

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

з навчальної дисципліни «Електротехнічні матеріали»  
обов'язкових компонент  
освітньо-професійної програми першого рівня вищої освіти

**Електромеханіка**

за темою № 7 - Діелектрики.  
**Основні електричні властивості діелектриків**

Харків 2022

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.01.2023 № 1

**СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного коледжу  
Протокол від 19.12.2022 № 5

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією Науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 27.01.2023 № 1

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 10.12.2022 № 8.

**Розробник:**

1. Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, Волканін Є.Є.
2. Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, спеціаліст першої категорії, Голованов С.Л.

**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. Поляризація діелектриків.
2. Електропровідність діелектриків.
3. Діелектричні втрати.
4. Пробій діелектриків.

**Рекомендована література:****Основна:**

1. Електротехнічні матеріали: навчальний посібник / В. О. Леонтьєв, С. В. Бевз, В. А. Видмиш. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 122 с.
2. Колесов С.М., Колесов І.С. Електроматеріалознавство (Електротехнічні матеріали). Підручник. – К.: "Дельта", 2008 р. 516 с.
3. Конструкційні та функціональні матеріали / Бабак В.П., Байса Д.Ф., Різак В.М., Філоненко С.Ф. У двох частинах. – К.: Техніка. – Ч.1, 2003.–344 с.; ч.2, 2004. – 368 с.

**Допоміжна:**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Електротехнічні матеріали» для студентів усіх форм навчання та студентів-іноземців за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Укладачі: Будько М.О., Кириленко В.М., Кириленко К.В., Затверджено Вченою радою ФЕА НТУУ «КПІ» (Протокол № 11 від 23 червня 2015 р.) К.: ФЕА НТУУ «КПІ», 2016. – 94 с.

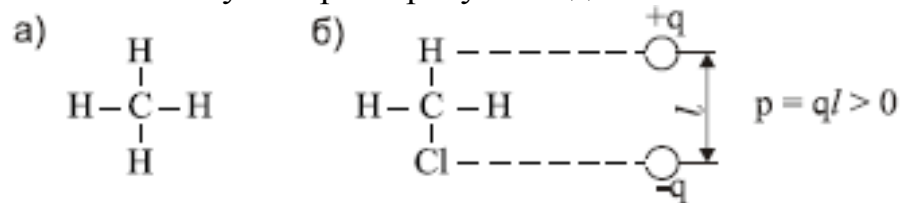
**Інформаційні ресурси в Інтернеті:**

1. <http://electricalschool.info/spravochnik/material/310-klassifikacija-jelektrotekhnicheskikh.html>
2. <http://lib.madi.ru/fel/fel1/fel08E024.pdf>
3. <https://www.twirpx.com/files/science/tek/ematerials/>

### Текст лекції

Діелектрики - речовини, здатні поляризуватися і зберігати електростатичне поле. Це широкий клас електротехнічних матеріалів: газоподібних, рідких і твердих, природних і синтетичних, органічних, неорганічних і елементоорганічних. По виконуваних функцій вони поділяються на пасивні і активні. Пасивні діелектрики застосовуються в якості електроізоляційних матеріалів. В активних діелектриках (сегнетоелектрики, п'єзоелектрики і ін.), Електричні властивості залежать від керуючих сигналів, здатних змінювати характеристики електротехнічних пристроїв і приладів.

За електричної будовою молекул розрізняють неполярні і полярні діелектрики. Неполярні діелектрики складаються з неполярних (симетричних) молекул, в яких центри позитивних і негативних зарядів збігаються. Полярні діелектрики складаються з несиметричних молекул (диполів). Дипольна молекула характеризується дипольним моментом -  $p$ .



Приклади електричної будови молекул діелектриків:

а - неполярная (симетрична) молекула неполярного діелектрика (метану); б - дипольная молекула полярного діелектрика (хлорованого метилу), дипольний момент  $p > 0$

$$p = q \cdot l,$$

де заряд  $q \approx 2 \cdot 10^{-19}$  Кл, відстань між зарядами  $l = (1 \dots 3) \cdot 10^{-10}$  м,  $p = 5 \cdot 10^{-29} \dots 10^{-30}$  Кл.м.

