

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВНУТРІ-
ШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни
«Основи електрики та електроніки, електричні
вимірювання та їх стандартизація»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт
(Оператор безпілотних літальних апаратів)***

**за темою № 2 - Провідники та діелектрики в електричному полі. Електрична
ємність**

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного уні-
верситету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1

Розробник: викладач циклової комісії Авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., доцент, спеціаліст вищої категорії, Юрко О.О.

Рецензенти:

1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю.М.
2. Заступник директора з ОЛР, командир авіаційного загону ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Гетьман Ю.Ю.

План лекції:

1. Провідник у електричному полі
2. Електроємність, конденсатори
3. Енергія і щільність енергії електричного поля
4. Діелектрики у електричному полі
5. Класифікація діелектриків
6. Електричне поле в діелектриках

Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті

Основна:

1. Болюх В. Ф., Данько В. Г., Гончаров Є. В. Основи електротехніки, електроніки та мікропроцесорної техніки. Харків: Планета-Прінт, 2019. 248 с.
2. Васильєва Л. Д., Медведенко Б. І., Якименко Ю. І. Напівпровідникові прилади: Підручник. Київ: ІВЦ Видавництво "Політехніка", 2003. 338 с.
3. Кармазін В.В., Семенець В.В Курс загальної фізики. Навчальний посібник для вищих навчальних закладів. Київ: Кондор, 2016. 786 с.
4. Коваль Ю. О., Гринченко Л. В., Милютченко І. О., Рибін О. І. Основи теорії кіл. Ч. 1. Харків : Компанія СМІТ, 2008. 432 с.
5. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: Теорія і практикум: навч. посіб. Київ: Каравела, 2004. 432 с.
6. Лавренова Д. Л., Хлистов В. М. Основи метрології та електричних вимірювань: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 133 с.

Допоміжна:

1. Андріяшик М. В., Вербицький Б. І., Король А.М. Курс фізики. Київ: Фламенко, 2008. 530 с.
2. Готра З. Ю., Лопатинський І. Є., Лукіянець Б. А., Микитюк З. М., Петрович І. В. Фізичні основи електронної техніки: Підручник. Львів: Видавництво "Бескид Бит", 2004. 880 с.
3. Гумен Б. М., Гуржій А. М., Співак В. М. Основи теорії електричних кіл: у 3 кн. Київ: Вища шк., 2003.
4. Дмитрієва В. Ф. Фізика: Навч. посіб, Київ: Техніка, 2008. 648 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. <https://www.youtube.com/channel/UCWfhBu4fAt126ZbxREz3IBw>

Текст лекції

1. Провідник у електричному полі

Всі речовини за електричними властивостями поділяють на три великі групи: діелектрики (ізолятори), напівпровідники і провідники.

Провідники – це речовини в яких є вільні електричні заряди, що можуть переміщуватись у межах провідника в електричному полі.

