

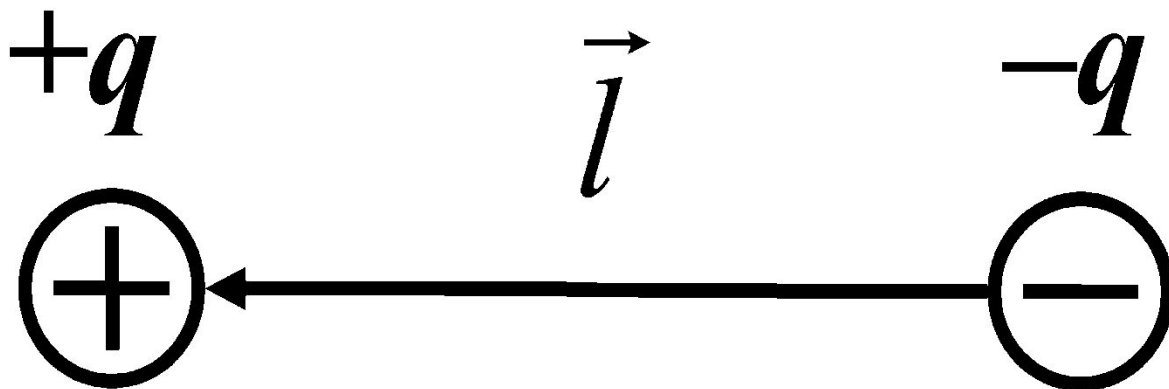
Лекція № 9.

Поляризація діелектриків. Провідники в електростатичному полі

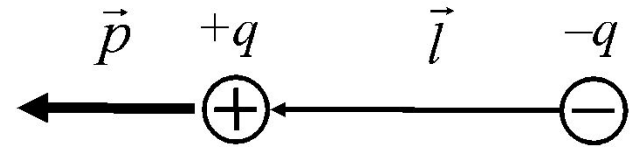
- 1. Поведінка диполя в однорідному та неоднорідному електричному полі.**
- 2. Полярні та неполярні діелектрики. Поляризація діелектриків, характеристики їх поляризованого стану.**
- 3. Провідники в електричному полі.**
- 4. Електроємність провідника і конденсатора. З'єднання конденсаторів.**
- 5. Енергія електростатичного поля.**

1. Поведінка диполя в однорідному та неоднорідному електричному полі.

Електричним диполем називають одну з найпростіших систем точкових зарядів, що складається з двох однакових за абсолютним значенням і протилежних за знаком точкових зарядів $+q$ і $-q$, розміщених на деякій відстані \vec{l} . Величину \vec{l} називають плечем диполя.



Основною характеристикою диполя є *електричний дипольний момент* \vec{p} – векторна фізична величина, що чисельно дорівнює добутку заряду на плече диполя, направлений вектор \vec{p} від негативного заряду до позитивного, тобто за напрямом \vec{l} :



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

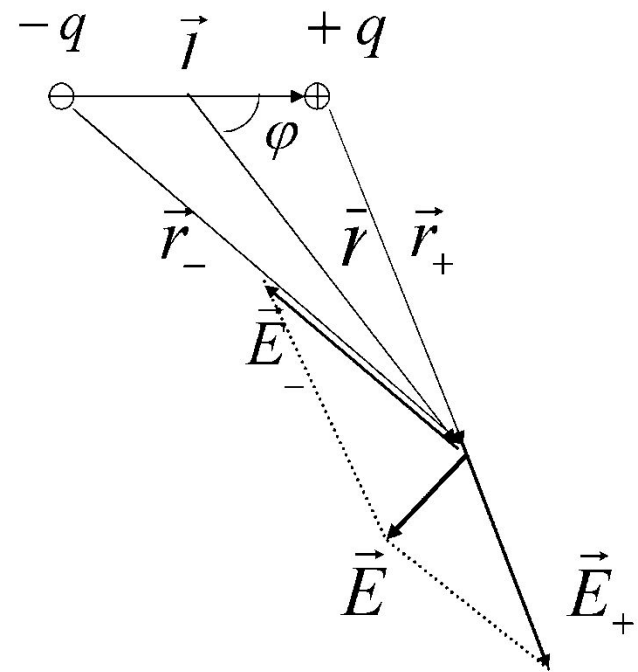
Одиницею вимірювання електричного дипольного моменту є $1 \text{ Кл}\cdot\text{м}$ (кулон-метр).

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

Напруженість електричного поля диполя E_δ у довільній точці простору на відстані від центру диполя $r \gg l$:

$$E_\delta = \frac{p\sqrt{1+3\cos^2\varphi}}{r^3},$$

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



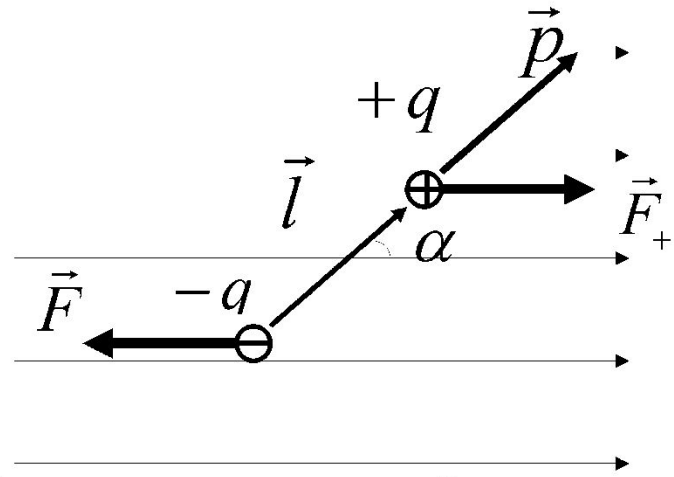
Розглянемо якою буде поведінка диполя у зовнішньому електричному полі.

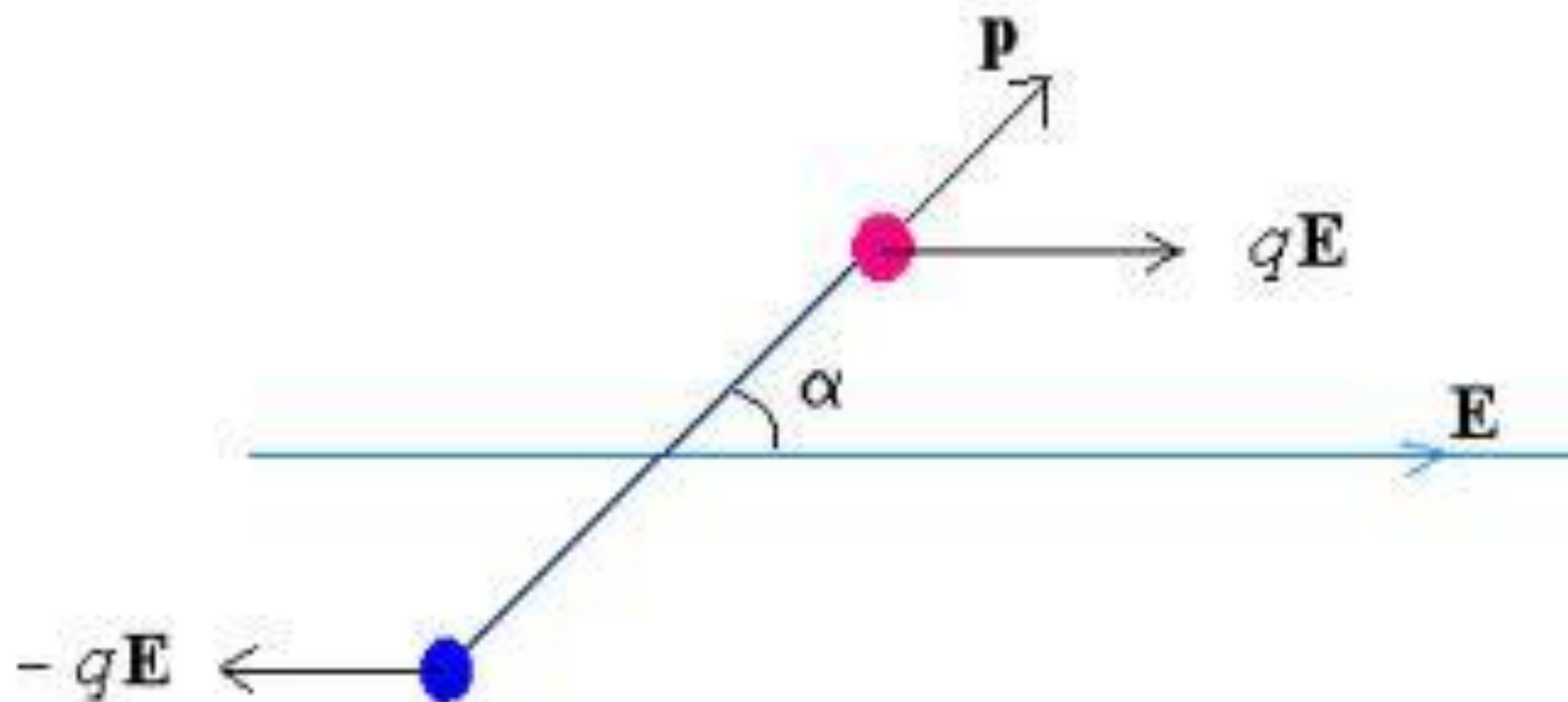
Якщо поле однорідне, то сили, що діють на позитивний \vec{F}_+ і негативний \vec{F}_- заряди диполя, є однаковими за значенням $|\vec{F}_+| = |F_-|$ і протилежними за напрямом, тобто утворюють пару сил. Їх рівнодійна дорівнює нулеві, тому переміщення диполя вздовж поля ці сили не викликають. Орієнтація диполя вздовж ліній напруженості поля зумовлюється дією моменту пари сил:

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

або у векторній формі:

$$\vec{M} = [\vec{p} \times \vec{E}].$$





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 встановився у напрямі поля.

Якщо момент сил дорівнює нулеві, то диполь знаходиться у рівновазі. Існує два положення рівноваги диполя: стійка рівновага (диполь паралельний лініям напруженості $\alpha = 0$) і нестійка рівновага (диполь антипаралельний лініям напруженості $\alpha = \pi$).

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

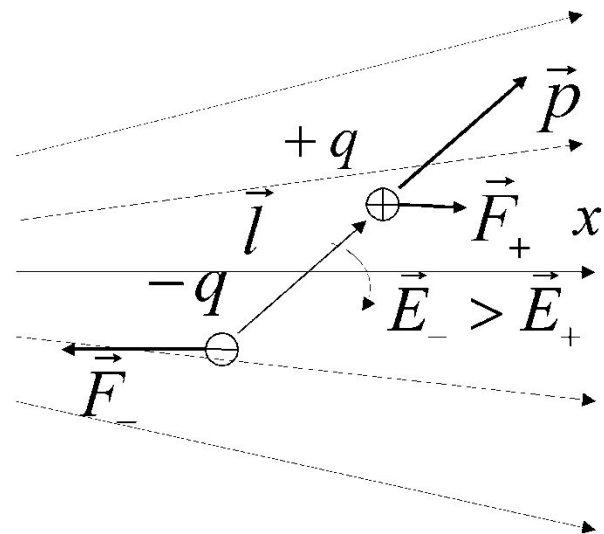
$$W_n = q_+ \varphi_+ + q_- \varphi_- = q \Delta \varphi = qEl \cos \alpha ,$$

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

В загальній формі потенціальна енергія диполя дорівнює скалярному добутку:

$$W_n = -(\vec{p} \cdot \vec{E}) .$$

Якщо поле *неоднорідне*, то сили \vec{F}_+ і \vec{F}_- за значенням є різними $|\vec{F}_-| > |\vec{F}_+|$ і їхня рівнодійна не дорівнює нулеві:

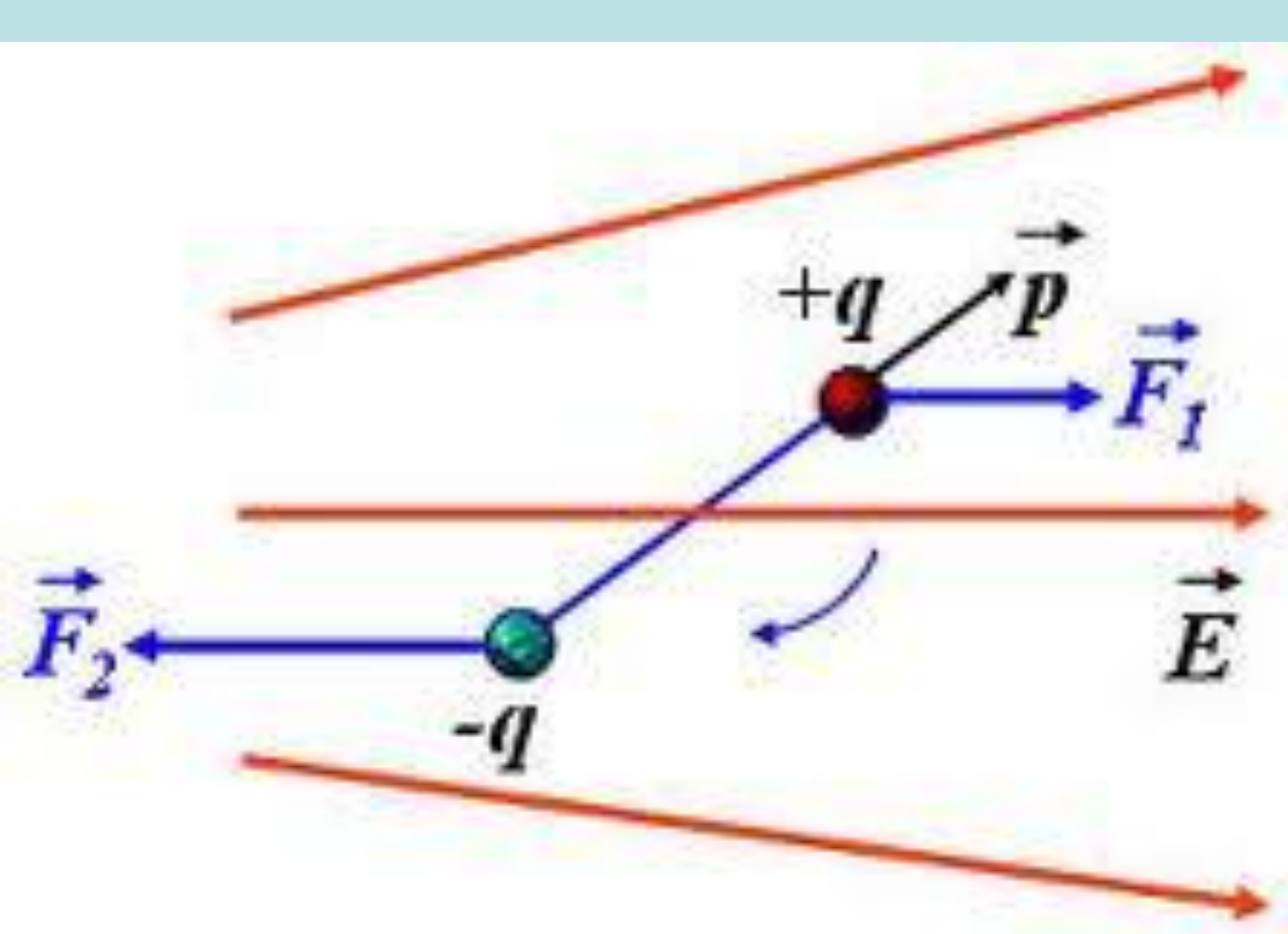


$$F = F_- - F_+ = qE - q\left(E - \frac{dE}{dx}l\right) = q\frac{dE}{dx}l$$

або у векторному вигляді:

$$\vec{F} = -gradW_n \text{ чи } \vec{F} = grad(\vec{p} \cdot \vec{E}).$$

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

2. Полярні та неполярні діелектрики. Поляризація діелектриків, характеристики їх поляризованого стану.

