

Функціональні матеріали для високоенергетичної електроніки

Лекція 7

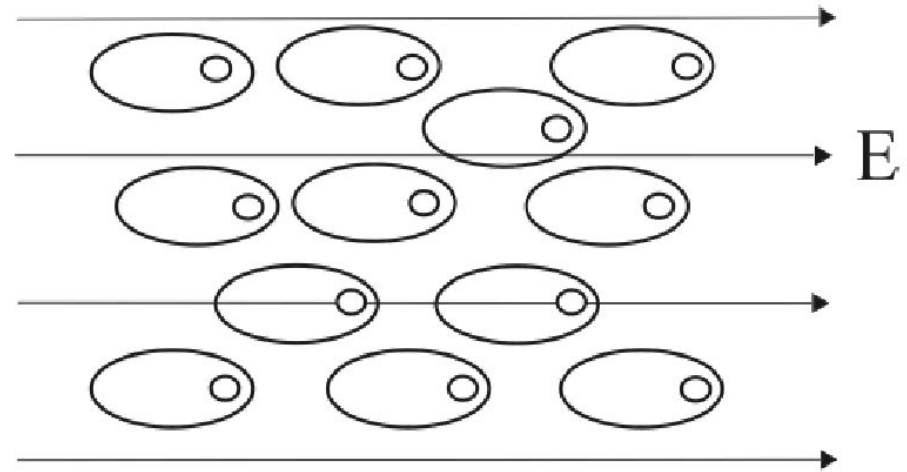
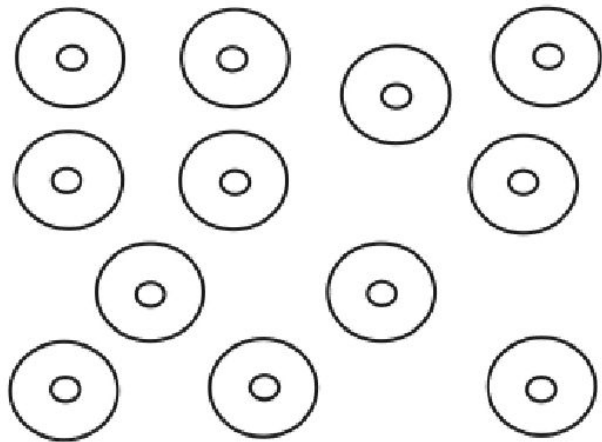
- **Діелектричні матеріали. Поляризація діелектриків. Класифікація діелектриків за механізмами поляризації. Поляризаційні струми і електропровідність діелектриків. Пробій діелектриків**
- До діелектриків відносять матеріали, в яких в нормальному стані присутня незначна кількість вільних носіїв заряду, що обумовлює їхні високі ізоляційні властивості. Для діелектриків характерна наявність дуже широкої забороненої зони на енергетичній діаграмі, тому переважаючим механізмом провідності в них є іонна провідність. Внаслідок дуже низької концентрації вільних носіїв заряду головним процесом, що відбувається в діелектрику під дією електричного поля є не електропровідність, а поляризація.
- **1 Поляризація діелектриків**
- Поляризацією називають стан діелектрика, що характеризується наявністю електричного моменту будь-якого елемента його об'єму.
- Досвід показує, що незаряджений спочатку діелектрик в електричному полі здобуває полярність: на стороні діелектрика, у яку входять силові лінії електричного поля, виникають негативні заряди, а на протилежній - позитивні. Поляризаційні заряди - зв'язані, виникають при зсуві центрів позитивних і негативних зарядів у межах однієї молекули або комірки кристалічної решітки діелектрика, а індукційні заряди (електрони) вільні і здатні переміщатися по провіднику.
- Розрізняють поляризацію, що виникає під дією зовнішнього електричного поля, і спонтанну, що існує при відсутності поля. У деяких випадках поляризація діелектриків з'являється під дією механічних напруг.
- Здатність різних матеріалів поляризуватися в електричному полі характеризується **відносною діелектричною проникністю $\epsilon = C_d/C_0$** , де C_d - ємність конденсатора з даним діелектриком, Φ (фарад); C_0 - ємність того ж конденсатора у вакуумі (тобто геометрична ємність між електродами), Φ .