В процесі роботи електротехнічних пристроїв діелектрик нагрівається, так як частина електричної енергії в ньому розсіюється у вигляді тепла. Діелектричні втрати сильно залежать від частоти струму, особливо у полярних діелектриків, тому вони є низькочастотними. Як високочастотних використовуються неполярні діелектрики.

Основні електричні властивості діелектриків

№	Свойство	Характеристика	Обозначение
1	Поляризация	Относительная диэлектрическая проницаемость	$\epsilon$
2	Электропроводность	Удельное электрическое сопротивление	$\rho$ , Ом·м
3	Диэлектрические потери	Тангенс угла диэлектрических потерь	$\text{tg}\delta$
4	Электрическая прочность	Пробивная напряженность	$E_{\text{пр}}$ , МВ/м

## 1. Поляризація діелектриків.

Поляризація - це пружне зміщення зв'язаних зарядів або орієнтація молекул діелектрика в електричному полі. Поляризація супроводжується появою на поверхні діелектрика пов'язаних електричних зарядів.

Здатність діелектрика до поляризації характеризується відносною діелектричною проникністю

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0},$$

де  $C$  - ємність конденсатора з діелектриком;  $C_0$  - ємність конденсатора без діелектрика (в вакуумі).

Розрізняють такі види поляризації:

- електронна поляризація - пружне зміщення і деформація електронних оболонок атомів дією зовнішнього поля (а). Вона властива всім речовинам, але грає виділяючу роль в неполярних діелектриках (газоподібних, рідких і твердих). Така поляризація протікає майже миттєво ( $\tau = 10^{-15}$ с), без втрат енергії, її величина не залежить від частоти поля;

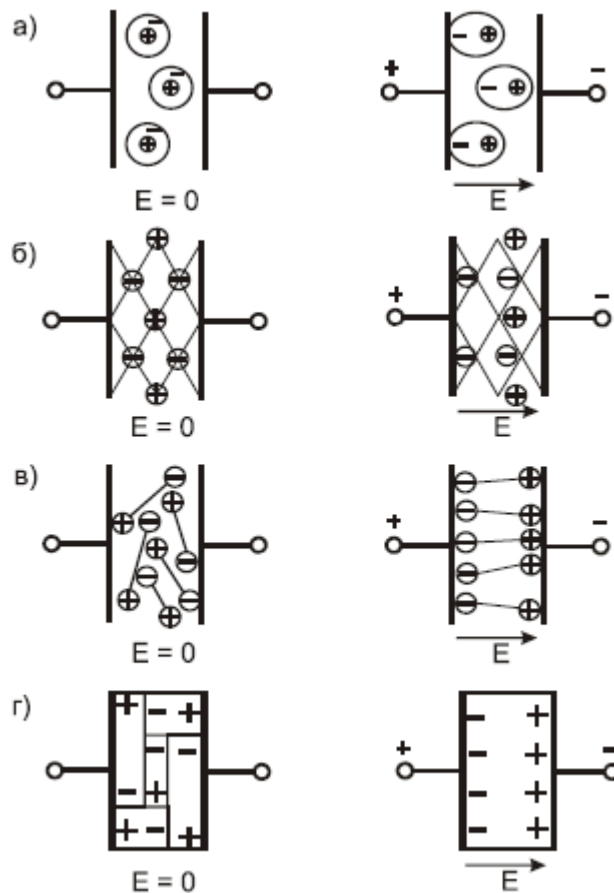


Схема виникнення поляризації: а - електронної, б - іонної, в - дипольно-релаксаційної, г - спонтанної (мимовільної)

- іонна поляризація обумовлена зміщенням пружно пов'язаних іонів в межах межатомної відстані (рис. б). вона

характерна для речовин з іонною будовою, час поляризації невелика ( $\tau = 10^{-13}$ с), відбувається практично без втрат енергії;

- дипольно-релаксацийна поляризація полягає в орієнтації дипольних молекул під дією сил поля (рис. в).