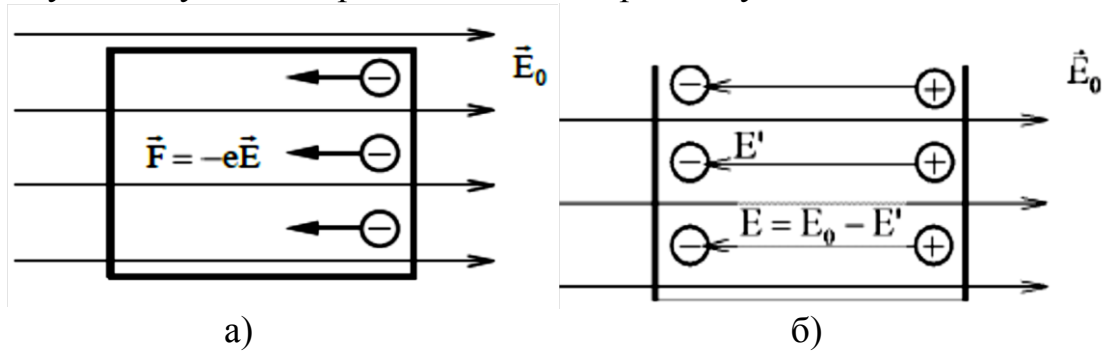


Рисунок 1 – Утворення індукованих зарядів

Якщо у електричне поле напруженістю \vec{E}_0 (рис. 1, а) внести провідник, то вільні електрони почнуть рухатись назустріч полю (рис. 1, б). Після розподілу зарядів, обумовленого уходом електронів у одну частину провідника і утворенню некомпенсованого позитивного заряду іонів у протилежних кінцях провідника виникають поверхневі заряди протилежного знаку, які називають *індукованими зарядами*. Всередині провідника виникне власне поле \vec{E}' , спрямоване назустріч зовнішньому полю \vec{E}_0 . Коли результуюче поле у провіднику стане нульовим

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = E_0 - E' = 0,$$

перерозподіл електронів завершиться.

Коли $\vec{E} = 0$, то

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0,$$

тобто дорівнюють нулю всі похідні потенціалу, отже, всередині зарядженого провідника потенціал є сталим, тобто об'єм провідника і його поверхня є *еквіпотенціальними*. Отже, поза провідником напруженість електричного поля поблизу його поверхні буде перпендикулярною до неї.

Частина силових ліній поля розривається – вони закінчуються на негативних індукованих зарядах і знову починаються на позитивних індукованих зарядах.

Якщо всередині провідника є порожнина, то електричне поле в ній, як і у всьому провіднику дорівнюватиме нулю. Цей ефект застосовують для екранування від електричних полів. Це широко застосовують у конструкціях радіоелектронних та телекомунікаційних пристроїв.

Таким чином, маємо наступне:

1. Весь заряд провідника розподілений по його поверхні.

2. Напруженість електричного поля поза провідником перпендикулярна до його поверхні, оскільки ця поверхня є еквіпотенційною.

Візьмемо на поверхні провідника невелику ділянку площею ΔS . Всередині провідника $\vec{E} = 0$, отже

$$\Phi_E = E \Delta S.$$

За теоремою Гауса

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon} = \frac{\sigma_s \Delta S}{\epsilon_0 \epsilon}.$$

Звідки маємо, що напруженість електричного поля поблизу поверхні провідника становитиме:

$$E = \frac{\sigma_s}{\epsilon_0 \epsilon}. \quad (1)$$

Для відокремленого провідника при заданому його потенціалі поверхнева щільність зарядів визначається кривизною його поверхні. Щільність зарядів зростає із зменшенням радіусу додатної кривизни (опуклості) і зменшується із зменшенням радіусу від'ємної кривизни (увігнутості).

2. Електроємність, конденсатори

Коефіцієнт пропорційності між потенціалом і зарядом відокремленого провідника – електроємність або ємність

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

Одиницею виміру ємності є фарад ($\Phi = \text{Кл/В}$) – це ємність у якого при заряді в 1 Кл потенціал дорівнює 1 В.

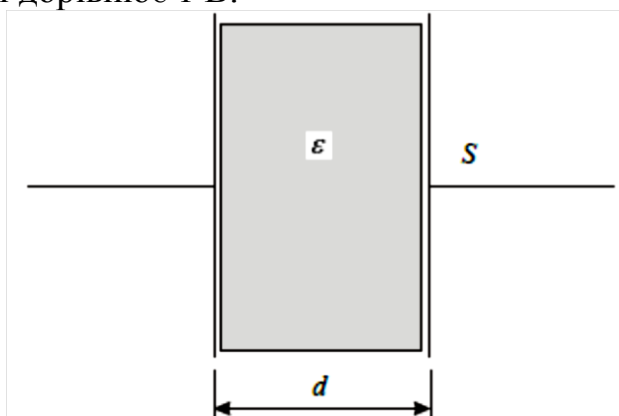


Рисунок 2 – Плaskий конденсатор

Конденсатори – пристрої, які накопичують (конденсують) заряди. Заряди на обкладинках конденсаторів мають однакову величину q , але протилежні знаки. Основною характеристикою конденсатора є його ємність, яку визначають із співвідношення

$$C = \frac{q}{U},$$

де $U = \varphi_1 - \varphi_2$ – різниця потенціалів, або напруга між його обкладинками.

Плаский конденсатор: система з двох близько розташованих паралельних заряджених пластин між якими знаходиться діелектрик.