- Абсолютна діелектрична проникність ϵ_a , значення якої залежить від вибору системи одиниць, пов'язана з відносною діелектричною проникністю ϵ : $\epsilon_a = \epsilon_0 \cdot \epsilon$, де $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м електрична постійна.
- Кількісною характеристикою поляризації служить **поляризованість** діелектрика \mathbf{P} - векторна фізична величина, що дорівнює відношенню електричного моменту $d\mathbf{P}$ елемента діелектрика до об'єму d цього елемента і виражається в Кл/м²: $\mathbf{P} = d\mathbf{P}/d$.
- Поляризованість однорідного плоского діелектрика в рівномірному електричному полі дорівнює поверхневій густині зв'язаних зарядів. Для більшості діелектриків у слабких електричних полях поляризованість пропорційна напруженості поля:

1

$$\bar{P} = \epsilon_0(\epsilon - 1) \bar{E} = \epsilon_0 \cdot \chi \cdot \bar{E},$$

- де $\square \mathbf{E}$ - вектор напруженості електричного поля, В/м; χ - діелектрична сприйнятливість.
- В ізотропних діелектриках напрямки векторів $\square \mathbf{P}$ і $\square \mathbf{E}$ збігаються. Для анізотропних середовищ (кристали, текстури) діелектрична сприйнятливість є тензорною характеристикою, тому напрямки $\square \mathbf{P}$ і $\square \mathbf{E}$ в загальному випадку виявляються різними. У сильних електричних полях порушується лінійна залежність між поляризованістю й напруженістю поля (нелінійні ефекти).
- Значення ємності конденсатора з діелектриком і накопичений у ньому електричний заряд обумовлені декількома механізмами поляризації, які різні в різних діелектриків і можуть мати місце одночасно в одному матеріалі.
- **Електронна поляризація** являє собою пружний зсув і деформацію електронних оболонок атомів і іонів під дією електричного поля (рис. 1).



а - за відсутності зовнішнього електричного поля; б - при впливі поля
 Рисунок 1- Спрощена схема моделей атомів водню

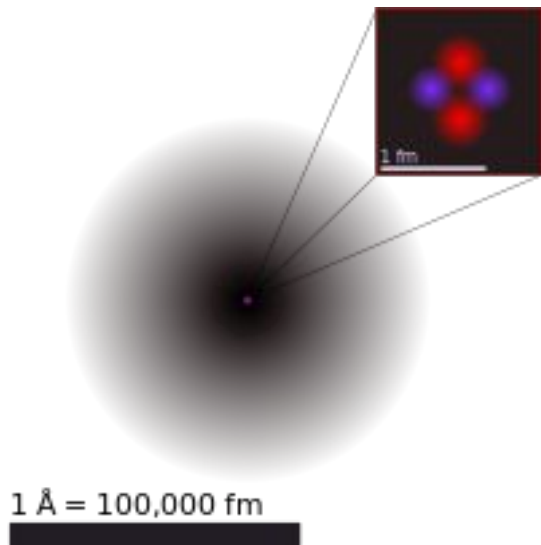
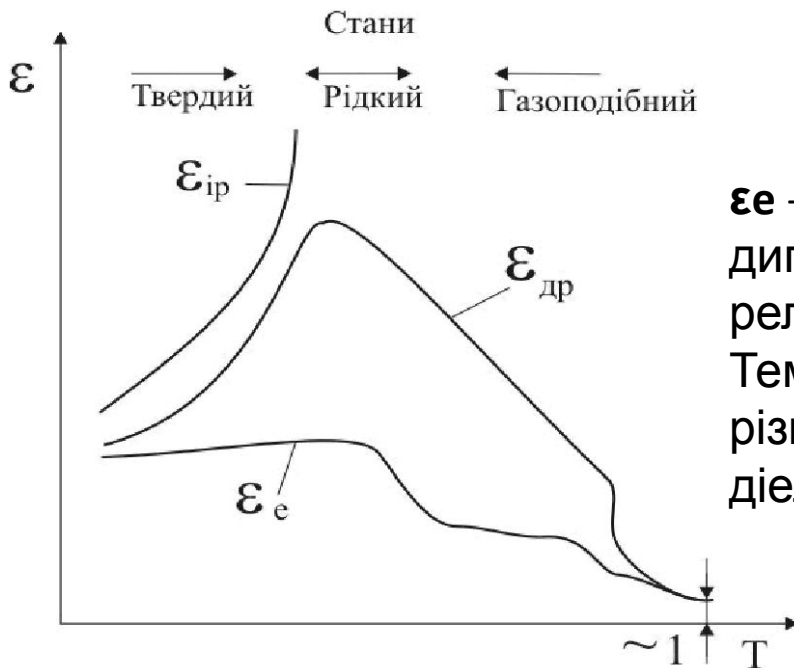


