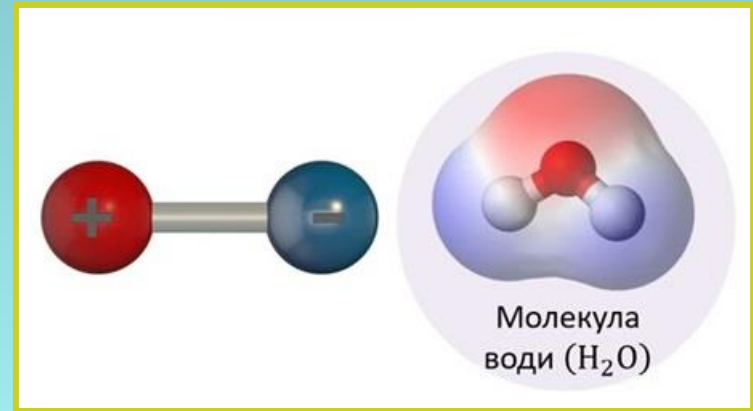
$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' < \vec{E}_0$$

$$\frac{\vec{E}_0}{\vec{E}'} = \epsilon > 1$$

До неполярних діелектриків належать: N_2 , H_2 , CO_2 , CH_4 тощо.

3.4. Полярні діелектрики.

Полярні – діелектрики, молекули яких за відсутності зовнішнього електричного поля мають дипольний момент, відмінний від нуля, оскільки характеризуються асиметричним розподілом заряду в об'ємі молекули через незбіг центрів позитивних і негативних зарядів



Механізм поляризації: у разі внесення полярного діелектрика в електричне поле відбувається **орієнтація диполів вздовж поля**, що призводить до появи сумарного дипольного моменту діелектрика, відмінного від нуля, такий механізм поляризації називають **дипольною**, або **орієнтаційною поляризацією**.

Зовнішнє поле аналогічно, як і в неполярних діелектриках, сприяє наведенню надлишкового поверхневого заряду, тому всередині діелектрика встановлюється власне поле.

Напруженість електричного поля всередині полярного діелектрика, внесеного у зовнішнє поле:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' < \vec{E}_0$$

$$\frac{\vec{E}_0}{\vec{E}'} = \epsilon > 1$$

До полярних діелектриків належать H₂O, NH₃, CO та інші

3.4. Спонтанно поляризовані діелектрики

Спонтанно поляризовані – це кристалічні діелектрики, що мають кубічні іонні кристалічні решітки (наприклад, NaCl, KCl, KBr та інші).

Механізм поляризації: під дією зовнішнього електричного поля всі позитивні *іони зміщуються* у напрямку вектора напруженості поля а всі негативні іони – у протилежному напрямку.



Йонні кристали:
Турмалін,
сегнетова сіль,
титанат барію,
кварц, хлорид
натрію

При цьому всередині кристала у кожній одиниці об'єму знаходиться однакова кількість позитивних і негативних іонів, а на кожній із двох протилежних граней обмеженого кристала, перпендикулярних вектору напруженості $\vec{E}_{\text{зовн}}$ знаходяться іони якого-небудь одного знаку. Такий вид поляризації називають *іонною поляризацією*.

До спонтанно поляризованих діелектриків належать:

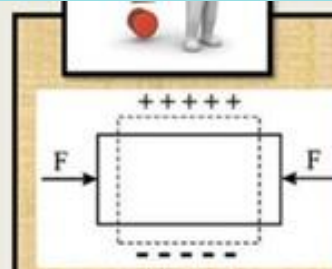
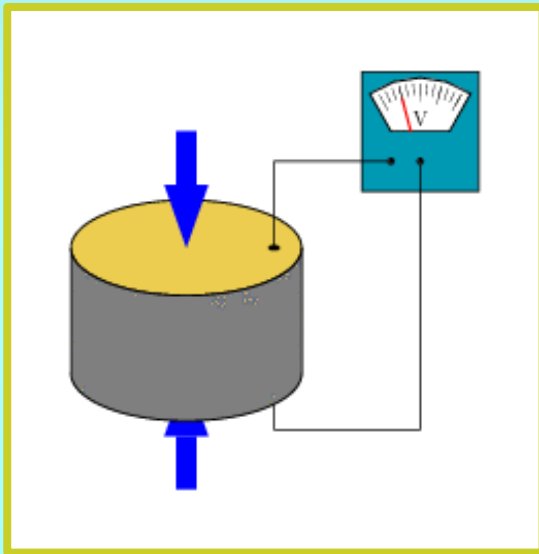
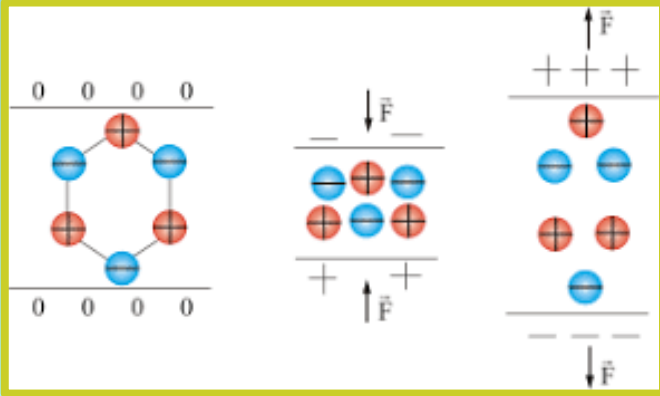
- піроелектрики
- п'єзоелектрики
- сегнетоелектрики

Піроелектрики – кристалічні діелектрики, на поверхні яких виникають електричні заряди під час їхнього *нагрівання або охолодження*.

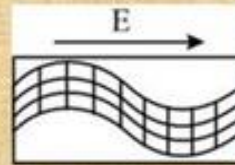
Широко використовуються як індикатори і приймачі випромінювання у пристроях теплового бачення, наприклад, для визначення теплоємності і тепловтрат стін та стель будівель.

3.4. Спонтанно поляризовані діелектрики

П'єзоелектрики – діелектрики, на поверхні яких виникають електричні заряди внаслідок їхньої механічної деформації або внесення їх у зовнішнє електричне поле



- **Прямий п'єзоэффект.** Якщо п'єзоелектрик вирізати спеціальним чином та піддати механічному напруженню (стискуванню, розтягуванню, зсуву), то на його поверхні з'являються електричні заряди, які обумовлюють поляризацію. Ці заряди виникають навіть у відсутності зовнішнього електричного поля; отже: **причина – деформація, наслідок – електричне поле.**
- **Зворотній п'єзоэффект.** Якщо п'єзоелектрик внести в електричне поле, то в ньому виникає механічна деформація, що лінійно залежить від напруженості електричного поля. Такі пружні деформації (акустичні хвилі) виникають навіть у відсутності спеціально створених зовнішніх деформацій. Отже: **причина – електричне поле, наслідок – деформація.**



3.4. Спонтанно поляризовані діелектрики

П'єзоелектрики використовуються:

- для виготовлення п'єзодатчиків, призначених для перетворення механічних коливань в електричні.

- для виготовлення елементів п'єзоелектричних сейсмографів для реєстрацій коливань земної кори в геодезичних дослідженнях

- для виготовлення різноманітних приладів для вимірювання частоти й амплітуди вібрацій двигунів, генераторів, будівельних конструкцій тощо

- для виготовлення п'єзоелектричних манометрів (датчики тиску) – використовують у процесі зведення й експлуатації мостових конструкцій, а також у лабораторних експертизах будівель

- для виготовлення акустичних генераторів – для перетворення електричних змін у звукові коливання

- для виготовлення датчиків для реєстрацій коливань під час використання ударно-вібраційних будівельних механізмів

- для виготовлення датчиків акселерометрів (пристроїв вимірювання прискорень) для фіксації та регулювання швидкості підйомних механізмів