Ємність плоского конденсатора

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\sigma S}{Ed} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \sigma S}{\sigma d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}.$$

3. Енергія і щільність енергії електричного поля

На рис. 3 зображений плоский конденсатор. Його ліва пластина закріплена, а права може рухатись вздовж горизонтального напрямку. Ліва пластина заряджена позитивним зарядом q_+ , на правій – той самий за величиною, але негативний заряд q_- .

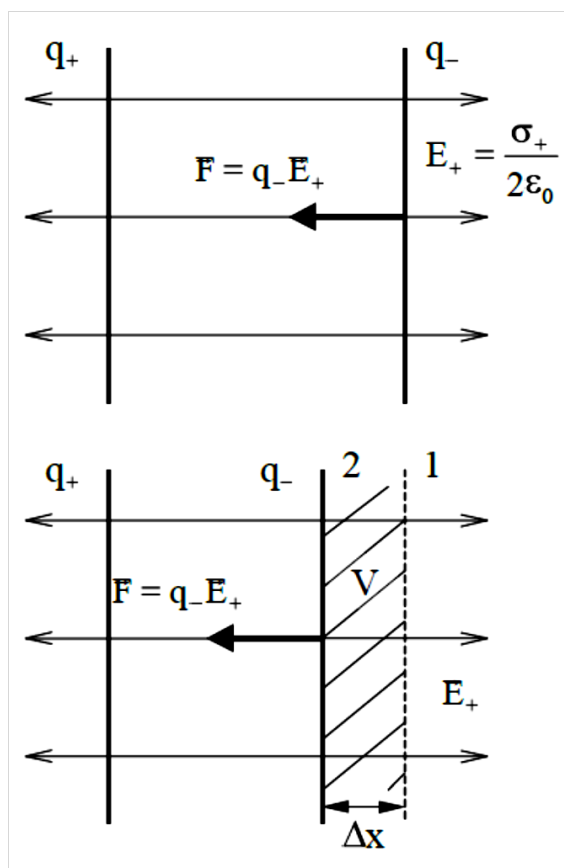


Рисунок 3 – До визначення енергії електричного поля

З боку електричного поля позитивної пластини на ліву, негативну, діятиме сила

$$\vec{F} = q_- \vec{E}_+.$$

В цій формулі E_+ – поле створене пластиною (+):

$$\vec{E}_+ = \frac{\sigma_+}{2\varepsilon_0}, \quad q_- = \sigma_- S,$$

де $\sigma_s = |\sigma_+| = |\sigma_-|$ – поверхнева щільність заряду;
 S – площа пластини.

Переміщуючи праву пластину на відстань Δx (див. рис. 3), ця сила виконає роботу:

$$A_{12} = F\Delta x = q_- \vec{E}_+ \Delta x = \sigma_- S \frac{\sigma_+}{2\varepsilon_0} \Delta x = \frac{\sigma_s^2}{2\varepsilon_0} S \Delta x.$$

Виразимо поверхневу щільність заряду через напруженість результуючого поля E між обкладинками:

$$\sigma_s = \varepsilon_0 E.$$

З урахуванням цього роботу A_{12} можна виразити через напруженість E поля конденсатора

$$A_{12} = \frac{\sigma_s^2}{2\varepsilon_0} S \Delta x = \frac{(\varepsilon_0 E)^2}{2\varepsilon_0} S \Delta x = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} S \Delta x.$$

Добуток $S \Delta x = \Delta V$, тобто об'єму з якого поле E зникло при переміщенні правої пластини. З урахуванням цього:

$$A_{12} = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} \Delta V.$$

Робота дорівнює зменшенню потенційної енергії правої пластини у полі лівої.

$$A_{12} = W_{п1} - W_{п2} = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} \Delta V. \quad (2)$$

Введемо поняття щільності енергії електричного поля w відповідно до визначення

$$w = \frac{\Delta W}{\Delta V} = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}, \quad (3)$$

де ΔW – енергія електричного поля, накопичена у об'ємі ΔV .