Рисунок 2. The current theoretical model of the atom involves a dense nucleus surrounded by a probabilistic "cloud" of electrons

- Час встановлення електронної поляризації мізерно малий (близько 10-15 с). Тому електронну поляризацію умовно називають миттєвою. Вона проявляється при всіх частотах, аж до $10^{14} \dots 10^{16}$ Гц.
- Електронна поляризація спостерігається у всіх видів діелектриків і не пов'язана із втратами енергії аж до резонансних частот. Значення діелектричної проникності речовини із чисто електронною поляризацією мала і чисельно дорівнює квадрату показника заломлення світла.
- Діелектрична проникність ϵ зменшується з підвищенням температури у зв'язку з тепловим розширенням діелектрика й зменшенням числа частинок в одиниці об'єму (рис. 3).



ϵ_e - електронна поляризація; $\epsilon_{др}$ - дипольно-релаксаційна; ϵ_{ip} - іонно-релаксаційна

Рисунок 3 - Температурні залежності проникності при різних механізмах поляризації діелектричної

- Зміна ϵ при зміні температури характеризується температурним коефіцієнтом діелектричної проникності, що виражають у К-1:

$$\alpha_{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT}.$$

- Іонна поляризація** характерна для твердих тіл з іонною будовою й обумовлена зсувом пружно зв'язаних іонів на відстані, менші за період кристалічної решітки.
- На рис. 4 на моделі кристалічної решітки кам'яної солі показаний зсув іонів натрію з вузлів решітки в напрямку електричного поля й іонів хлору - проти напрямку поля.

будова діелектрика

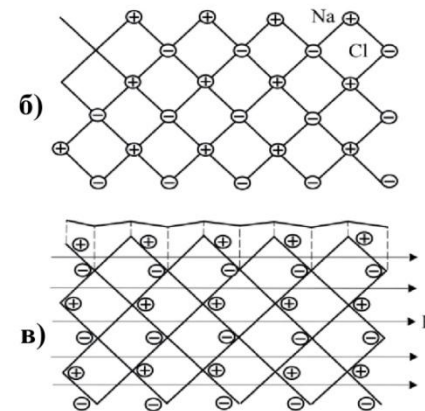
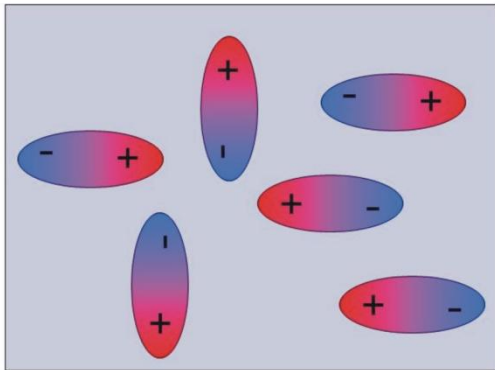


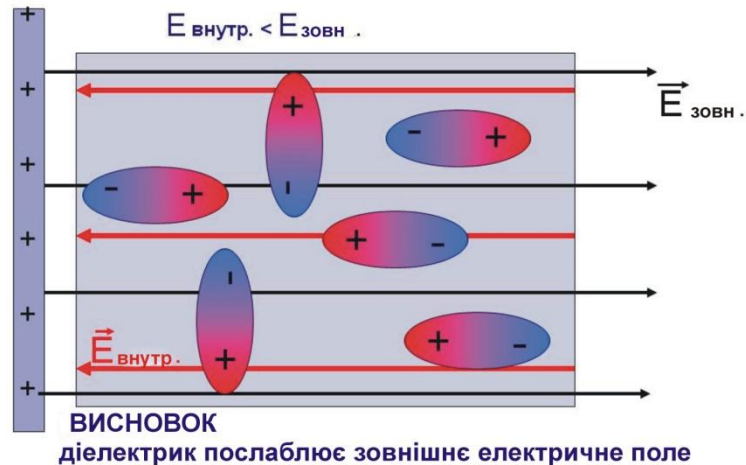
Рисунок 4 - будова діелектрика(а) та ідеалізована схема розташування іонів кам'яної солі: б - в вузлах решітки за відсутності електричного поля; в - зміщені з вузлів на невеликі відстані при впливі поля