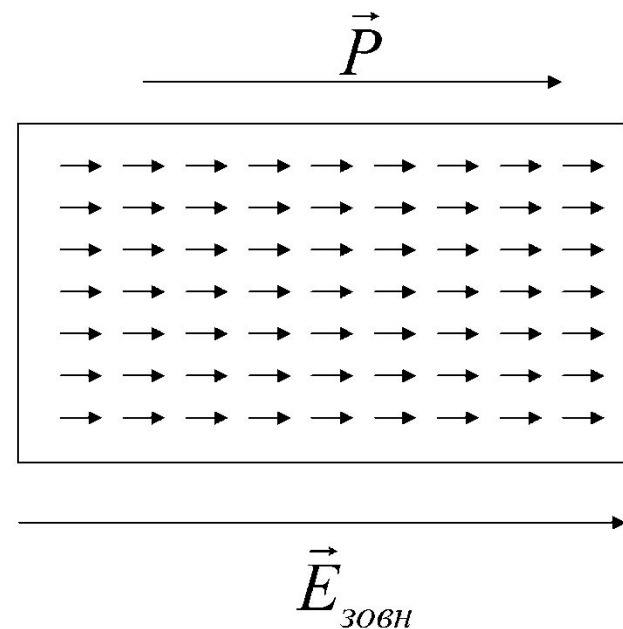
Діелектриком називають речовину, яка не проводить електричний струм за даних умов через відсутність вільних носіїв заряду. Діелектрики, по відношенню до впливу на них електричного поля, поділяють на три групи:

- *неполярні,*
- *полярні,*
- *спонтанно поляризовані.*

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

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

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



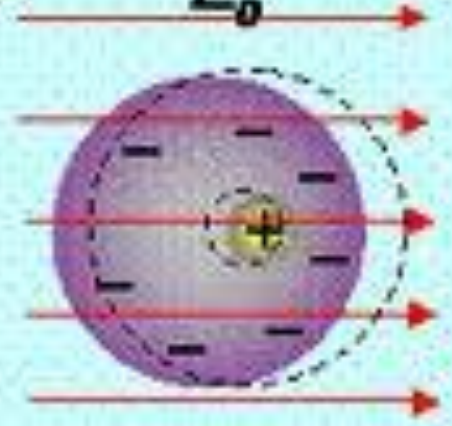
1

$$\vec{E}_0 = 0$$



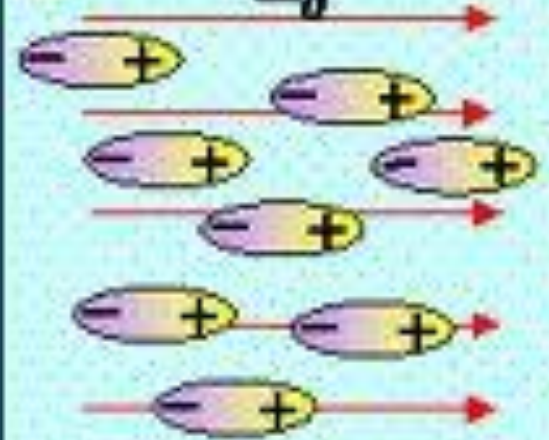
2

$$\vec{E}_0$$

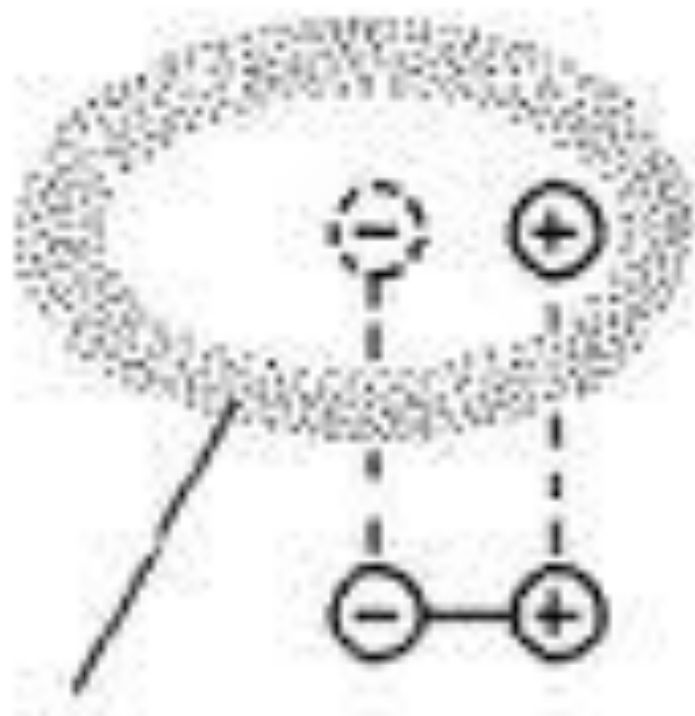
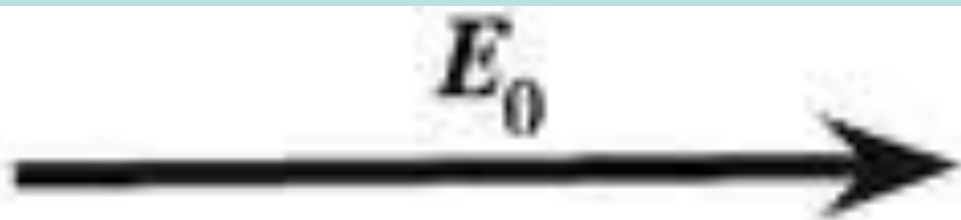
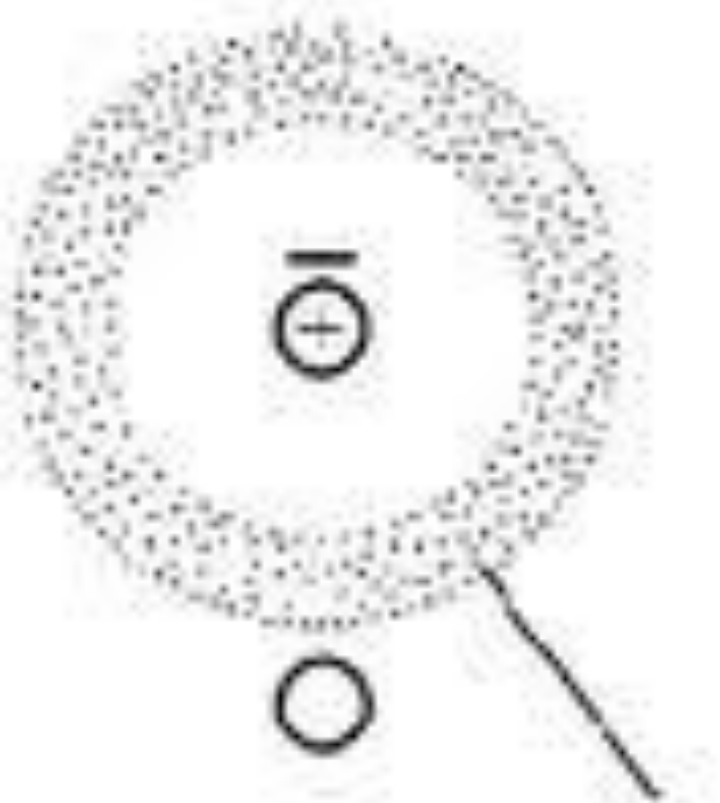


3

$$\vec{E}_0$$



$$E_0 = 0$$



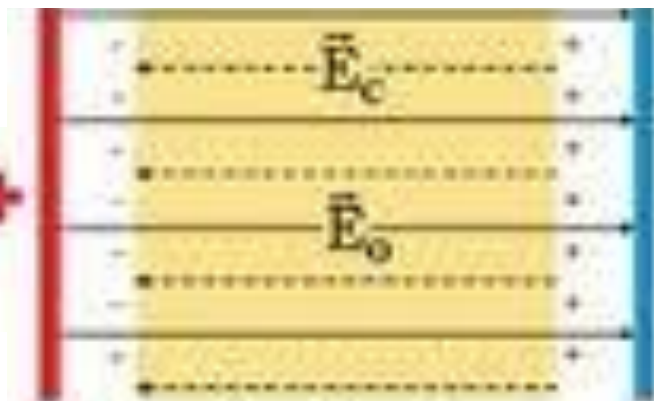
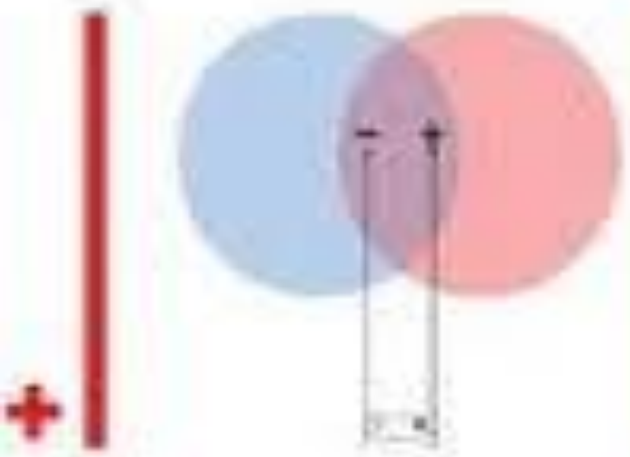
Електронна хмаринка

Поляризація діелектриків

Модель неполярної молекули водню



Схема електронної поляризації



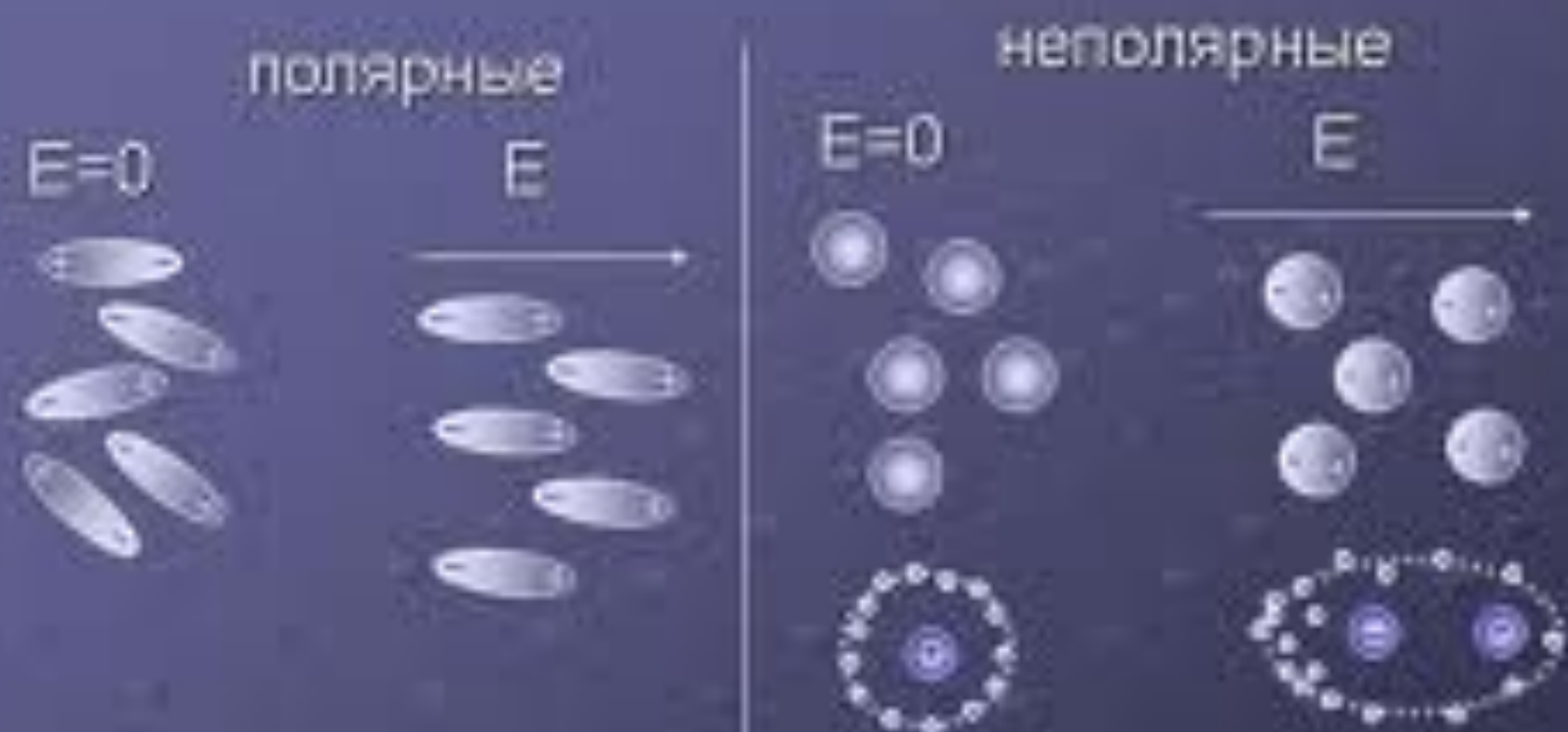
$$E = E_0 - E_c$$
$$\epsilon = E_0 / E$$

Модель полярної молекули води



Схема дипольної поляризації





Электрическое поле внутри диэлектрика ослабевает
Относительная диэлектрическая проницаемость среды
 $\epsilon = E_{\text{вак}} / E$

Для характеристики поляризації діелектриків в електричному полі вводять *вектор поляризації* \vec{P} :

$$\vec{P} = \frac{\sum_i \vec{p}_i}{\Delta V} ,$$

де $\sum_i \vec{p}_i$ – сумарний наведений дипольний момент діелектрика,

ΔV – об'єм поляризованого діелектрика.