Коли поле \vec{E} є неоднорідним, то знаючи щільність енергії у кожній точці, можна визначити енергію поля, що міститься у будь-якому об'ємі V :

$$W = \int_V w(\vec{r}) dV = \int_V \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2(\vec{r})}{2} dV.$$

Енергію W зарядженого конденсатора знайдемо, помноживши w з (1.45) на об'єм конденсатора $V = Sd$. Виразивши напруженість електричного поля E через різницю потенціалів (напругу) між обкладинками, одержимо:

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

З урахуванням формули ємності плоского конденсатора C , матимемо:

$$W = \frac{CU^2}{2}. \quad (4)$$

Формула є вірною для конденсаторів будь-якої форми.

4. Діелектрики у електричному полі

Діелектрики – це речовини, в яких майже немає вільних електричних зарядів. В ідеальному діелектрику вільні заряди відсутні.

Під час розгляду властивостей діелектриків в якості моделі молекули використовують електричний диполь.

Електричний диполь являє собою систему з двох рівних за величиною зарядів протилежного знаку, рознесених на відстань r . Основною характеристикою диполя є вектор електричного дипольного моменту:

$$\vec{p}_e = q\vec{r}, \quad (5)$$

де \vec{r} – вектор, проведений від негативного заряду до позитивного – збігається з напрямком електричного моменту диполя. Одиницею виміру електричного дипольного моменту є $1\text{ Кл} \cdot \text{м}$.

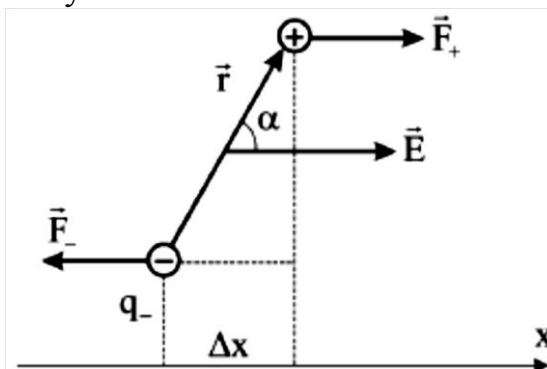


Рисунок 4 – До визначення електричного моменту диполя

Якщо диполь знаходиться у однорідному зовнішньому електричному полі, то на нього діятиме пара сил (рис. 4), обертаючий момент якої дорівнює:

$$M = Fr \sin \alpha = qEr \sin \alpha = p_e E \sin \alpha.$$

Спрямування його визначається за правилом правого гвинта.

Отже, момент сили дорівнюватиме векторному добутку:

$$\vec{M} = [\vec{p}_e \times \vec{E}]. \quad (6)$$

Диполь у електричному полі поступально не переміщується, а лише обертається вздовж поля. При \vec{p}_e паралельному \vec{E} диполь перебуває у стані стійкої рівноваги.

5. Класифікація діелектриків

Всі речовини складаються з атомів та молекул, де є позитивні і від'ємні заряди, хоча в цілому, вони є електрично нейтральними. Всі негативні заряди (а також позитивні) можна замінити одним еквівалентним, який знаходиться у центрі розподілу зарядів.

З огляду на це всі діелектрики поділяють на три групи:

1. Полярні – центри розподілу позитивних і негативних зарядів не збігаються і молекула речовини має власний дипольний момент. Прикладом такого діелектрику є вода (H_2O) (див. рис. 5).

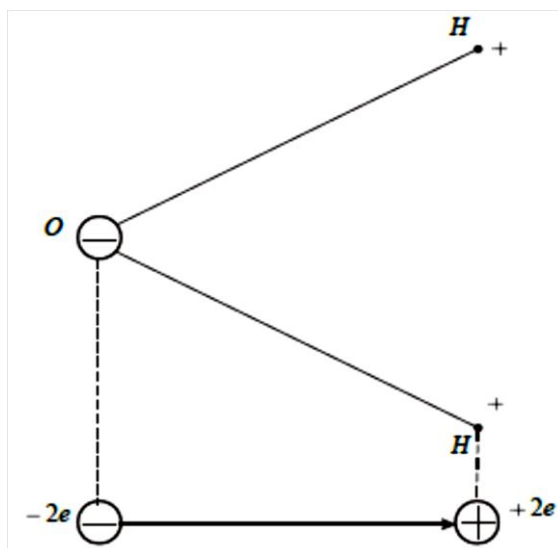


Рисунок 5 – Побудова полярної молекули води

2. Неполарні – молекули з симетричною побудовою, у них центри розподілу зарядів збігаються між собою і власний дипольний момент є нульовим. До них належить багато двохатомних газів (H_2 , N_2 , O_2 та ін.).