- З підвищенням температури відстані між іонами внаслідок теплового розширення матеріалу збільшуються, що супроводжується ослабленням сил пружного зв'язку між іонами й зростанням поляризованості діелектрика. Час встановлення іонної поляризації $\sim 10^{-13}$ с, тобто це - миттєва поляризація.
- **Дипольно-релаксаційна поляризація** відрізняється від електронної й іонної тим, що дипольні молекули, що перебувають у хаотичному тепловому русі, частково орієнтуються під дією поля (рис. 5), що і є причиною поляризації.

будова полярного діелектрика



діелектрик в електричному полі



а - за відсутності зовнішнього електричного поля; б - при впливі поля Рисунок 5 - Схема розташування дипольних молекул

- Зі збільшенням температури міжмолекулярні сили послабляються, що повинно підсилювати дипольно-релаксаційну поляризацію. Однак у той же час зростає енергія теплового руху молекул, що зменшує вплив поля. Тому температурна зміна діелектричної проникності при дипольно-релаксаційній поляризації характеризується наявністю максимуму (дивись рис.3).
- Поворот диполів у напрямку поля в середовищі вимагає подолання деякого опору, тому дипольно-релаксаційна поляризація пов'язана із втратами енергії й нагріванням діелектрика. Опір поворотам молекул може бути настільки великим, що при швидкозмінних полях диполі не встигають орієнтуватися в напрямку поля, і дипольно-релаксаційна поляризація зменшується зі збільшенням частоти прикладеної напруги.
- Після зняття електричного поля орієнтація частинок поступово слабшає. Залежність дипольної складової поляризованості діелектрика від часу:

$$P_{dp}(t) = P_{dp}(0) \exp(-t/\tau_0), \quad 2$$

- де t - час, що пройшов після зняття поля, с; τ_0 – постійна часу (час релаксації), с.
- Таким чином, час релаксації - це проміжок часу, протягом якого впорядкованість орієнтованих полем диполів після зняття поля зменшується внаслідок наявності теплового руху в 2,7 рази від первісного значення, тобто система з нерівноважного стану наближається до рівноважного. Час релаксації сильно залежить від температури. Чим вище температура, тим менше сили молекулярного опору повороту диполів і тим менше час релаксації.

- Дипольно-релаксаційна поляризація властива полярним рідинам; цей вид поляризації може спостерігатися також і у твердих полярних органічних речовинах. Але в цьому випадку поляризація звичайно обумовлена вже поворотом не самої молекули, а наявних у неї полярних радикалів стосовно молекули.
- **Іонно-релаксаційна поляризація** спостерігається в іонних діелектриках з нещільним упакуванням іонів, наприклад у неорганічних стеклах і в деяких кристалічних речовинах. При цьому слабо зв'язані іони речовини під впливом зовнішнього електричного поля серед хаотичних теплових перекидань одержують надлишкові перекидання в напрямку поля й зміщуються на відстані, що перевищують постійну решітки. Після зняття електричного поля іони поступово повертаються до центрів рівноваги. Цей механізм можна віднести до релаксаційної поляризації, при якій має місце незворотне розсіювання енергії. Температурна залежність ϵ'' показана на рис. 3.
- **Електронно-релаксаційна поляризація** виникає за рахунок збуджених тепловою енергією надлишкових електронів або дірок і аналогічна за механізмом іонно-релаксаційній.
- **Резонансна поляризація** спостерігається в діелектриках при світлових частотах електричного поля. Вона обумовлена власними коливаннями електронів або іонів і залежить від фізико-хімічних особливостей речовини. При резонансі сильно збільшується поглинання електромагнітної енергії.