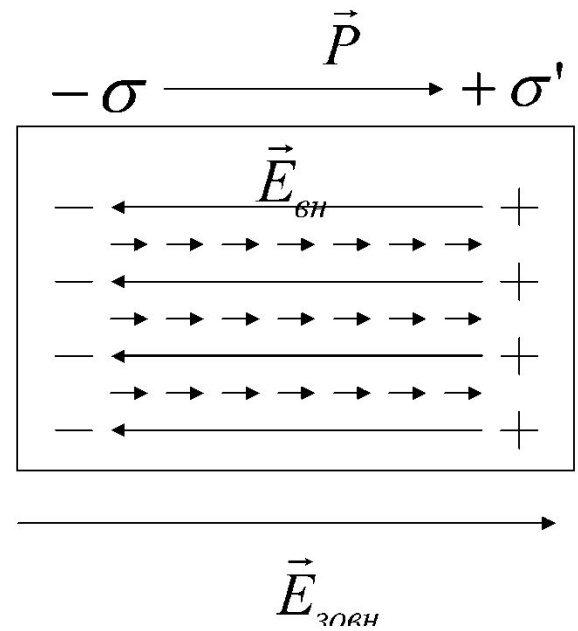
Вектор поляризації пов'язаний із напруженістю зовнішнього поля формулою:

$$\vec{P} = k\varepsilon_0\vec{E},$$

k – стала, яка називається *діелектрична сприйнятливість діелектрика*.

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 $\vec{E}_{зовн}$ сприяє наведенню надлишкового заряду поверхневою густиною $+\sigma'$ на одному боці діелектрика і $-\sigma'$ на протилежному. Всередині діелектрика встановлюється власне електростатичне поле напруженіс-



тю $\vec{E}_{вн}$, що послаблює зовнішнє поле, тому напруженість електричного поля всередині неполярного діелектрика внесеного у зовнішнє поле:

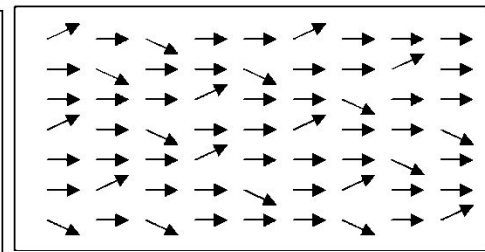
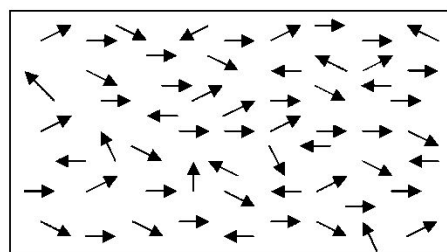
$$\vec{E} = \vec{E}_{зовн} + \vec{E}_{вн} < E_{зовн}, \quad \frac{\vec{E}_{зовн}}{\vec{E}} = \epsilon > 1$$

До таких діелектриків відносять N_2 , H_2 , CO_2 , CH_4 ...

Полярні – діелектрики, молекули яких у відсутність зовнішнього електричного поля мають дипольний момент відмінний від нуля, оскільки характеризуються асиметричним розподілом заряду в об'ємі молекули через неспівпадання центрів позитивних і негативних зарядів. Але за рахунок теплового хаотичного руху молекул, їх сумарний дипольний момент дорівнює нулю.

$$\vec{P} = 0$$

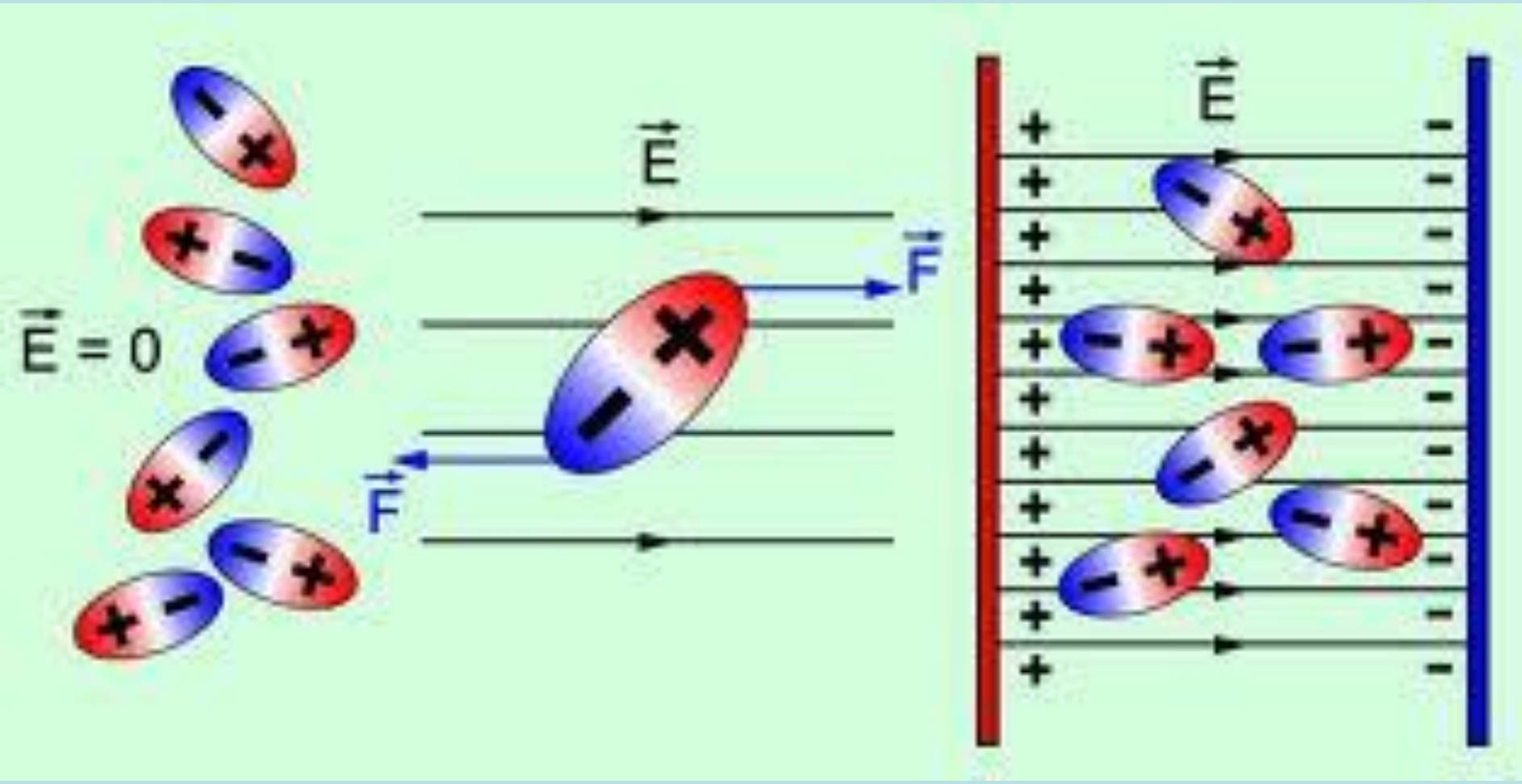
$$\vec{P} \neq 0$$



$$\vec{E}_{\text{зовн}} = 0$$

$$\vec{E}_{\text{зовн}}$$

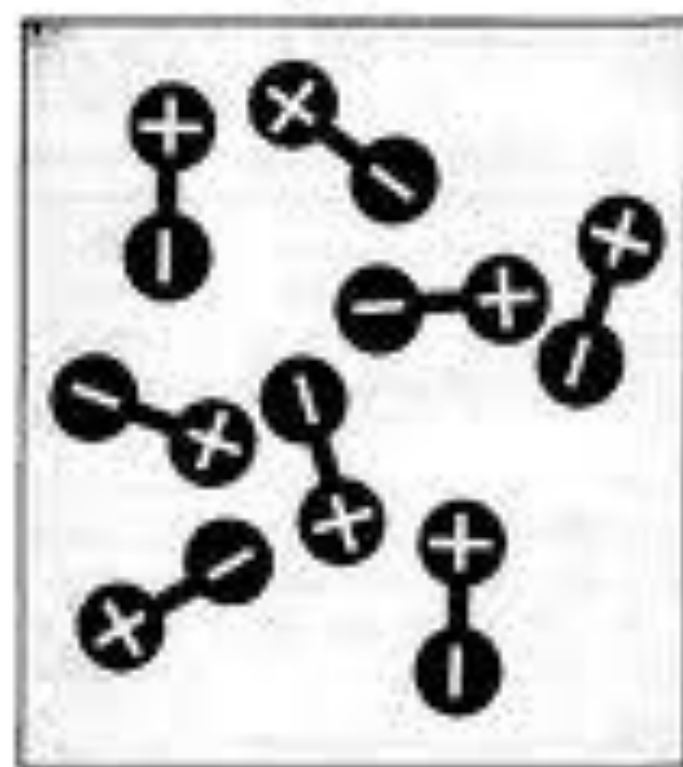
При внесенні полярного діелектрика в електричне поле відбувається орієнтація диполів вздовж поля, що призводить до появи сумарного дипольного моменту діелектрика відмінного від нуля, такий механізм поляризації називають *дипольною* або *орієнтаційною поляризацією*.



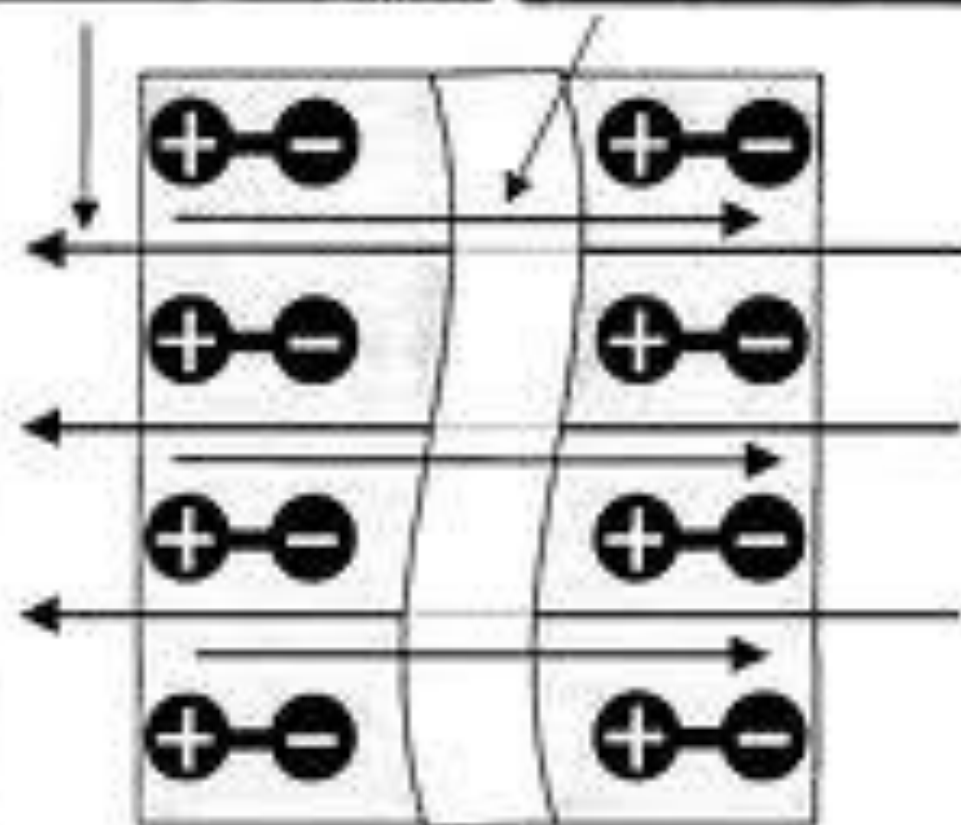
Электрическое поле отсутствует

Внешнее электрическое поле

Внутреннее электрическое поле



а)



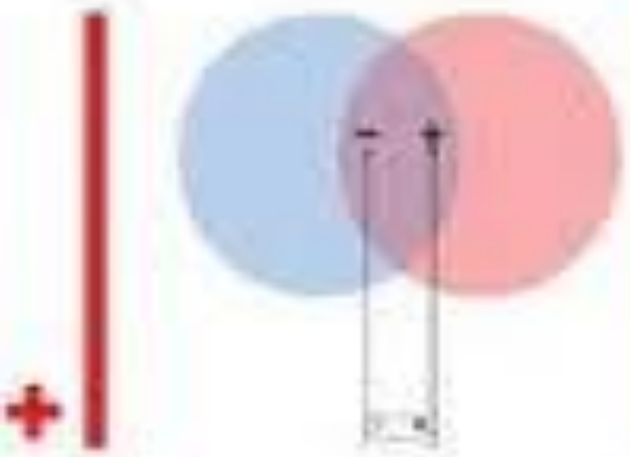
б)