Вона властива полярним діелектриками, протікає в часі ( $T = 10^{-2}\text{с}$ ) і супроводжується втратами енергії;

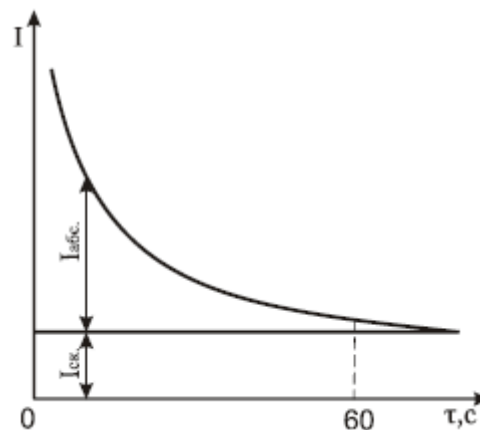
- мимовільна (спонтанна) поляризація спостерігається у сегнетоелектриків. Це речовини, що складаються з наелектризованих областей - доменів, що володіють електричним моментом. Під час відсутності зовнішнього поля домени розташовані довільно, і сумарний момент дорівнює нулю. У зовнішньому полі відбувається переорієнтація доменів і створюється ефект сильної поляризації (рис г): відносна діелектрична проникність досягає  $\epsilon = 10^5$ .

## 2. Електропровідність діелектриків.

Поляризаційні процеси зсуву зв'язаних зарядів в діелектрику до моменту встановлення рівноважного стану відбуваються в часі, створюючи поляризаційні струми або струми зміщення.

При дипольно-релаксацийної поляризації струми зміщення називають ще абсорбційними струмами  $j_{\text{абс}}$ . При постійній напрузі абсорбційні струми виникають тільки в моменти включення і вимкнення напруги. Наявність в технічних діелектриках невеликого числа вільних зарядів призводить до виникнення слабких за величиною струмів наскрізної провідності  $j_{\text{ск}}$ . Таким чином, повний струм в діелектрику, званий струмом витоку, складається з абсорбції і наскрізного.

$$j_{\text{вт}} = j_{\text{абс}} + j_{\text{ск}}.$$



Зміна струму витоку в твердому діелектрику

Провідність діелектрика при постійній напрузі визначається величиною наскрізного струму. При змінній напрузі провідність визначається наскрізним струмом і абсорбційними струмами уповільнених механізмів поляризації. У більшості випадків електропровідність в діелектриках іонна, рідше - електронна.

У твердих діелектриків розрізняють об'ємну та поверхневу електропровідність, яку оцінюють, відповідно, питомим об'ємним опором ( $\rho$ , Ом·м) і питомою поверхневим опором ( $\rho_s$ , Ом).

Питомий об'ємний опір чисельно дорівнює опору куба з ребром в 1 м, якщо струм проходить через дві протилежні грані. У разі плоского зразка в однорідному полі

$$\rho = R \frac{S}{h},$$

де  $R$  - об'ємний опір зразка, Ом;  $S$  - площа електрода, м<sup>2</sup>;  $h$  - товщина зразка, м.

Питомий поверхневий опір чисельно дорівнює опору квадрата будь-яких розмірів, якщо струм проходить через дві протилежні сторони

$$\rho_s = R_s \frac{d}{l},$$

де  $R_s$  - поверхневий опір зразка між паралельно стоять електродами шириною  $d$ , що знаходяться один від одного на відстані  $l$  (рис.).