3. Третю групу складають іонні кристали, в них існують решітки позитивних і негативних іонів, нібито вставлені одна до іншої. Окремі молекули у такому випадку виокремити не вдається.

Якщо діелектрик помістити у зовнішнє електричне поле, то відбудеться *поляризація діелектрика* – утвориться відмінний від нуля дипольний момент.

В діелектриках першої групи у електричному полі на окремі молекули діятиме момент сил, який намагатиметься обертати їх таким чином, щоб їх дипольний момент був зорієнтованим за полем. Через тепловий рух диполі не встановлюються точно за полем, але з'являється переважна орієнтація диполів за полем – *орієнтаційна або дипольна поляризація*.

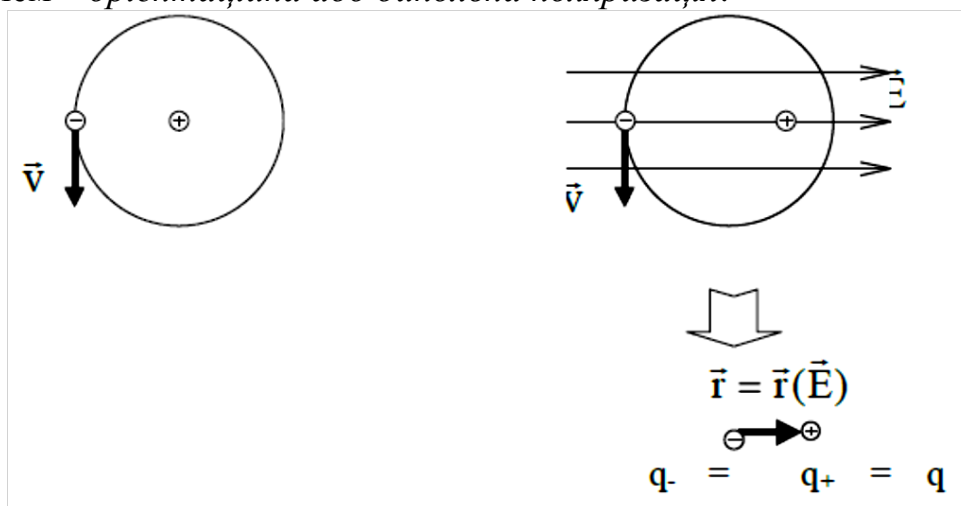


Рисунок 6 – Механізм утворення електронної або деформаційної поляризації

В діелектриках другої групи у електричному полі центри розподілу позитивних і негативних зарядів зміщуються у протилежних напрямках вздовж

поля за рахунок деформації електронних орбіт. При цьому у кожної молекули виникне дипольний момент, орієнтований за полем (див. рис. 6).

Такий дипольний момент називають **індукованим**, а механізм утворення поляризації – *електронною або деформаційною поляризацією*.

В діелектриках третьої групи іонні підрешітки позитивних і негативних іонів зміщуються відносно одна одної.

6. Електричне поле в діелектриках

Кількісною характеристикою степеня поляризації діелектрика є дипольний момент одиниці об'єму діелектрика.

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} \vec{p}_i . \quad (7)$$

Вектор \vec{P} називають **поляризованістю діелектрика**. Одиницею виміру поляризованості буде

$$1 \frac{\text{Кл} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} .$$

Для діелектриків усіх груп за не дуже сильних електричних полів можна вважати, що поляризованість є пропорційною напруженості електричного поля:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E} . \quad (8)$$

Коефіцієнт пропорційності χ має назву *діелектричної сприйнятливості діелектрику*.

Під дією стороннього електричного поля діелектрик поляризується, виникає дипольний момент. Електричні диполі утворюють власне електричне поле, яке накладається на стороннє. Це поле створено зарядами, які не можуть вільно переміщуватись у діелектрику, тому їх називають **зв'язаними**, а поле електричних диполів – полем зв'язаних зарядів.