Поляризація діелектриків

Модель неполярної молекули водню



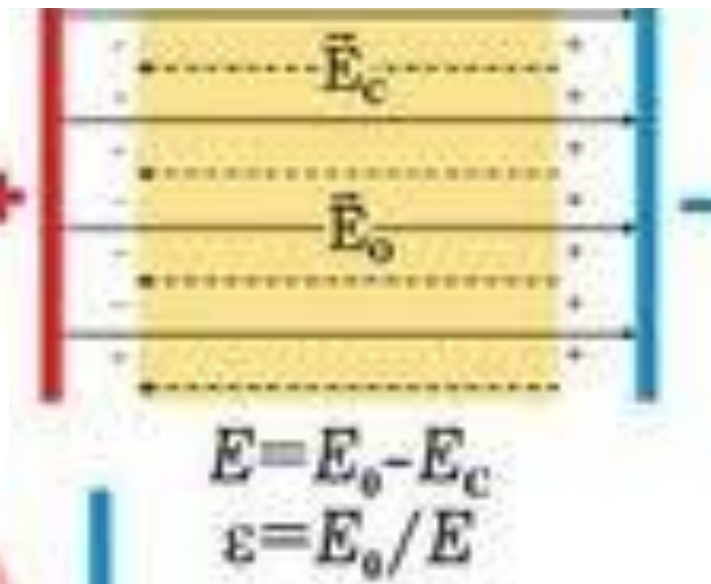
Схема електронної поляризації



Модель полярної молекули води



Схема дипольної поляризації





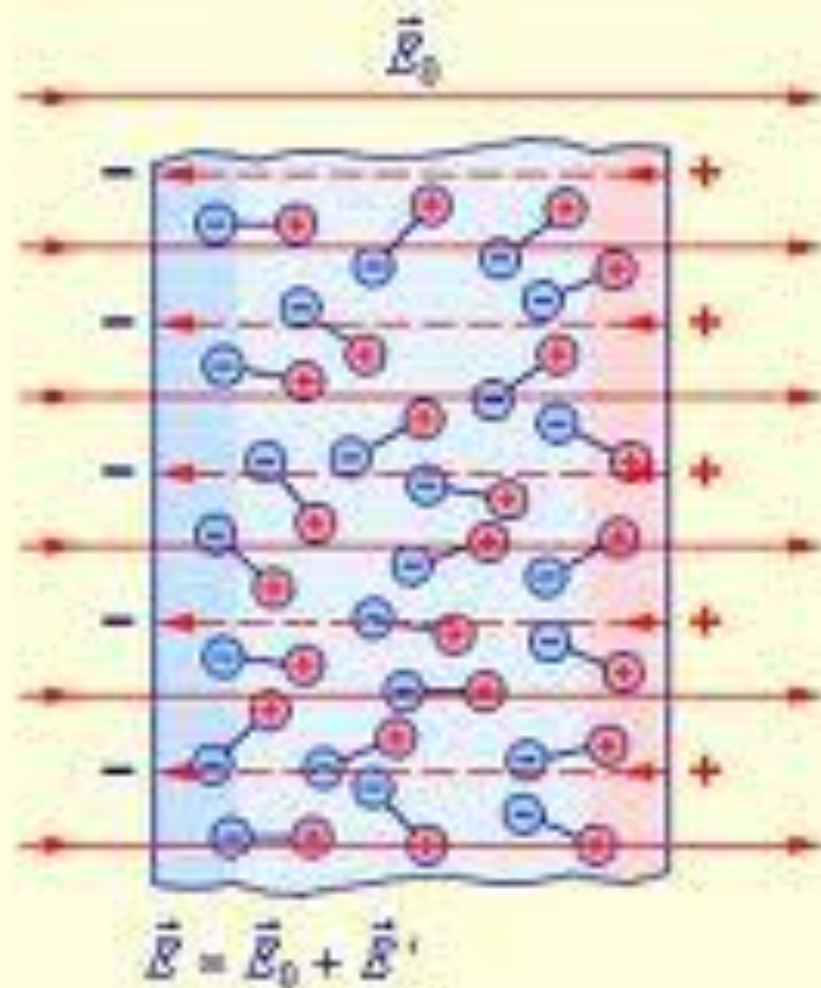
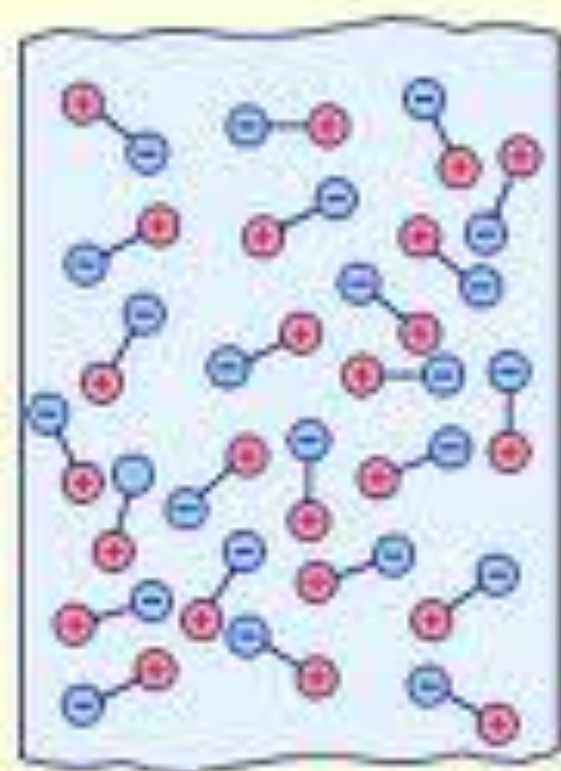
Электрическое поле внутри диэлектрика ослабевает
Относительная диэлектрическая проницаемость среды
 $\epsilon = E_{\text{вак}} / E$

Зовнішнє поле аналогічно, як і у неполярних діелектриках сприяє наведенню надлишкового поверхневого заряду, тому всередині діелектрика встановлюється власне поле. Напруженість електричного поля всередині полярного діелектрика внесеного у зовнішнє поле:

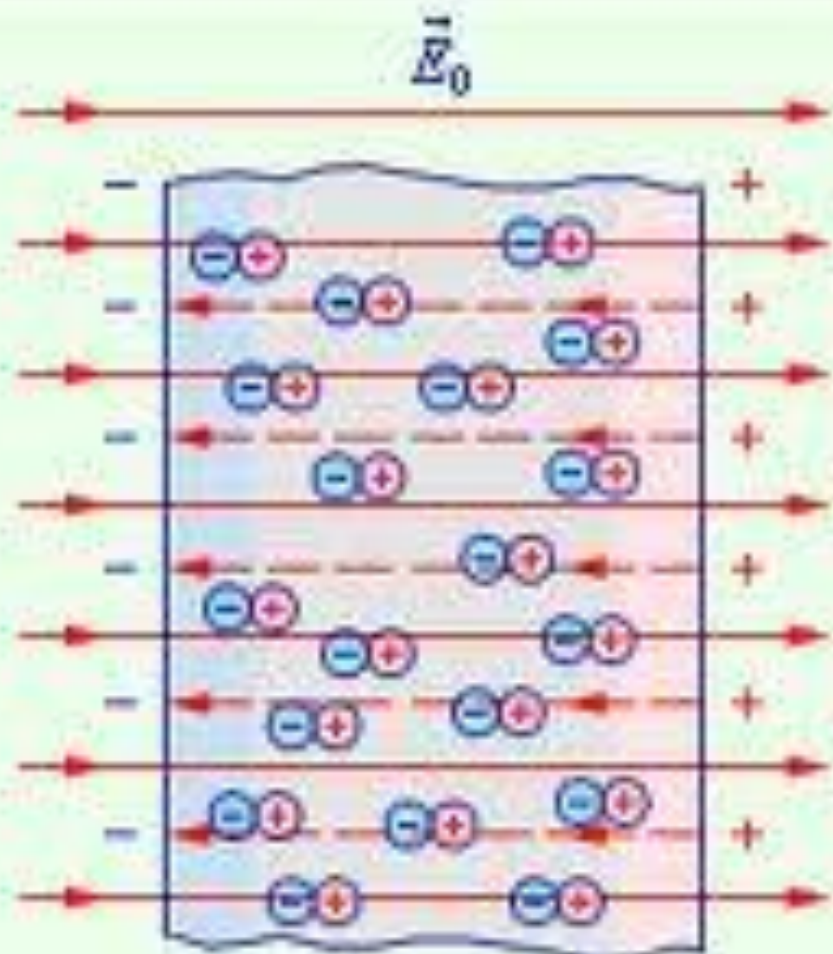
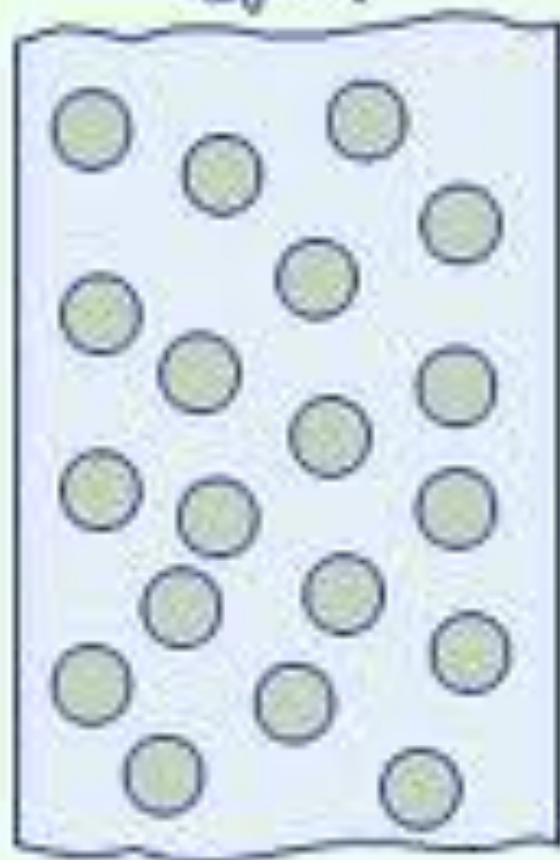
$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{зовн}} + \vec{E}_{\text{вн}} < E_{\text{зовн}}, \quad \frac{\vec{E}_{\text{зовн}}}{\vec{E}} = \varepsilon > 1$$

До таких діелектриків відносяться H_2O , NH_3 , CO ...

$$\vec{E}_0 = 0$$



$$\epsilon_0 = 0$$



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

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

Під дією електричного поля всі позитивні іони зміщуються у напрямку вектора напруженості поля $\vec{E}_{зовн}$, а всі негативні іони – у протилежному напрямку. При цьому всередині кристалу у кожній одиниці об'єму знаходиться однакова кількість позитивних і негативних іонів, а на кожній із двох протилежних граней обмеженого кристалу, перпендикулярних вектору $\vec{E}_{зовн}$, знаходяться іони якого-небудь одного знаку. Такий вид поляризації називають *іонною поляризацією*.

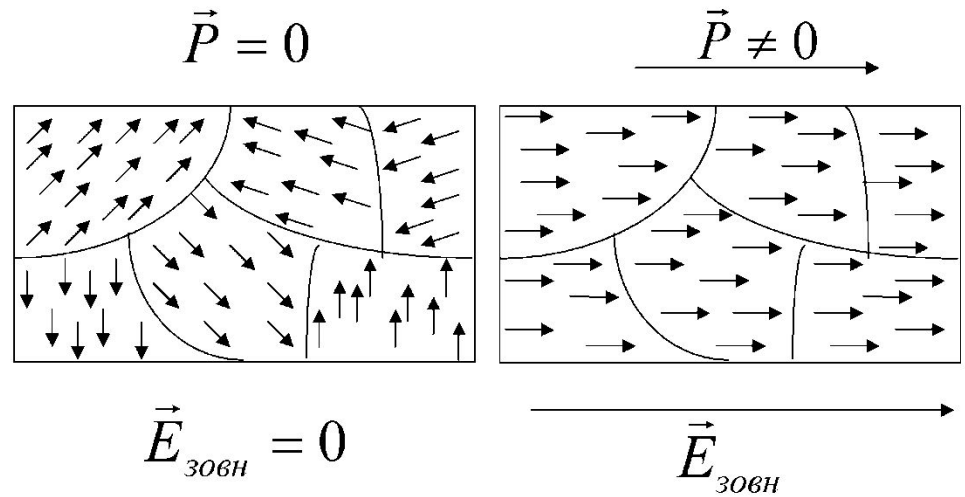
До спонтанно поляризованих діелектриків належать так звані:

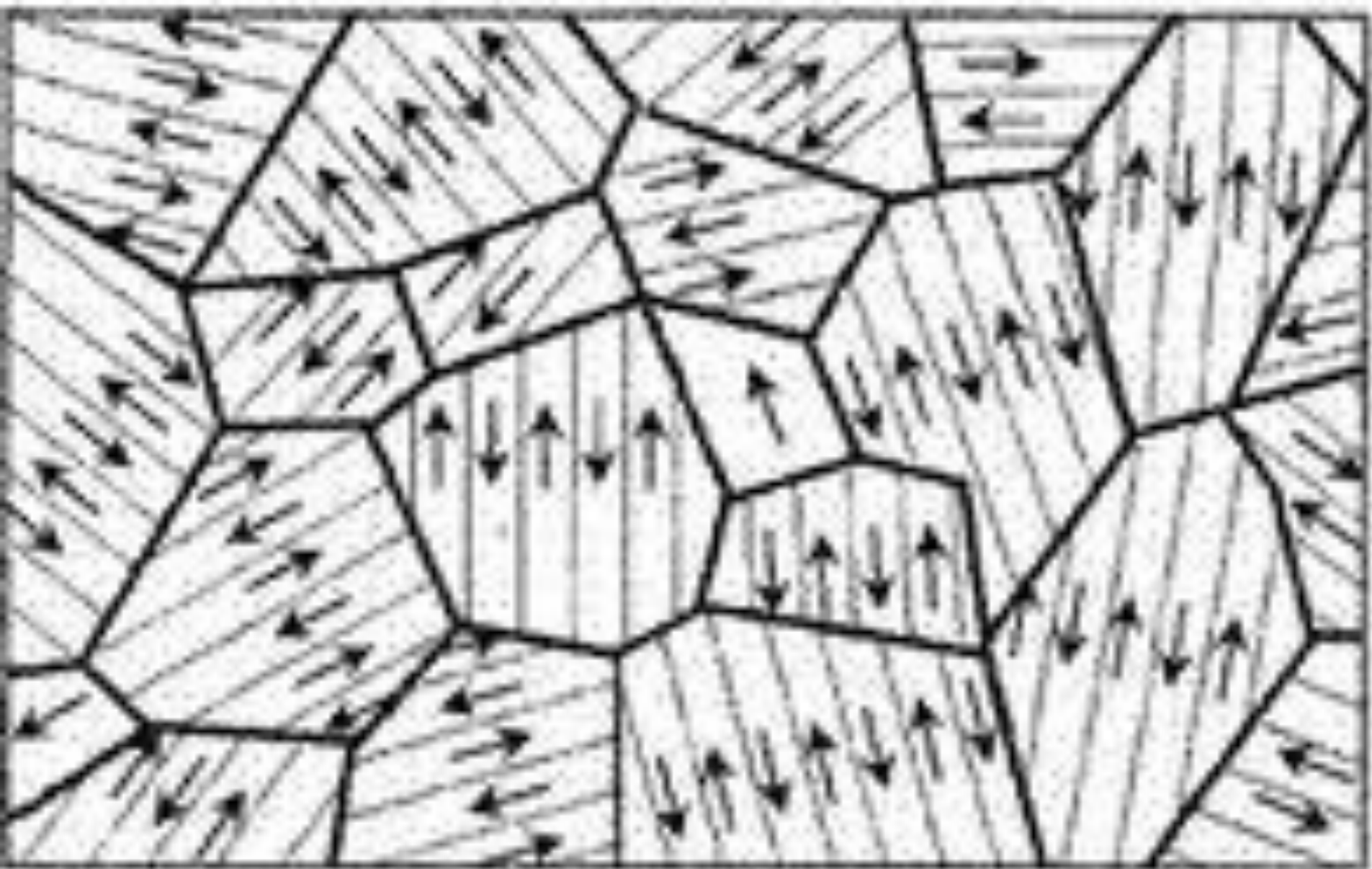
– піроелектрики – кристалічні діелектрики на поверхні яких виникають електричні заряди при їх нагріванні або охолодженні. Широко використовуються як індикатори і приймачі випромінювання у пристроях теплового бачення, наприклад, для визначення теплоємності і тепловтрат стін та стель будівель;

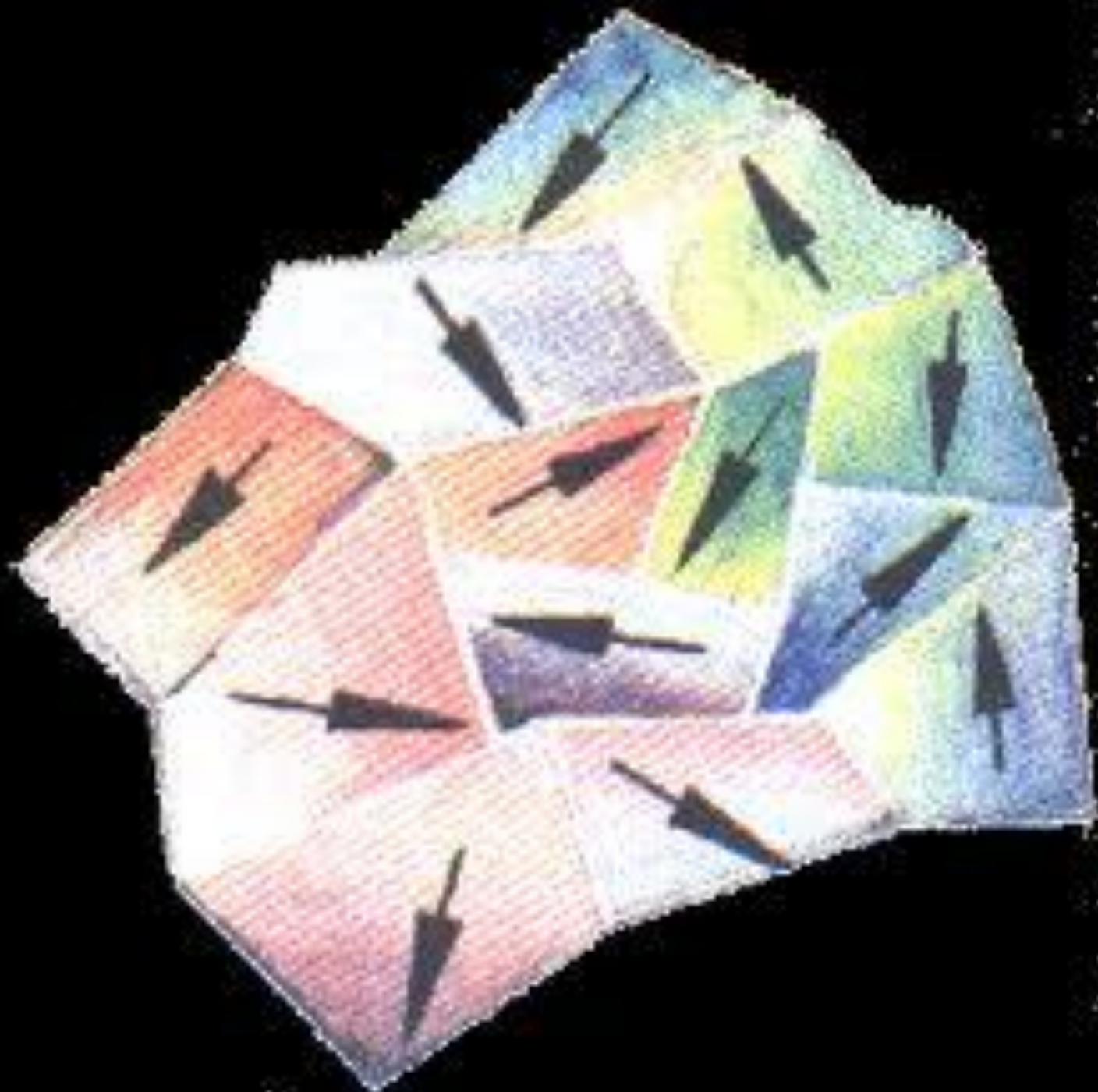
– п'єзоелектрики – діелектрики на поверхні яких виникають електричні заряди при їх механічній деформації, використовуються для виготовлення п'єзо-датчиків, призначених для перетворення механічних коливань в електричні, та акустичних генераторів – для перетворення електричних змін у звукові коливання. З них виготовляють адаптери для відтворення звуку, прилади для вимірювання частоти й амплітуди вібрацій двигунів, генераторів, будівельних конструкцій; елементи п'єзоелектричних сейсмографів, датчики для реєстрацій коливань при використанні ударно-вібруючих будівельних механізмів; датчиків акселерометрів (пристроїв вимірювання прискорень) для фіксації та регулювання швидкості підйомних механізмів; п'єзоелектричні манометри (датчики тиску) – використовують при зведенні та експлуатації мостових конструкцій, у лабораторних експертизах будівель;

–сегнетоелектрики – кристали, які виявляють макроскопічну поляризованість навіть за відсутності зовнішнього електричного поля. Макроскопічні ділянки кристалу в межах яких спостерігається поляризація з однаковою орієнтацією диполів називають *доменами*. 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

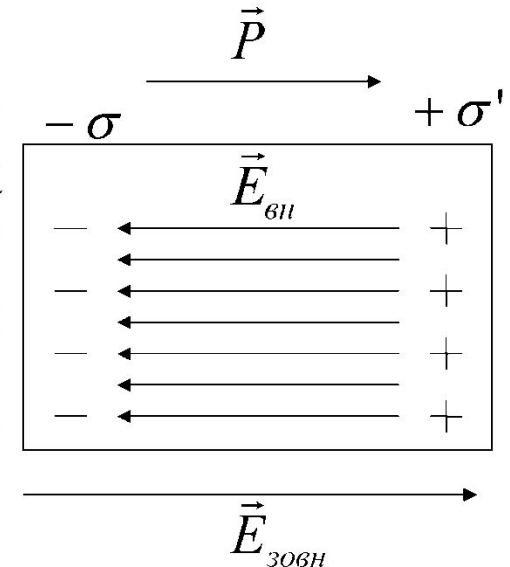
$\vec{p} = \sum_{i=1}^n p_i = 0$. При внесенні в електричне поле спонтанно поляризованого діелектрика відбувається переорієнтація дипольних моментів кожного диполя вздовж вектора напруженості зовнішнього поля поляризації діелектрика, за рахунок деформації кристалічної решітки.







Надлишкові заряди, що утворюються на поверхні сегнетоелектрика мають густину, значно більшу, ніж у звичайних діелектриків. Власне поле напруженістю $\vec{E}_{вн}$ значно послаблює зовнішнє поле напруженістю $\vec{E}_{зовн}$:



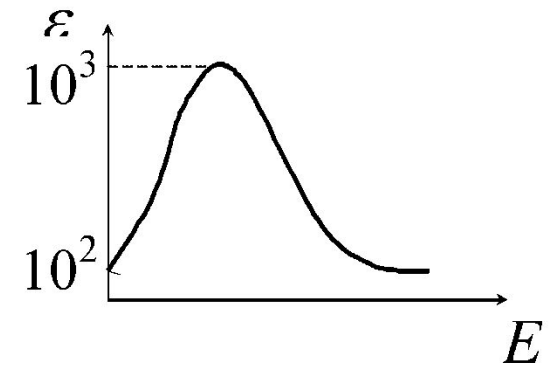
$$\vec{E} = \vec{E}_{зовн} + \vec{E}_{вн} \ll E_{зовн},$$

$$\frac{\vec{E}_{зовн}}{\vec{E}} = \varepsilon \gg 1, \varepsilon = 10^3 \div 10^4$$

До сегнетоелектриків належать сегнетова сіль $NaKS_4H_4O_4 \cdot 4H_2O$, яка дала назву всій групі, кварц, титанат барію $BaTiO_3$ та ін.

Особливі властивості сегнетоелектриків експериментально дослідили ще у 1931 році І. В. Курчатов і П. П. Кобеко:

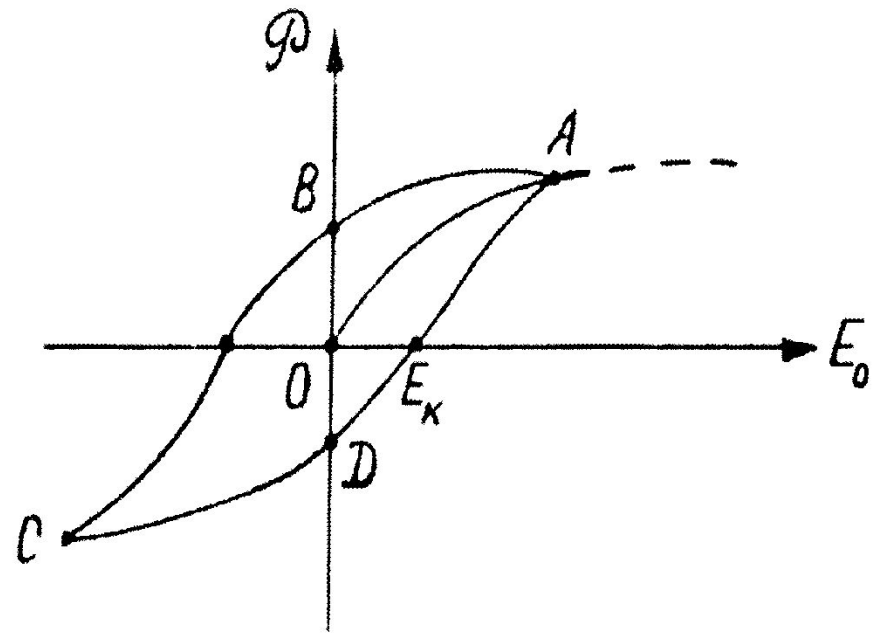
1. Сегнетоелектрики мають нелінійну залежність ε від величини напруженості поля E .

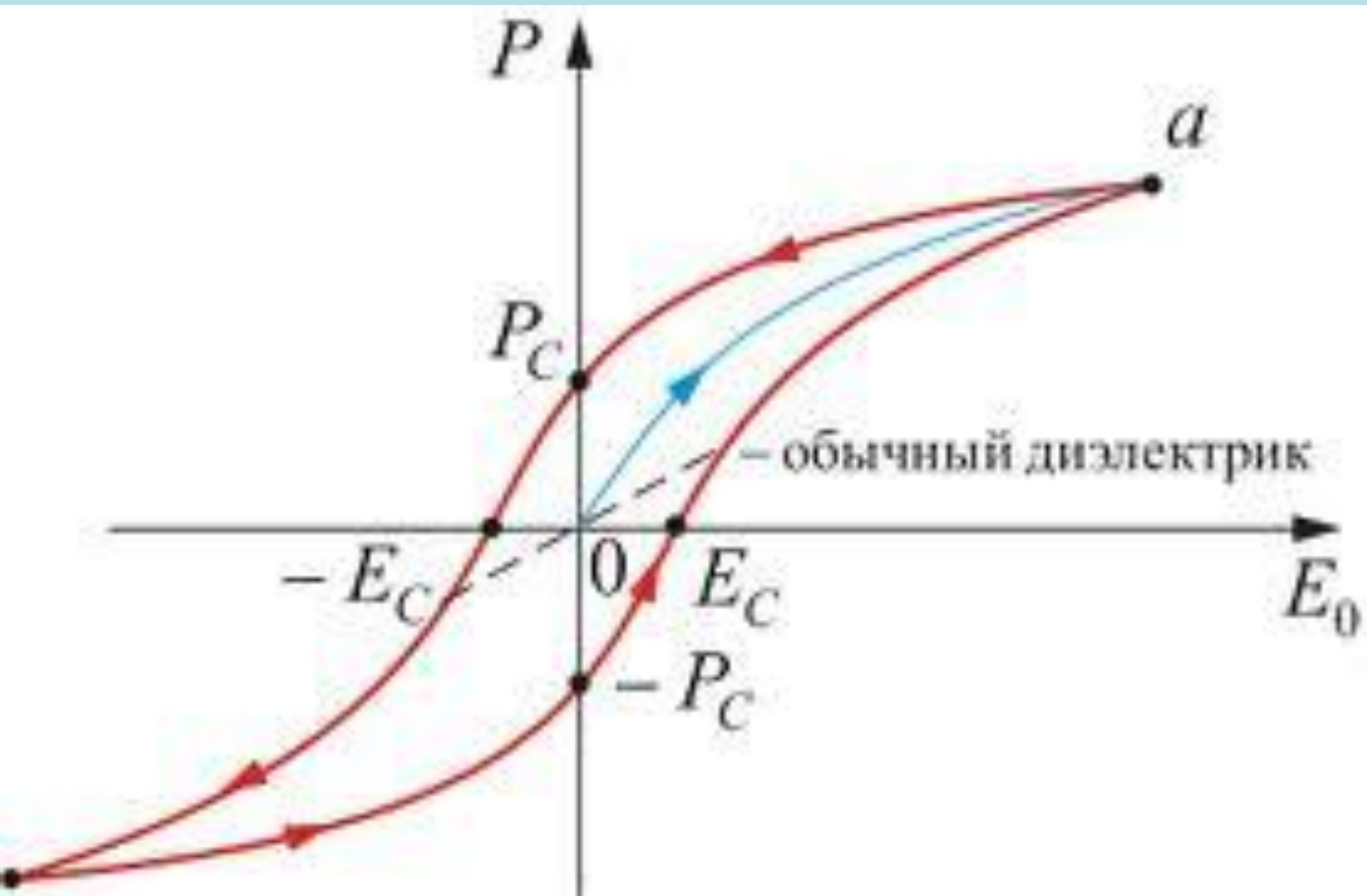


2. Залежність вектора поляризації сегнетоелектрика від вектора напруженості зовнішнього електричного поля $\vec{P} = P(\vec{E})$ є нелінійною і залежить від напруженості поля у попередній момент — *явище діелектричного гістерезису*.