- **Міграційна поляризація** є додатковим механізмом поляризації, що проявляється у твердих тілах неоднорідної структури при макроскопічних неоднорідностях і наявності домішок. При внесенні неоднорідних матеріалів в електричне поле вільні електрони й іони провідних і напівпровідних включень переміщуються в межах кожного включення, яке стає подібним величезній поляризованій молекулі. У граничних шарах багат шарових матеріалів і в приелектродних шарах може відбуватися нагромадження зарядів повільно рухаючихся іонів, що створює ефект міграційної поляризації.
- **Спонтанна поляризація** існує тільки у групи твердих діелектриків, що називаються сегнетоелектриками [1].

[1] Сегнетоелектрика - явище виникнення спонтанної поляризації в кристалі в певному інтервалі температур, навіть у відсутності зовнішнього електричного поля, яка може бути переорієнтована при прикладенні цього поля. Кристали, яким притаманне явище сегнетоелектрики, називаються сегнетоелектриками. Сегнетоелектрики відрізняються від піроелектриків тим, що при певній температурі (так званої діелектричної точці Кюрі) їх кристалічна модифікація змінюється і спонтанна поляризація зникає. Кристалічна модифікація, в якій спостерігається спонтанна поляризація, називається полярною фазою, а в якій не спостерігається - неполярною фазою. Явище сегнетоелектрики аналогічно явищу ферромагнетизму і в англійській літературі носить назву ферроелектрики (англ. Ferroelectricity). Для феноменологічного опису фазових переходів в сегнетоелектриках використовується теорія Ландау

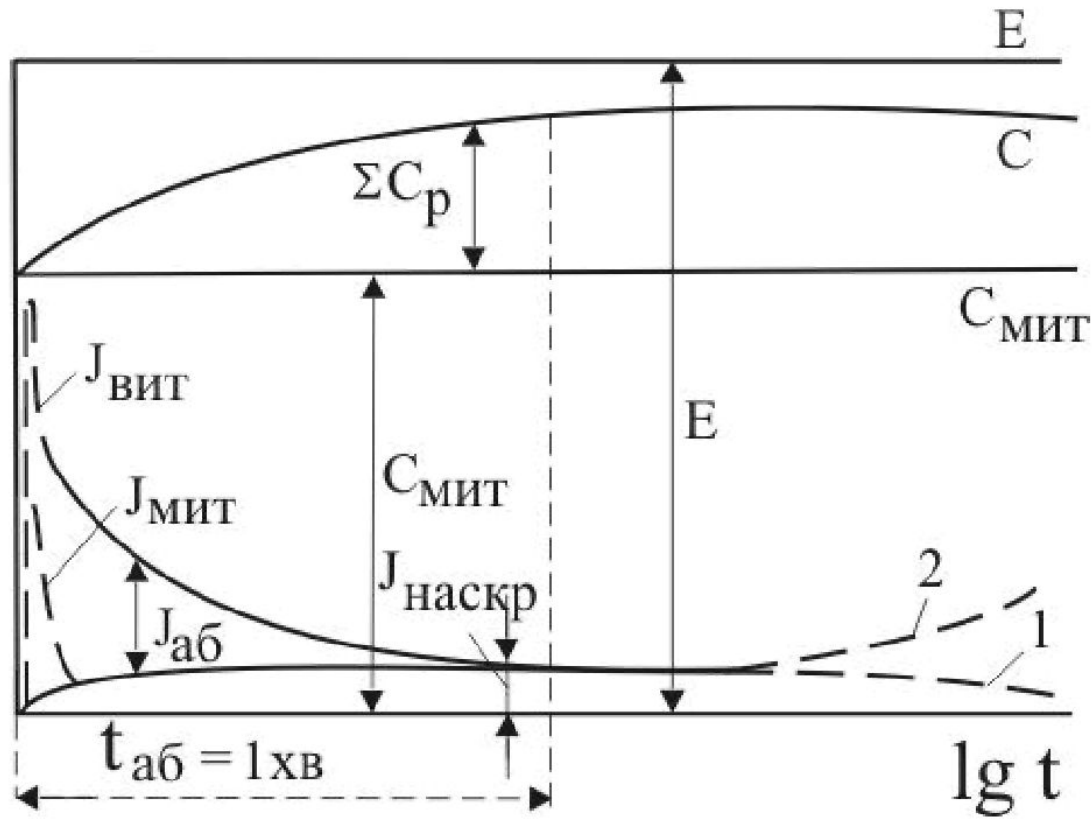
- **1.1. Класифікація діелектриків за механізмами поляризації**
- Залежно від виду залежності значення відносної діелектричної проникності матеріалу від напруженості електричного поля всі діелектрики підрозділяють на **лінійні** і **нелінійні**. **Нелінійними є сегнетоелектрики.**