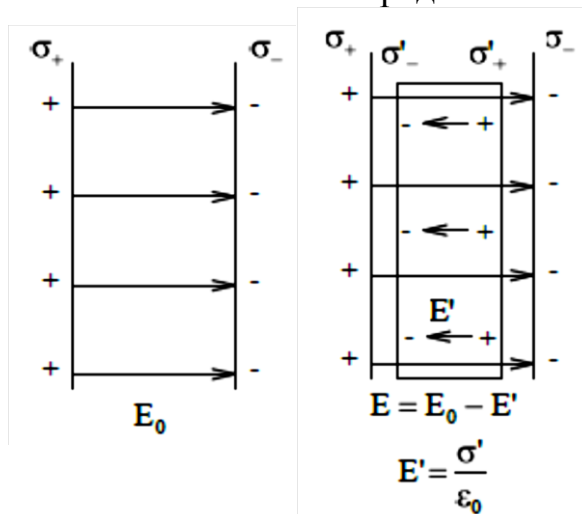


Рисунок 7 – До кількісної оцінки напруженості електричного поля в діелектрику

Напруженість поля в діелектрику за принципом суперпозиції дорівнюватиме:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}', \quad (9)$$

Де \vec{E}_0 – напруженість стороннього (зовнішнього) поля;

\vec{E}' – напруженість поля, створеного зв'язаними зарядами.

Розглянемо діелектрик, що знаходиться між двома нескінченими рівномірно зарядженими площинами з зарядами протилежних знаків (рис. 7).

Поле, створене площинами, є стороннім полем \vec{E}_0 . Його величина:

$$E_0 = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_0}.$$

Діелектрик між площинами буде поляризованим.

На границях поляризованого діелектрика виникають відмінні від нуля **поверхневі зв'язані заряди**.

З рис. 7 видно, що поле зв'язаних зарядів \vec{E}' спрямоване назустріч зовнішньому полю \vec{E}_0 . З урахування цього з (2.8) для модуля напруженості поля в діелектрику:

$$E = E_0 - E' = E_0 - \chi E.$$

Звідси маємо

$$E = \frac{E_0}{1 + \chi}.$$

Введемо позначення

$$\varepsilon = 1 + \chi. \quad (10)$$

Тоді для напруженості поля у діелектрику матимемо:

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon}. \quad (11)$$

Величину ε називають **відносною діелектричною проникністю речовини**. Вона є основною характеристикою однорідного та ізотропного діелектрика. Це величина безрозмірна.

Ізотропність передбачає однаковість властивостей за всіма напрямками. Ізотропними є гази, рідини та аморфні речовини. У анізотропних діелектриків (кристали), діелектричні властивості за різними напрямками є різними.

У вільному просторі або вакуумі діелектрична проникність $\varepsilon = 1$.

Діелектрична проникність повітря $\varepsilon_{\text{пов}} \approx 1$.

Коли електричні процеси відбуваються у діелектрику, значення напруженості і потенціалу змінюються у ε разів. Тобто, у всіх випадках електричні властивості однорідного ізотропного середовища враховують тим, що у всіх формулах замінюють ε_0 на добуток $\varepsilon_0 \varepsilon$.

Для зручності розрахунків електричних полів у діелектрику вводиться нова величина – вектор електричного зміщення (або електрична індукція):

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}. \quad (12)$$

Застосовуючи формули (8), (10) та (12) можна зв'язати вектор електричного зміщення \vec{D} з вектором напруженості електричного поля \vec{E} і вектором поляризації \vec{P} :

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} = \varepsilon_0 \vec{E} + \varepsilon_0 \chi \vec{E} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}. \\ \vec{D} &= \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}.\end{aligned}\tag{12, a}$$

У вакуумі вектор $\vec{P} = 0$.

Одиниця виміру – $[D] = \text{Кл/м}^2$.

Теорема Гауса для вектору \vec{D} набуває наступного вигляду

$$\oint_S D_n ds = \sum_V q_i ,\tag{13}$$

де $\sum_V q_i$ – сума вільних зарядів у об'ємі V , обмеженому замкненою поверхнею S .