- для виготовлення запальничок

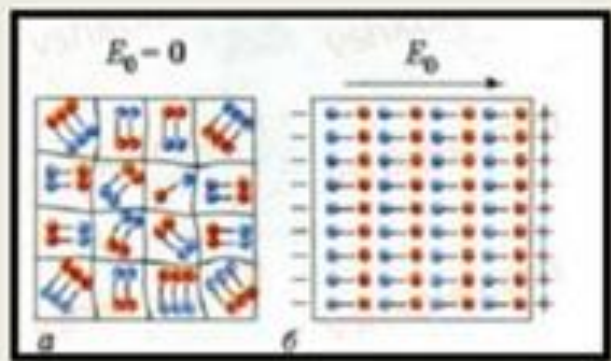
3.4. Спонтанно поляризовані діелектрики

Сегнетоелектрики – кристали, які виявляють макроскопічну поляризованість, навіть якщо немає зовнішнього електричного поля

Макроскопічні ділянки кристала, в межах яких спостерігається поляризація з однаковою орієнтацією диполів називають **доменами** (від фр. «domains» – ділянки).

У межах домену молекули мають однакову орієнтацію дипольних моментів.

Дипольний момент окремого домену відмінний від нуля $\vec{p}_i \neq 0$, але сумарний дипольний момент сегнетоелектрика дорівнює нулю $\vec{p} = \sum_{i=1}^n p_i = 0$, оскільки орієнтація \vec{p}_i у просторі є хаотичною за рахунок теплового руху.



У разі внесення в електричне сегнетоелектрика відбувається **переорієнтація дипольних моментів кожного диполя домену вздовж вектора** напруженості зовнішнього поля.

Надлишкові заряди, що утворюються на поверхні сегнетоелектрика мають **густину значно більшу**, ніж у звичайних діелектриків

$$\frac{\vec{E}_{\text{зовн}}}{\vec{E}} = \varepsilon \gg 1$$

$$\varepsilon = 10^3 \div 10^4$$

Для кожного сегнетоелектрика існує така **температура (точка Кюрі)**, вище від якої зростає тепловий рух частинок та порушується орієнтація дипольних моментів в областях спонтанної поляризації – **домени руйнуються** і сегнетоелектрик перетворюється на звичайний діелектрик

До сегнетоелектриків належать **сегнетова сіль** $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, яка дала назву всій групі, кварц, титанат барію BaTiO_3 та ін

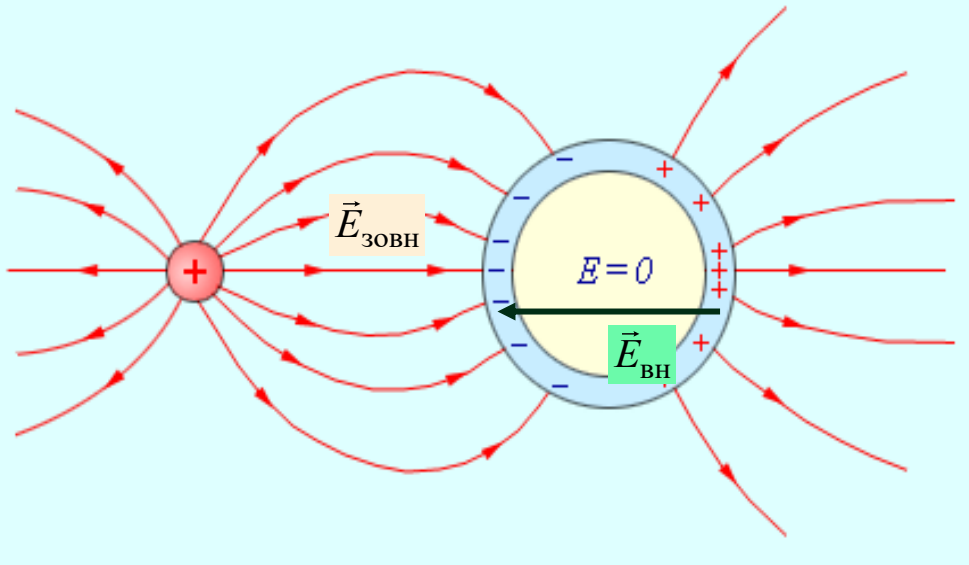


П. Кюрі

Використовуються: генератори, приймачі ультразвукових хвиль, радіотехнічні пристрої

3.5. Провідники в електростатичному полі.