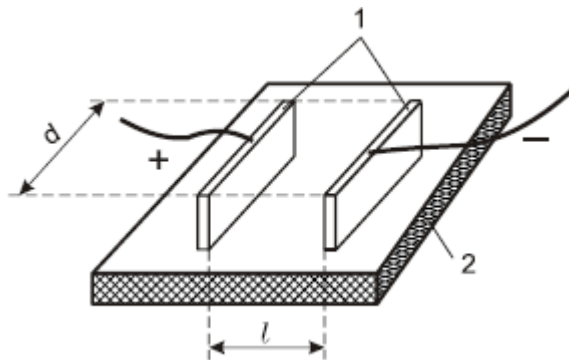


Схема визначення питомого поверхневого опору  $\rho_s$  твердого діелектрика:

1 - електроди, 2 - діелектрик

Повна провідність діелектрика, відповідна опору ізоляції  $R_{из}$ , складається з об'ємної і поверхневої провідності.

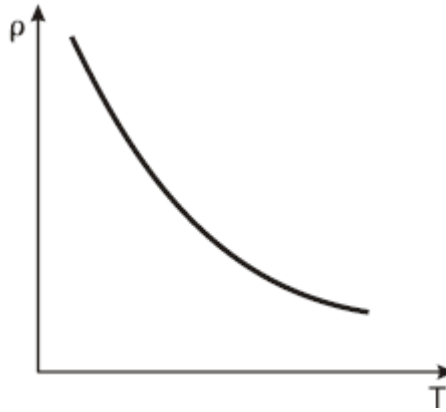
Твір опору ізоляції діелектрика конденсатора на його ємність називається постійної часу конденсатора

$$\tau_o = R_{из} \cdot C = 0,884 \cdot 10^{-11} \cdot \rho \cdot \epsilon.$$

Електропровідність діелектриків залежить від концентрації вільних носіїв заряду, температури і вологості середовища.

Домішки є додатковими джерелами іонів і збільшують електропровідність.

З підвищенням температури зростають рухливість і їх кількість, тому електропровідність діелектриків зростає, а опір падає (рис).



Температурна залежність питомого опору діелектриків

Збільшення вологості середовища практично не впливає на провідність неполярних діелектриків, так як вони не змочуються водою. Полярні діелектрики змочуються водою, а вода є джерелом іонів. Крім того, при наявності вологи може відбуватися часткова дисоціація молекул діелектрика і домішок, що призводить до зростання електропровідності.

### 3. Діелектричні втрати.

Діелектричні втрати - це потужність електричного струму, що розсіюється в діелектрику в вигляді тепла. Чисельно діелектричні втрати характеризуються тангенсом кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg}\delta$ , де  $\delta$  - кут, що доповнює до  $90^\circ$  кут зсуву фаз  $\varphi$  між векторами струму і напруги в колі з ємністю ( $\delta = 90^\circ - \varphi$ ).

При додатку змінної напруги до конденсатору з ідеальним діелектриком кут зсуву фаз між струмом і напругою  $\varphi = 90^\circ$  (рис. а),  $\delta = 0$ , теплових втрат немає.

Для розрахунку втрат потужності в реальному діелектрику при викликанні змінної напруги використовують еквівалентну схему, замінивши конденсатор з реальним діелектриком на ідеальний конденсатор з паралельно (або послідовно) включеним активним опором (рис. б). Втрати потужності  $P_a$  (Вт) викликає активна складова струму

$$P_a = U \cdot I_a.$$

враховуючи, що  $I_a = I_c \cdot \operatorname{tg}\delta$ , а  $I_c = U \cdot \omega \cdot C$ , отримуємо

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta,$$

де  $U$  - напруга, В;  $\omega$  - кругова частота струму,  $\text{с}^{-1}$ .