Із збільшенням напруженості зовнішнього поля E , поляризованість сегнетоелектрика \vec{P} зростає і досягає насичення у т. А. Зменшення \vec{P} із зменшенням E здійснюється по кривій АС, і при $E = 0$ сегнетоелектрик зберігає залишкову поляризованість. Для її усунення, необхідно прикласти електричне поле зворотного напрямку.

Напруженість E_k при $P = 0$ називають *коерцитивною силою* – напруженість поля, необхідна для ліквідації залишкової поляризованості. Криву $OABCSDA$ називають *петлею гістерезису*.

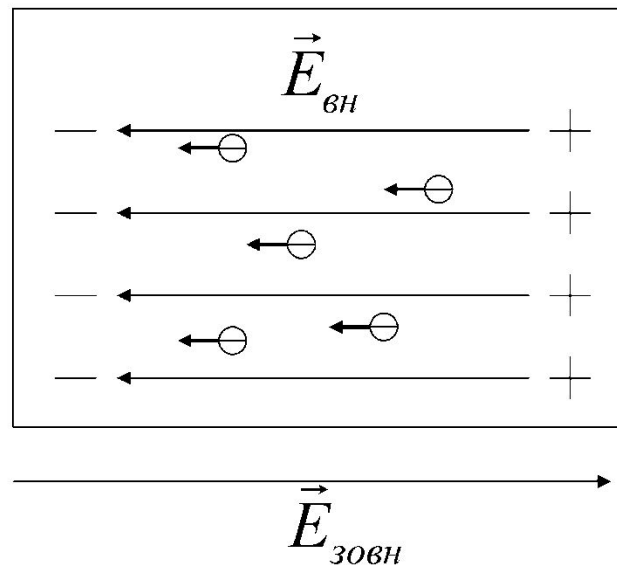


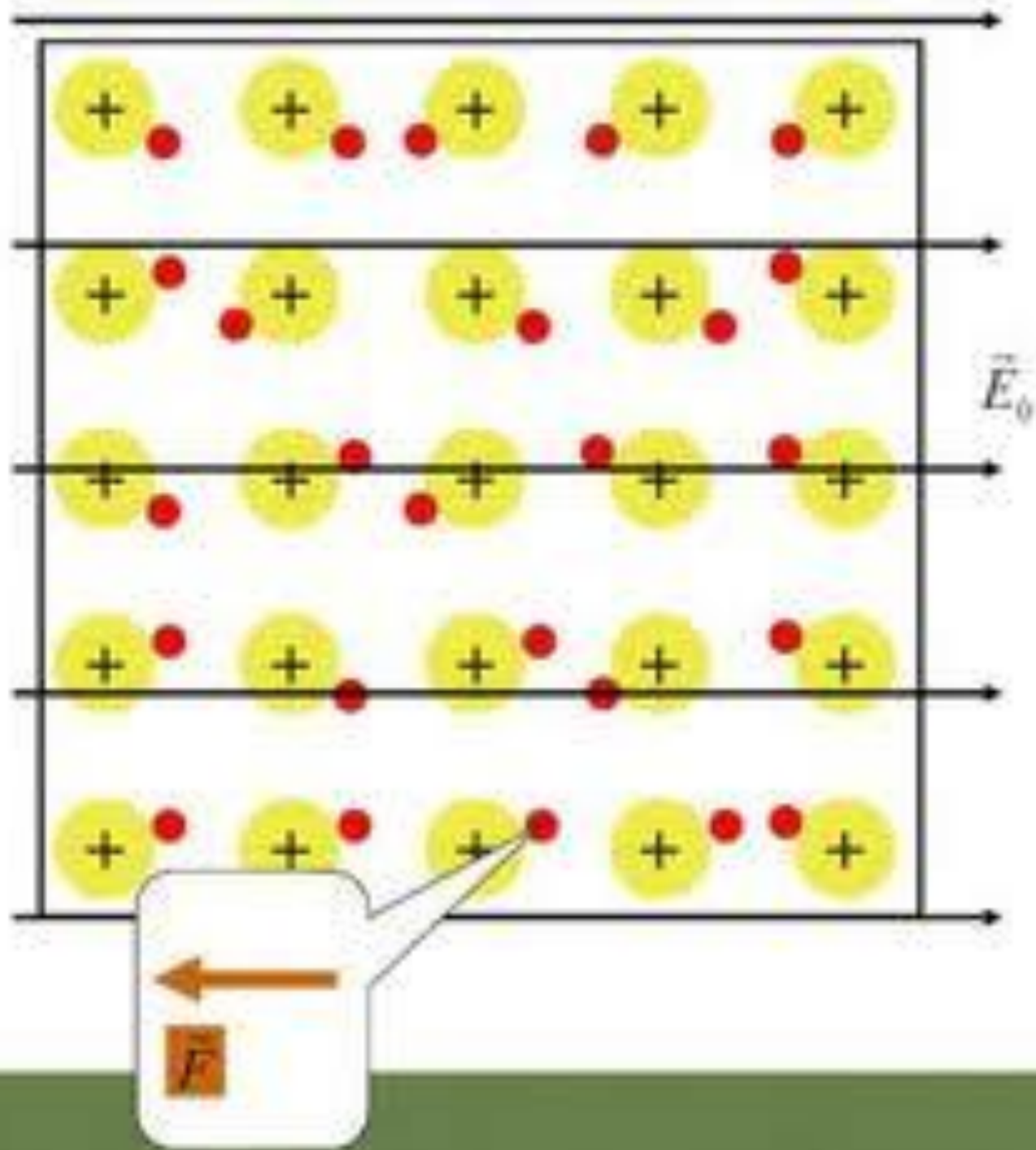


3. Провідники в електричному полі.

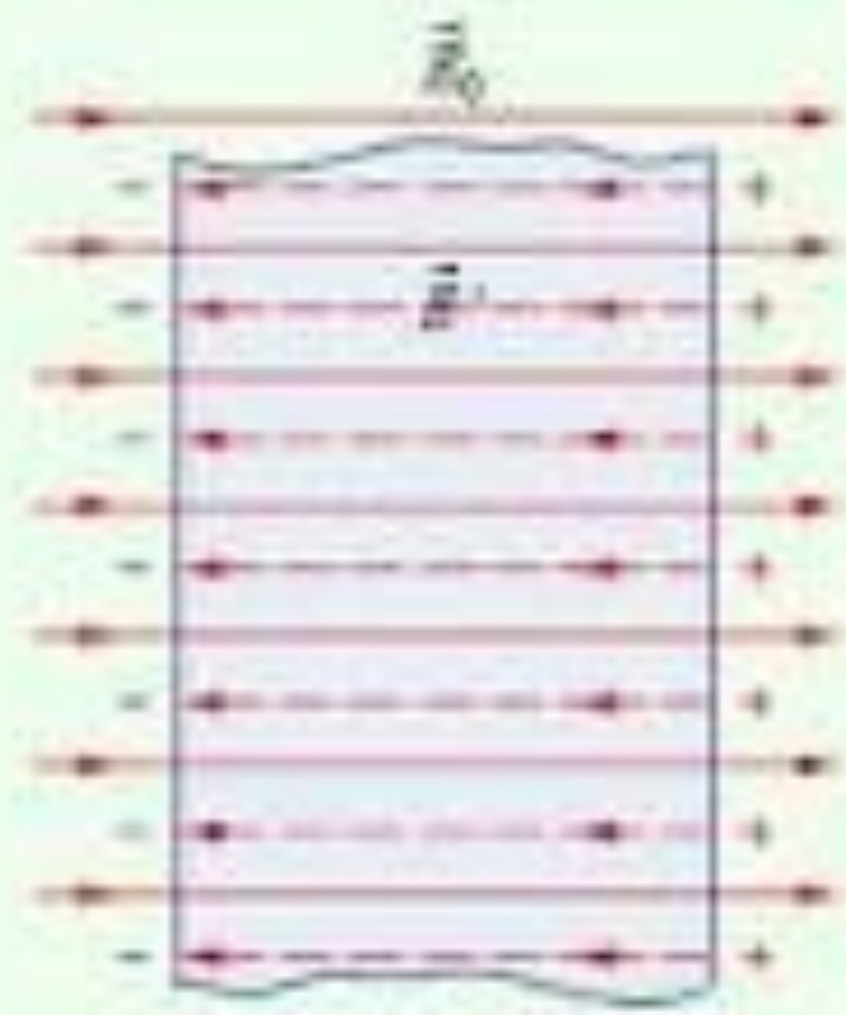
Провідники – це речовин, які проводять електричний струм через наявність вільних носіїв заряду (електронів).

При внесенні провідника в електричне поле, вільні заряди переміщуються під дією сил поля. Переміщення відбуватиметься до тих пір, поки напруженість внутрішнього поля, створеного зміщеними зарядами, не буде дорівнювати напруженості зовнішнього поля $E_{вн} = E_{зовн}$, тобто не настане рівновага і результуюче поле у провіднику не дорівнюватиме нулеві $\vec{E}_{вн} + \vec{E}_{зовн} = 0$.





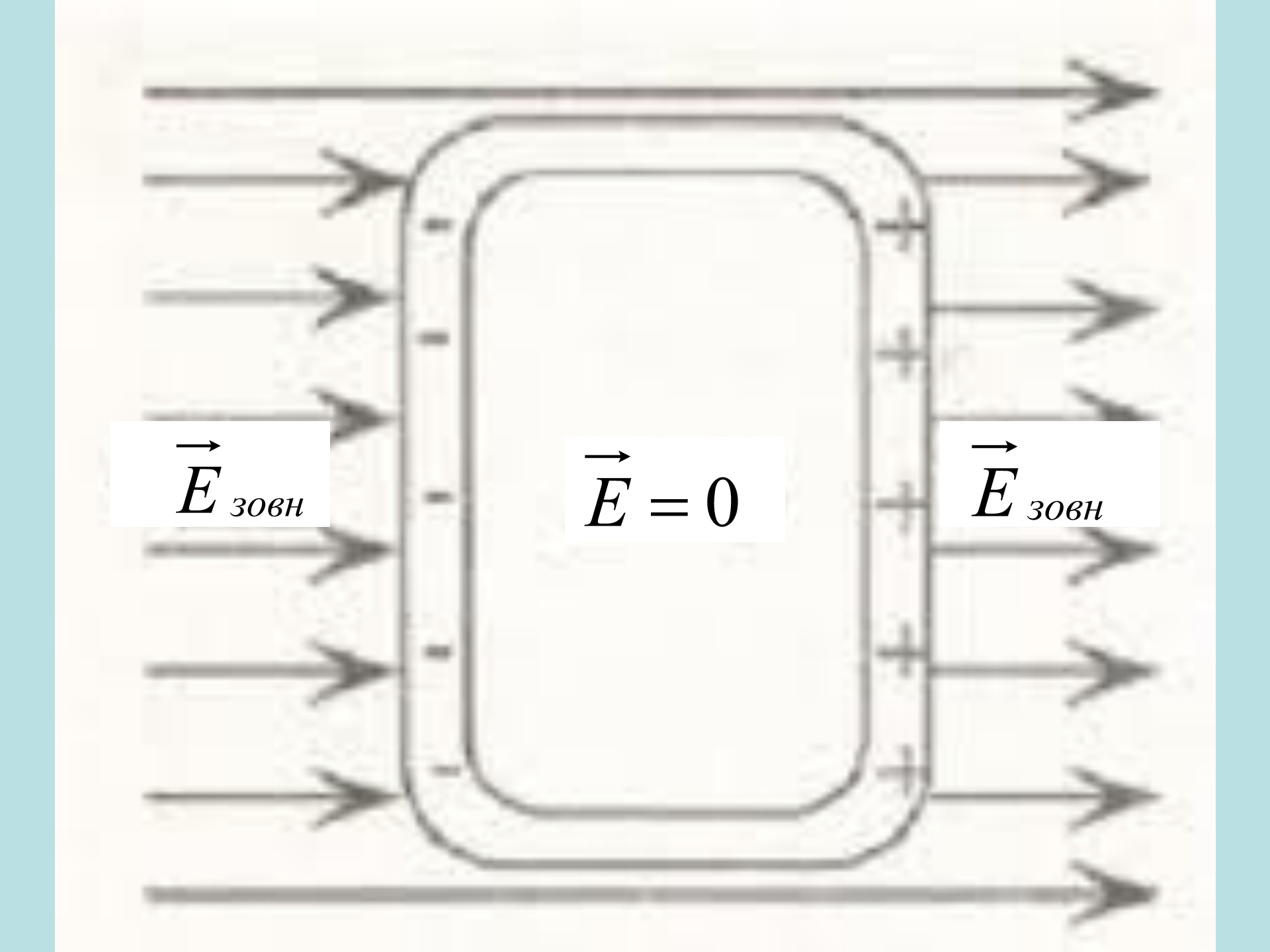
$$\rho_{\text{ext}} = 0$$



$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = 0$$

Надлишковий заряд у провіднику, як і наведені заряди в діелектрику, завжди знаходиться у дуже тонкому поверхневому шарі товщиною порядку міжатомної відстані. Це легко довести застосовуючи теорему Гаусса до будь-якого нескінченно малого об'єму провідника, враховуючи, що напруженість у ньому тотожно дорівнює нулеві $\vec{E} = 0$.