Провідники – це речовин, які проводять електричний струм завдяки наявності вільних носіїв заряду (електронів).



Після внесення провідника у зовнішнє електричне поле вільні заряди переміщуються під дією сил поля доти, доки напруженість внутрішнього поля, створеного зміщеними зарядами, не дорівнюватиме напруженості зовнішнього поля, тобто не настане рівновага і результуюче поле у провіднику не дорівнюватиме нулеві:

$$\vec{E}_{\text{ВН}} + \vec{E}_{\text{ЗОВН}} = 0$$

Надлишковий заряд у провіднику, як і наведені заряди в діелектрику, завжди знаходиться у дуже тонкому поверхневому шарі товщиною порядку міжатомної відстані.

Всередині провідника електричного поля немає $\vec{E} = 0$, враховуючи зв'язок напруженості поля з його потенціалом, матимемо: $\varphi = \text{const}$. Це означає, що весь **провідник**, зокрема і його **поверхня**, має **однаковий потенціал**.

Отже **провідник є екіпотенціальною поверхнею**, а вектор напруженості електричного поля провідника спрямований **перпендикулярно до його поверхні**.

Властивість зарядів розміщуватися на зовнішній поверхні провідника використовується в **електростатичних генераторах** (генераторах Ван-де-Граафа) – пристроях, призначених для накопичення великих зарядів й отримання різниці потенціалів у декілька мільйонів вольт, всередині якого електричного поля не буде.

Електростатичний захист об'єктів – екранування тіл від впливу зовнішніх електростатичних полів, якого потребують чутливі електроприлади та проводка, тому приміщення, в яких вони будуть знаходитись (щитові, лабораторії тощо), на стадії будівництва додатково армують добре провідними заземленими сітками. Електростатичним захистом забезпечують висотні крани, місця виконання електрозварювальних, висотних монтажних та оздоблювальних робіт.

3.5. Електроємність провідника і конденсатора.

Електричною ємністю провідника називають скалярну фізичну величину, що характеризує здатність провідника накопичувати на своїй поверхні заряди.

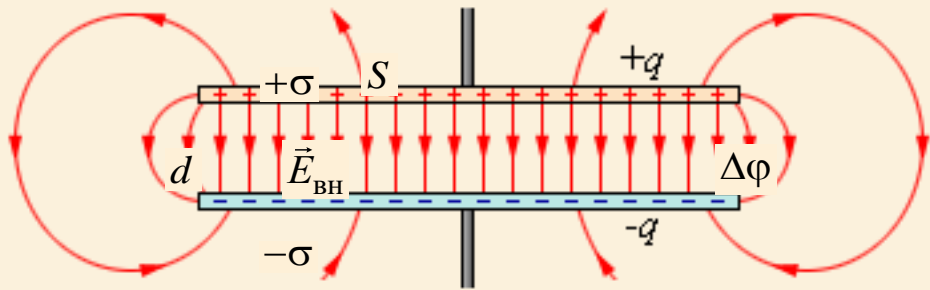
Електроємність чисельно дорівнює заряду, який потрібно надати провіднику, щоб змінити потенціал його поверхні на одиницю:

$$C = \frac{dq}{d\varphi} \quad [C] = [1\Phi]$$

Електроємність провідної сфери радіуса R , що знаходиться у середовищі з діелектричною проникністю ϵ

$$d\varphi = \frac{dq}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R} \quad \Longrightarrow \quad C = \frac{dq}{d\varphi} = \frac{dq}{dq/4\pi\epsilon\epsilon_0 R} \quad \Longrightarrow \quad C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R$$

Електроємність Землі: $C = 6,4 \cdot 10^{-4} \Phi$ (довести самостійно, для повітря $\epsilon = 1$).