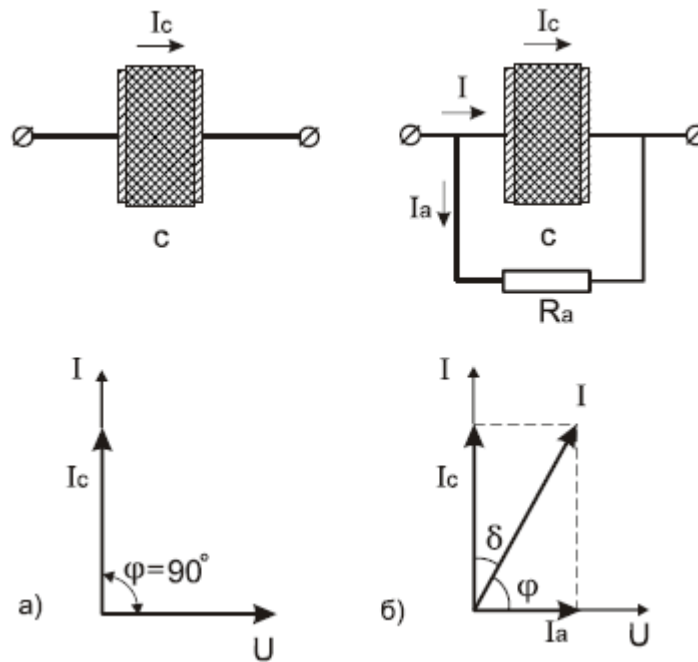


Схема визначення діелектричних втрат: а - конденсатор з ідеальним діелектриком ( $\operatorname{tg} \delta = 0$ ); б - паралельна еквівалентна електрична схема конденсатора з реальним діелектриком ( $\operatorname{tg} \delta > 0$ )

Види діелектричних втрат:

- втрати від наскрізної провідності (на електропровідність);
- релаксаційні;
- іонізаційні;
- резонансні.

#### 4. Пробій діелектриків.

Пробій - виникнення в діелектрику каналу високої провідності. При пробіі твердий діелектрик втрачає свої електроізоляційні властивості. Здатність діелектрика протистояти пробію оцінюється електричною міцністю.

Електрична міцність  $E_{пр}$ , МВ / м - мінімальна напруженість однорідного електричного поля, при якій відбувається пробій діелектрика:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h},$$

де  $U_{пр}$  - пробивна напруга, В;  $h$  - відстань між електродами або товщина діелектрика, м.

Види пробію діелектриків:

- електричний пробій обумовлений явищами ударної іонізації і фотоіонізації (рис.). Він характерний для газів, але може відбуватися і в неполярних рідких і твердих діелектриках. Пробивна напруженість при електричному пробіі залежить від щільності діелектрика і ступеня однорідності електричного поля. В однорідному полі пробій газу настає при більш високому значенні  $E_{пр}$ , ніж в неоднорідному полі;

- тепловий пробій обумовлений надмірним виділенням тепла через великі діелектричних втрат. При цьому в діелектрику відбуваються незворотні процеси термічного руйнування матеріалу (обвуглювання, розтріскування, оплавлення і т.д.), внаслідок чого зростає струм наскрізної провідності. Для теплового пробою характерна сильна залежність  $E_{пр}$  від температури, частоти струму, розмірів деталі і умов її охолодження;

- електрохімічний пробій обумовлений розвитком в діелектрику хімічних процесів, що ведуть до утворення рухливих іонів. Ця форма пробою характерна для рідких діелектриків, що містять невеликі кількості домішок електроліту. У твердих діелектриках електрохімічний пробій може бути при наявності поверхневих забруднень, адсорбованної вологи.

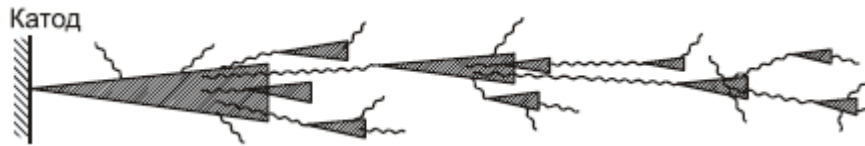


Схема електричного пробою газів

Підвищення температури і вологості середовища, наявність домішок, неоднорідність структури знижують електричну міцність діелектриків.