Всередині провідника електричне поле відсутнє $\vec{E} = 0$. Враховуючи зв'язок напруженості поля з його потенціалом $\vec{E} = -\overrightarrow{grad}\varphi$, матимемо, що $\varphi = const$. Це означає, що весь провідник, включаючи і його поверхню, має однаковий потенціал. Провідник являє собою екіпотенціальну поверхню, тому вектор напруженості електричного поля провідника спрямований перпендикулярно до його поверхні.



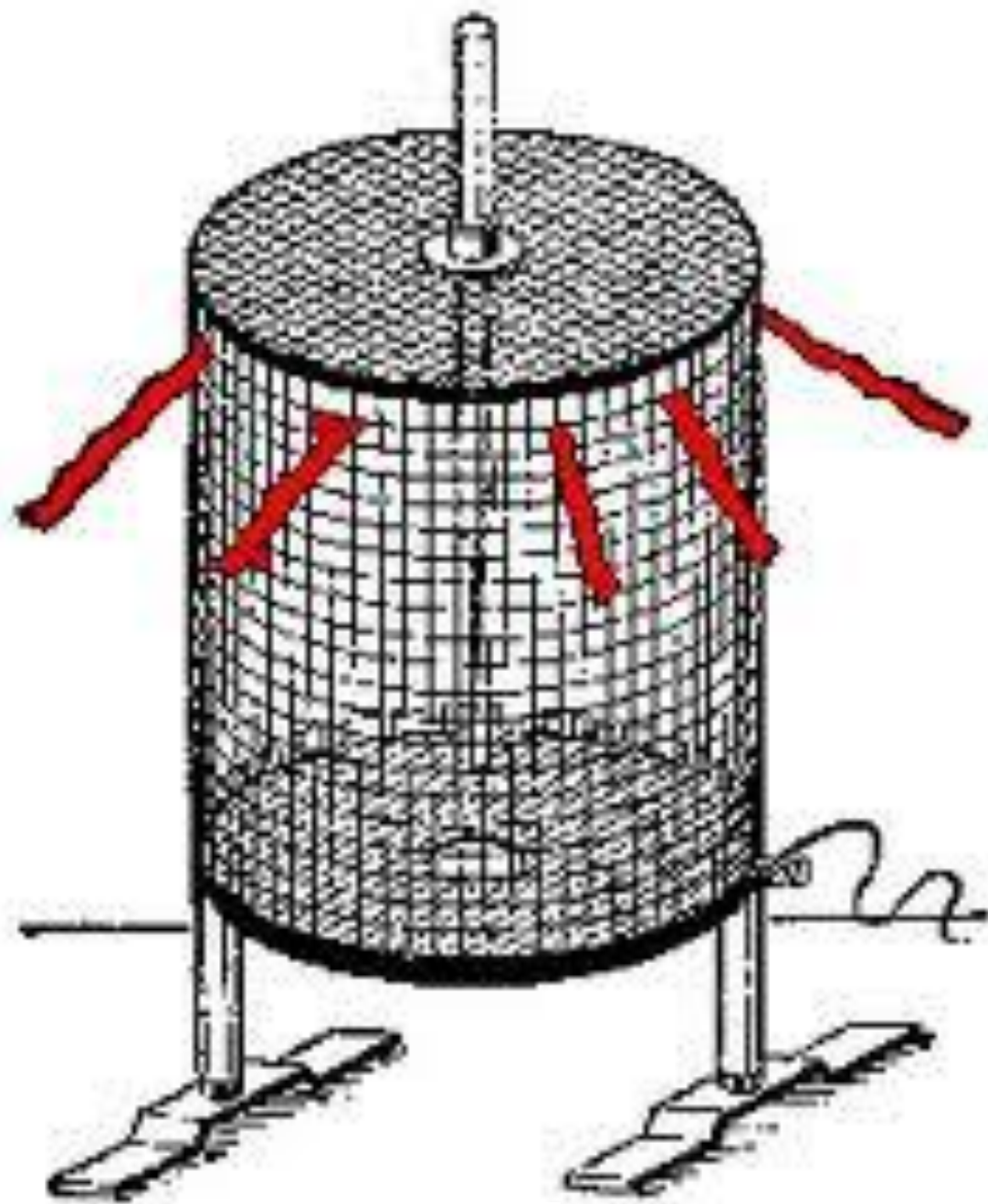
The diagram illustrates a rectangular cavity with rounded corners, surrounded by a thick, shaded shield. Horizontal arrows represent the electric field \vec{E} . Outside the shield, the field is uniform and directed to the right, labeled $\vec{E}_{\text{зовн}}$. Inside the cavity, the field is zero, labeled $\vec{E} = 0$. The shield's thickness is indicated by dashed lines on the left and right sides, and plus signs on the right side.

$\vec{E}_{\text{зовн}}$

$\vec{E} = 0$

$\vec{E}_{\text{зовн}}$

Якщо провідник з порожниною заземлити, то потенціал у всіх точках порожнини буде рівним нулю, тобто порожнина повністю ізольована від впливу зовнішніх електростатичних полів. На цьому принципі засноване явище *електростатичного захисту* об'єктів – екранування тіл від впливу зовнішніх електростатичних полів. На практиці суцільні провідники замінює щільна металева сітка, яка є ефективною при захисті не лише статичних але й змінних електричних полів. Електростатичного захисту 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 проведення електрозварювальних, висотних монтажних та оздоблювальних робіт.









4. Електроємність провідника і конденсатора. З'єднання конденсаторів.

Якщо провіднику надати заряд q_1 , то заряд розподілиться по поверхні провідника і створить на поверхні провідника електричне поле з потенціалом φ_1 . При зміні заряду провідника до q_i , потенціал провідника зміниться до φ_i , але для даного провідника відношення його заряду до потенціалу є величиною сталою:

$$\frac{q_1}{\Delta\varphi_1} = \frac{q_i}{\Delta\varphi_i} = \text{const} .$$

Електричною ємністю провідника називають скалярну фізичну величину, що характеризує здатність провідника накопичувати на своїй поверхні заряди і чисельно рівна заряду, який потрібно надати провіднику, щоб змінити потенціал його поверхні на одиницю:

$$C = \frac{dq}{d\phi}, [C] = \Phi \text{ (фарад)}.$$

Одиницею ємності є 1Φ (фарад), тобто ємність такого провідника, надання якому заряду в 1 Кл змінює потенціал поверхні на 1 В : $1 \Phi = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}$.

Ємність окремих тіл невелика, так, наприклад, у Землі $C = 6,4 \cdot 10^{-4} \Phi$, тому на практиці використовують $1 \text{ мк}\Phi = 10^{-6} \Phi$, $1 \text{ н}\Phi = 10^{-9} \Phi$ і $1 \text{ п}\Phi = 10^{-12} \Phi$.

Для сферичного провідника радіусом R , що знаходиться у середовищі з діелектричною проникністю ε , за визначенням ємність становитиме:

$$C = \frac{dq}{d\varphi} = \frac{dq}{\frac{dq}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R}},$$

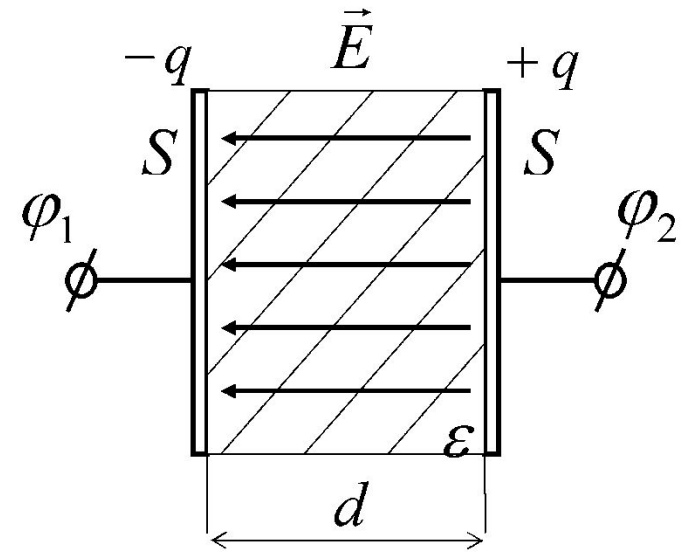
$$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R.$$

Для накопичення і зберігання електричних зарядів використовують систему близько розташованих провідників, розділених діелектриком, яку називають *конденсатором*.

Ємність конденсатора (або взаємна електроємність провідників) чисельно дорівнює заряду, який необхідно перенести з одного провідника на інший, щоб змінити різницю потенціалів між провідниками на одиницю:

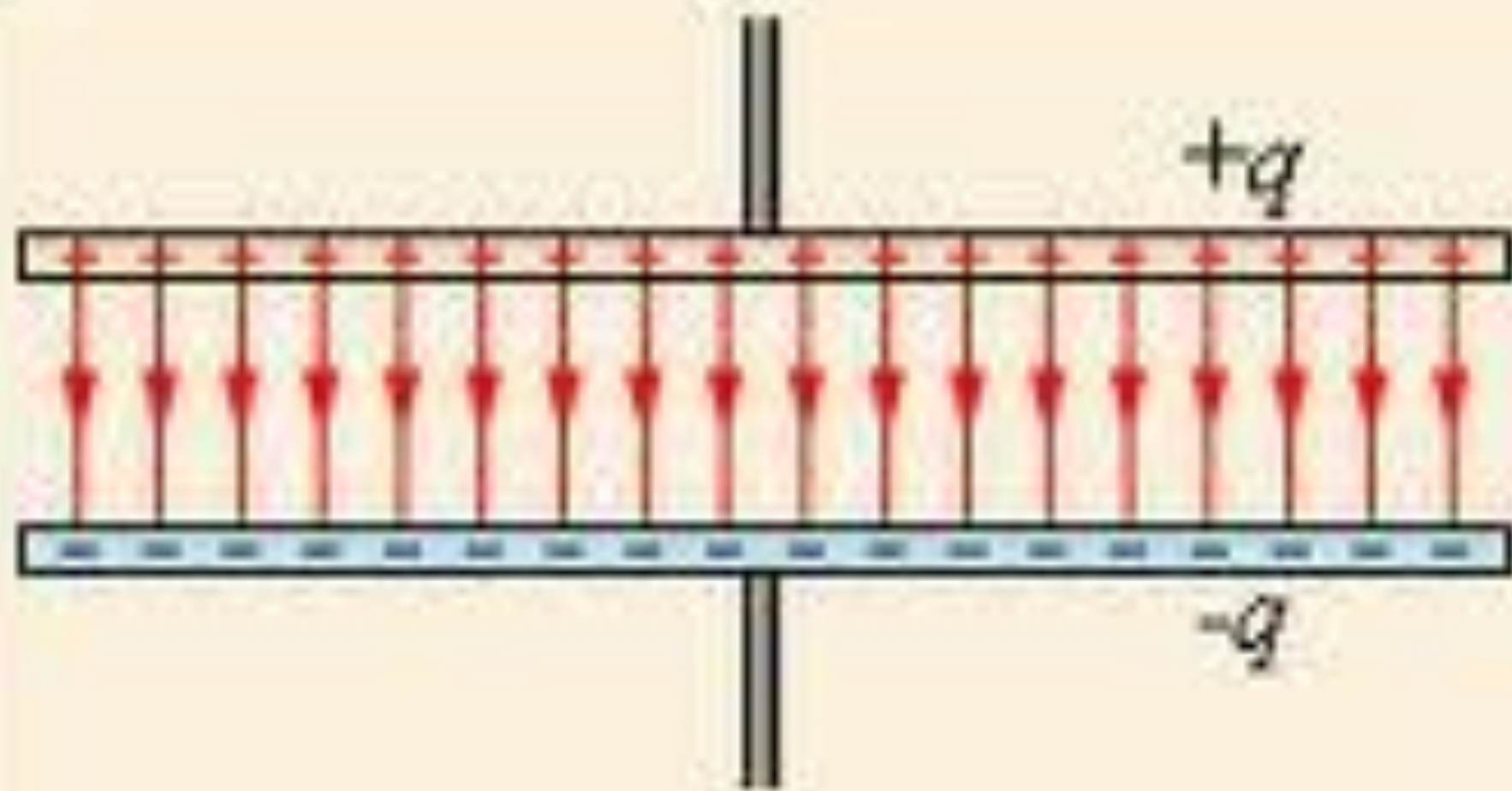
$$C = \frac{q}{\Delta\varphi}.$$

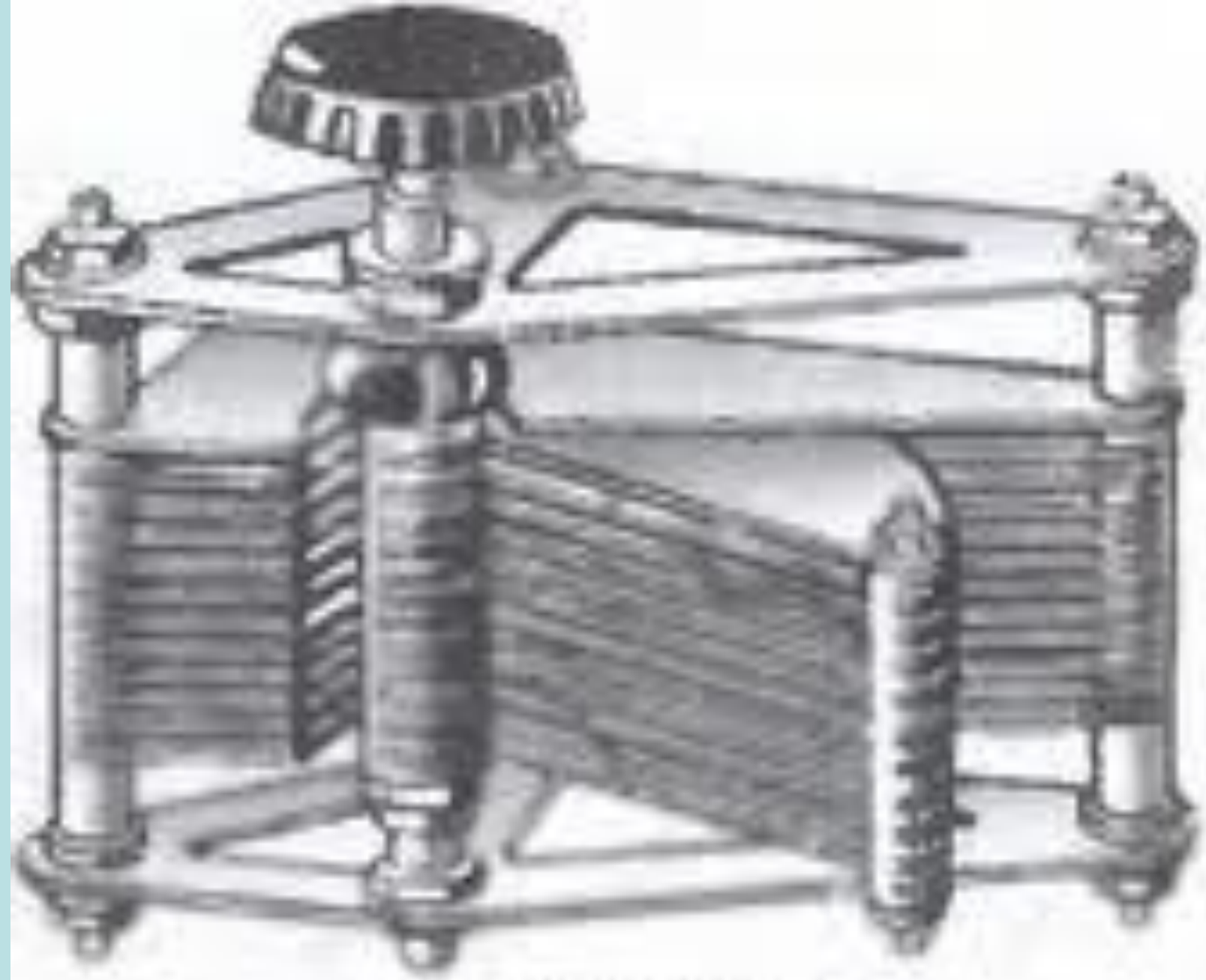
Плоским конденсатором називають систему, що складається з двох паралельних металевих пластин площею S кожна, простір між якими товщиною d заповнено діелектриком з проникністю ε .



Ємність плоского конденсатора можна обчислити за його параметрами:

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{q}{E \cdot d} = \frac{\sigma S}{\frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} d} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} .$$





Станноль



Парафинированная
бумага

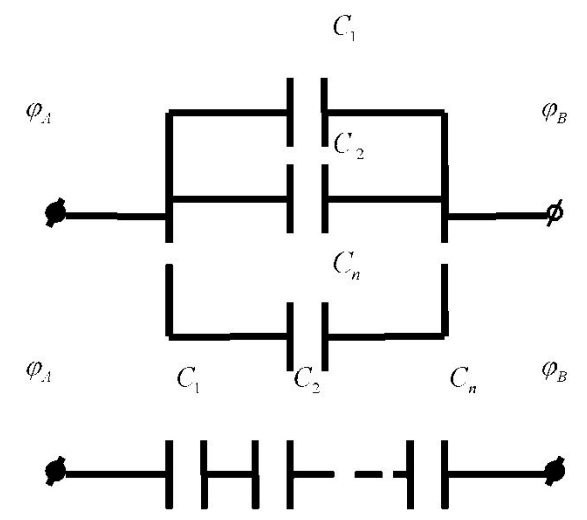




Ємність системи паралельно або послідовно з'єднаних конденсаторів визначають за формулами:

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

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



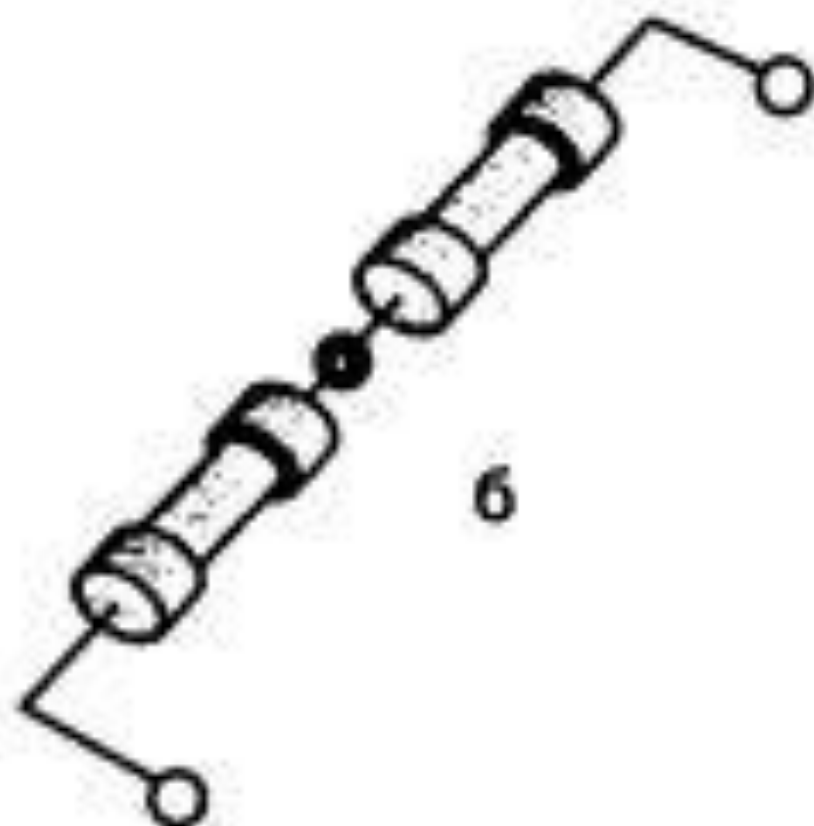
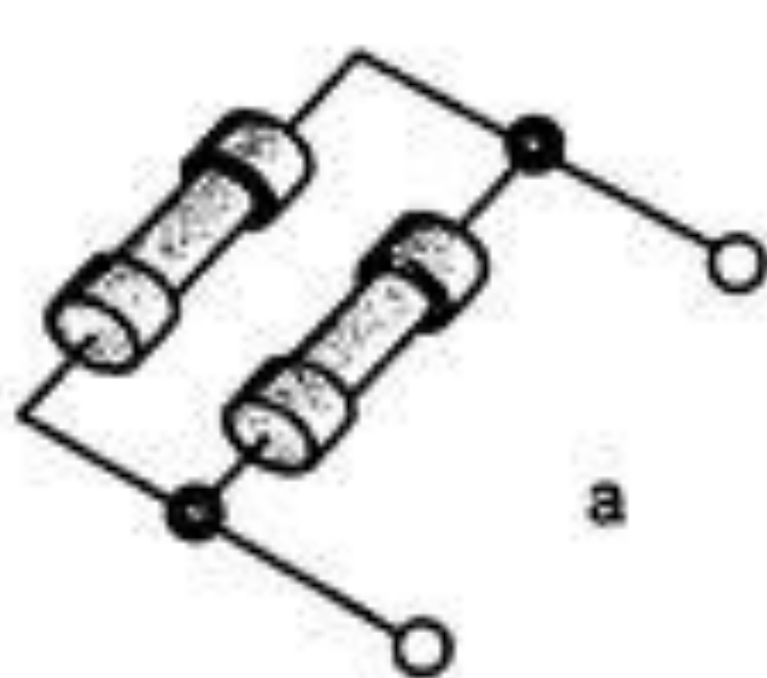
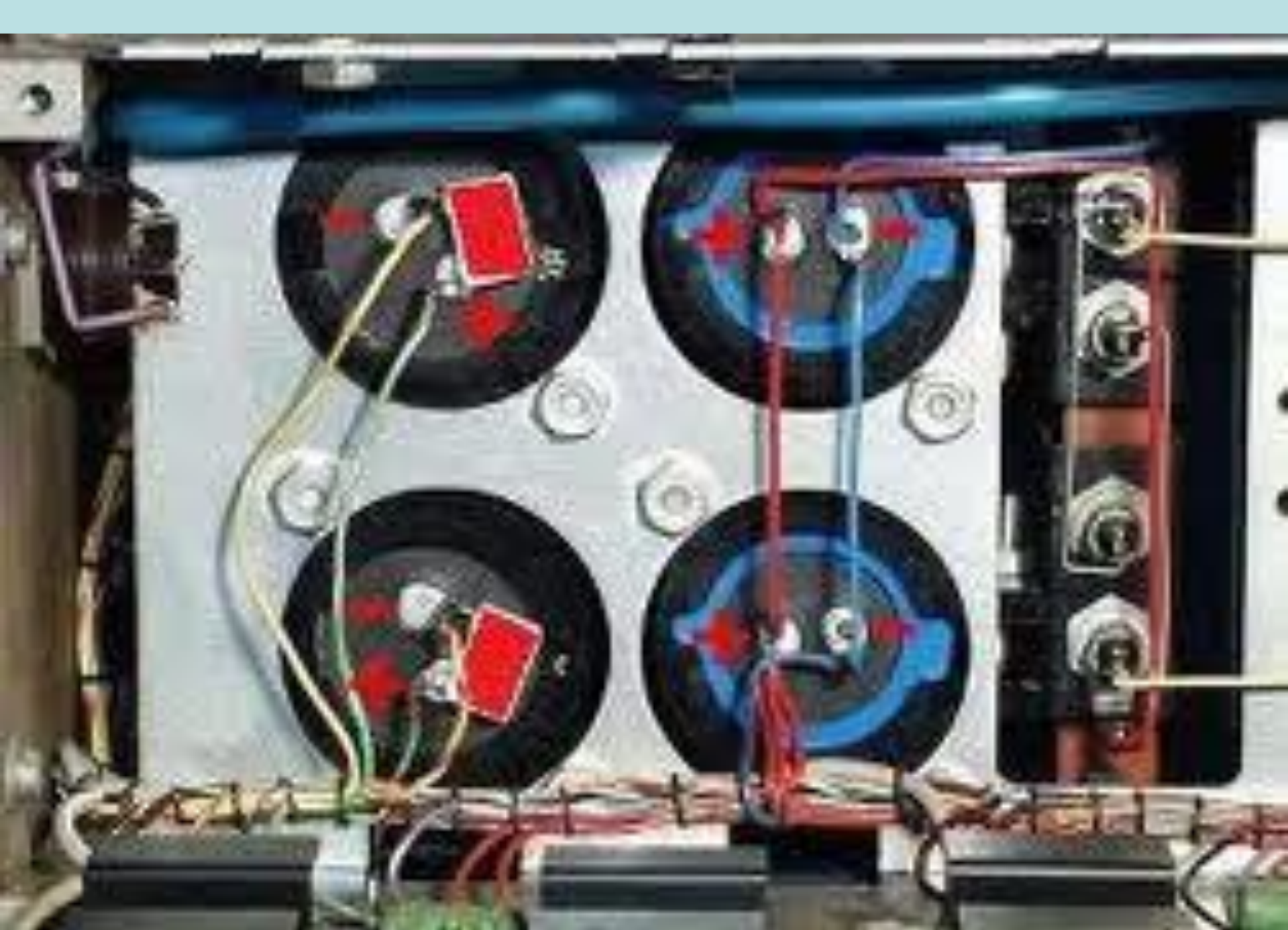


Рис. 13.1. Примеры соединения резисторов:
а – параллельное; б – последовательное





5. Енергія електростатичного 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 інша – негативно і між ними буде виникати різниця потенціалів $\varphi = \frac{q}{C}$. Роботу, яку необхідно буде виконати у наступний момент проти сил поля, дорівнюватиме:

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

Повна робота по зарядженню пластин конденсатора від 0 до заряду q :

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

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

$$W_{\text{конд}} = \frac{q^2}{2C} = \frac{q\Delta\varphi}{2} = \frac{C\Delta\varphi^2}{2} .$$

Об'ємну густину енергії електростатичного поля ϖ можна обчислити, прийнявши до уваги, що поле конденсатора однорідне і зосереджене між його обкладками:

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

і тоді

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

Якщо відома напруженість поля в кожній точці, то *повну енергію електричного поля системи зарядів* знаходять інтегруванням по об'єму, що займає поле:

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

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

На відміну від повної енергії поля, енергія взаємодії окремих зарядів може бути як додатною, так і від'ємною. Розглянемо систему двох зарядів q_1 і q_2 , що знаходяться на відстані r_{12} . Потенціальну енергію взаємодії, визначимо через роботу по розведенню зарядів на нескінченність:

$$W_{12} = A_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_{12}} .$$

Очевидно, що у випадку різнойменних зарядів W_{12} від'ємна.

Окрім енергії взаємодії між зарядами, кожен з них має власну енергію, затрачену зовнішніми джерелами на створення цього заряду. Енергія зарядженого тіла (провідника):

$$W = \frac{q\varphi}{2} .$$

Лекція № 8. Поляризація діелектриків. Провідники в електростатичному полі.

- 1. Поведінка диполя в однорідному та неоднорідному електричному полі.**
- 2. Полярні та неполярні діелектрики.
Поляризація діелектриків,
характеристики їх поляризованого
стану.**
- 3. Провідники в електричному полі.**
- 4. Електроємність провідника і
конденсатора. З'єднання конденсаторів.**
- 5. Енергія електростатичного поля.**