Конденсатор - система близько розташованих провідників, розділених діелектриком, призначений для накопичення і зберігання електричних зарядів

Плоским конденсатором називають систему, що складається з двох паралельних металевих пластин площею S кожна, простір між якими товщиною d заповнено діелектриком з проникністю ϵ

Ємність плоского конденсатора можна обчислити за його параметрами (S, d):

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

Зв'язок напруженості та потенціалу:

$$E = \frac{d\varphi}{dx} = \frac{\Delta\varphi}{d}$$

З теореми Гаусса:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$$

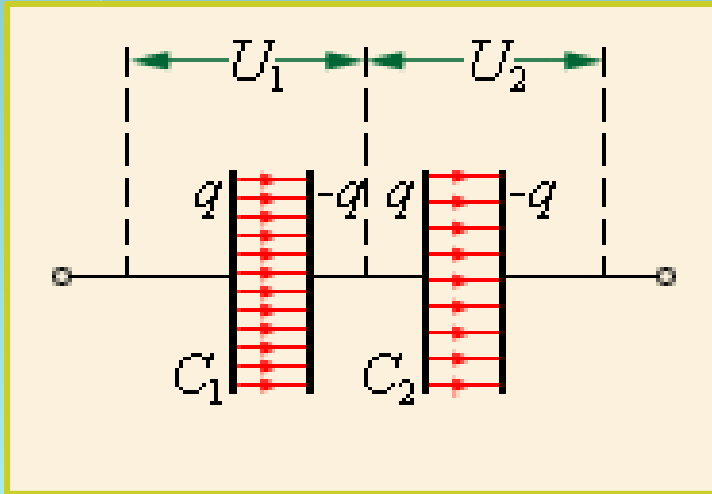
Поверхнева густина заряду

$$\sigma = \frac{q}{S}$$

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$$

3.5. З'єднання конденсаторів

$$C = \frac{dq}{d\phi} = \frac{q}{U}$$

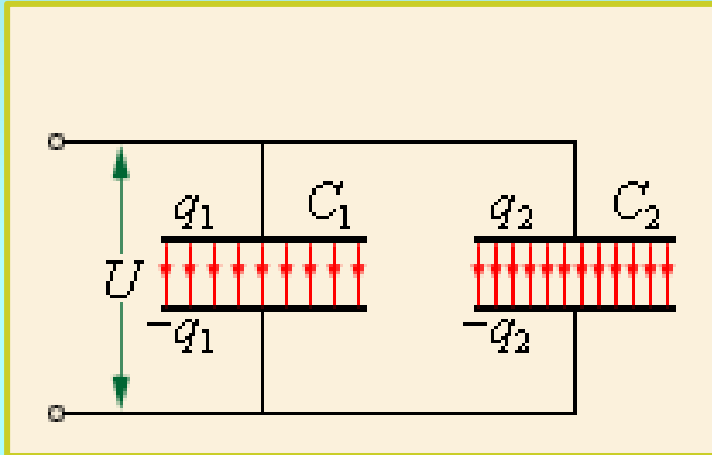


Ємність системи послідовно з'єднаних конденсаторів:

$$q = q_1 = q_2 = \dots = q_n$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$



Ємність системи паралельно з'єднаних конденсаторів:

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$$

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i$$

Види конденсаторів:

за конструкцією

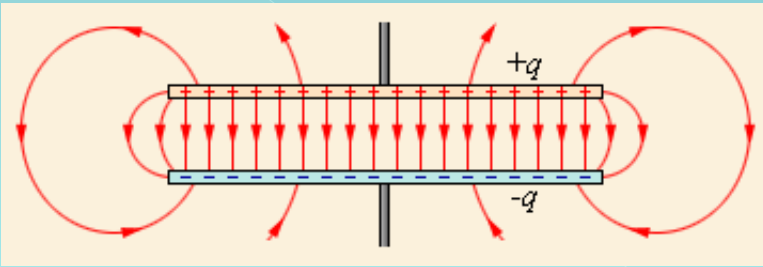
- плоскі;
- циліндричні;
- сферичні.

за наповненням

- повітряні;
- керамічні;
- слюдяні тощо

3.5. Енергія електростатичного поля. Об'ємна густина енергії електричного поля

Процес зарядки конденсатора можна представити у вигляді процесу послідовного перенесення нескінченно малих порцій заряду dq з однієї пластини на іншу, в результаті чого одна пластина конденсатора буде заряджатися позитивно, а друга – негативно і між ними буде виникати *електричне поле* з різницею потенціалів.



Робота, яку потрібно буде виконати у наступний момент проти сил створеного електричного поля:

$$dA = \varphi dq = \frac{1}{C} q dq$$

$$A = \int_0^q \frac{1}{C} q dq = \frac{q^2}{2C}$$

Повна робота із зарядження пластин конденсатора від 0 до заряду q :

Виконана робота змінює енергію системи, тобто енергія системи збільшується на значення енергії електричного поля, що виникає у конденсаторі. Таким чином, *енергія електричного поля зарядженого конденсатора*:

$$W_e = \frac{q^2}{2C} = \frac{q\Delta\varphi}{2} = \frac{C\Delta\varphi^2}{2}$$

Якщо поле конденсатора однорідне і зосереджене між його обкладинками можна обчислити, *об'ємну густину енергії електростатичного поля*:

$$\varpi = \frac{W_e}{V} = \frac{C\Delta\varphi^2}{2 \cdot Sd} \cdot \frac{d}{d} = \frac{Cd}{2S} \cdot \left(\frac{\Delta\varphi}{d}\right)^2 = C \cdot \frac{d}{2S} \cdot E^2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \cdot \frac{d}{2S} \cdot E^2$$

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

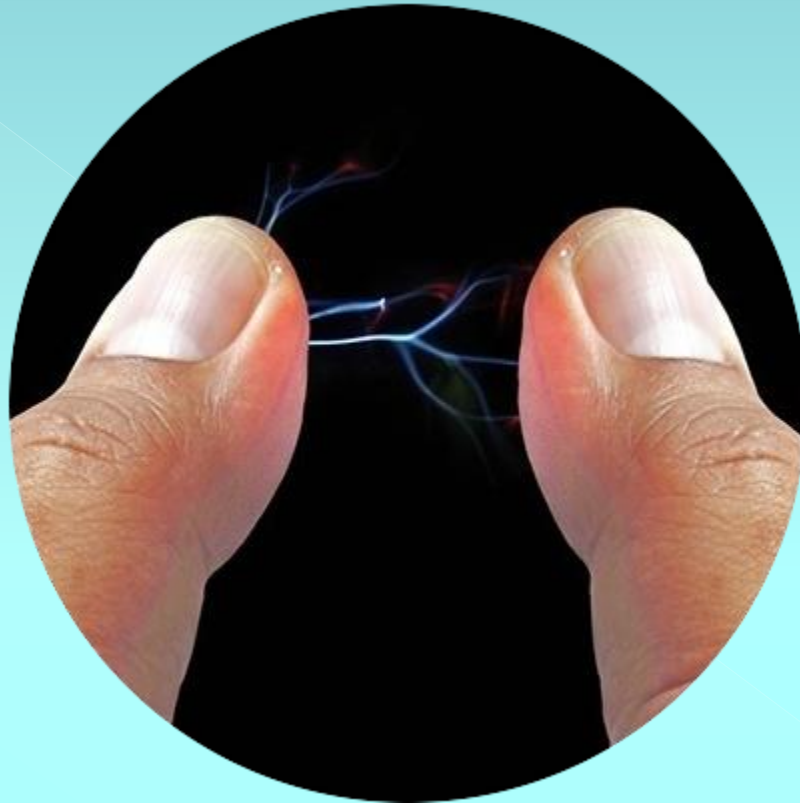


Якщо відома напруженість поля в кожній точці, то *повну енергію електричного поля системи зарядів* знаходять інтегруванням за об'ємом, яке займає поле:

$$W_e = \int_V \varpi dV = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{2} V \int E^2 dV$$

Очевидно, що повна енергія поля завжди є величиною додатною, оскільки $E^2 \geq 0$

Лекція закінчена



Дякую за увагу