- **Ємність конденсатора з лінійним діелектриком не змінюється при прикладенні різниці потенціалів.** При нелінійному діелектрику вона стає керованою електричним полем. Тому нелінійні діелектрики називають **активними** (керованими) діелектриками.
- Лінійні діелектрики можна підрозділити на кілька груп, поклавши в основу класифікації механізми поляризації.
- **Неполярними діелектриками** є гази, рідини й тверді речовини в кристалічному й аморфному станах, які мають переважно електронну поляризацію. Такими є водень, бензол, парафін, сірка, поліетилен і ін. Саме вони мають найменше значення діелектричної проникності.
- **Полярні (дипольні) діелектрики** - це органічні рідкі, напіврідкі й тверді речовини, що мають одночасно дипольно-релаксаційну й електронну поляризації. Такими є нітробензол, кремнійорганічні сполуки, феноло-формальдегідні смоли, епоксидні компаунди, капрон і ін. Діелектрична проникність полярних органічних діелектриків, що мають у твердому стані дипольно-релаксаційну поляризацію, залежить від температури й частоти прикладеної напруги.
- **Іонними діелектриками** є тверді неорганічні сполуки з іонною, електронною, іонно- і електронно-релаксаційними поляризаціями, наприклад, кристалічні речовини з іонною решіткою, наприклад, кварц, слюда, корунд (Al_2O_3), рутил (TiO_2), а також неорганічне скло, кераміки.
- Діелектрична проникність різних неорганічних стекол, що наближаються за будовою до аморфних діелектриків, лежить у порівняно вузьких межах - приблизно від 4 до 20.

- **2 Поляризаційні струми і електропровідність діелектриків**
- Поляризаційні процеси зсуву будь-яких зарядів у речовині, протікаючи в часі до моменту встановлення й одержання рівноважного стану, обумовлюють появу поляризаційних струмів або струмів зсуву в діелектриках. Струми зсуву пружно зв'язаних зарядів при електронній і іонній поляризаціях настільки короткочасні, що їх звичайно не вдається зафіксувати приладом.
- Струми зсуву при різних видах уповільненої поляризації, спостережувані в багатьох технічних діелектриках, називають абсорбційними струмами **Јаб**.
- При постійній напрузі абсорбційні струми, змінюючи свій напрямок, проходять тільки в періоди вмикання й вимикання напруги. При змінній напрузі вони існують протягом усього часу знаходження матеріалу в електричному полі. Наявність у технічних діелектриках невеликого числа вільних зарядів, а також інжекція їх з електродів призводять до виникнення невеликих струмів наскрізної електропровідності (або наскрізних струмів) **Јск**.
- Таким чином, повна густина струму в діелектрику, називаного струмом витоку **Јвиг**, являє собою **суму густини струмів** абсорбційного й наскрізного:

$$J_{\text{виг}} = J_{\text{аб}} + J_{\text{ск}}$$

- Густина струму зсуву визначається миттєвими (електронним, іонним) і вповільненими зсувами зарядів. Густина струму і ємність конденсатора з діелектриком, що характеризується наявністю миттєвих і вповільнених (релаксаційних) механізмів поляризації залежність від часу (рис. 6). Видно, що після завершення процесів поляризації через діелектрик проходить тільки наскрізний струм.



ΣC_p - ємність, обумовлена релаксаційними механізмами поляризації; $C_{\text{мит}}$ - ємність від миттєвих механізмів поляризації

Рисунок 6 - Залежності ємності C й густини J струму від часу t в конденсаторі з діелектриком, що має декілька різних механізмів поляризації й наскрізну електропровідність (електричне поле прикладається миттєво й надалі із часом не змінюється)

- У більшості випадків електропровідність діелектриків іонна, рідше - електронна. Опір діелектрика, покладеного між двома електродами, при постійній напрузі, тобто опір ізоляції $R_{із}$, можна обчислити за формулою

$$R_{із} = U / (I_{\text{вит}} - \Sigma I_{\text{пол}}),$$

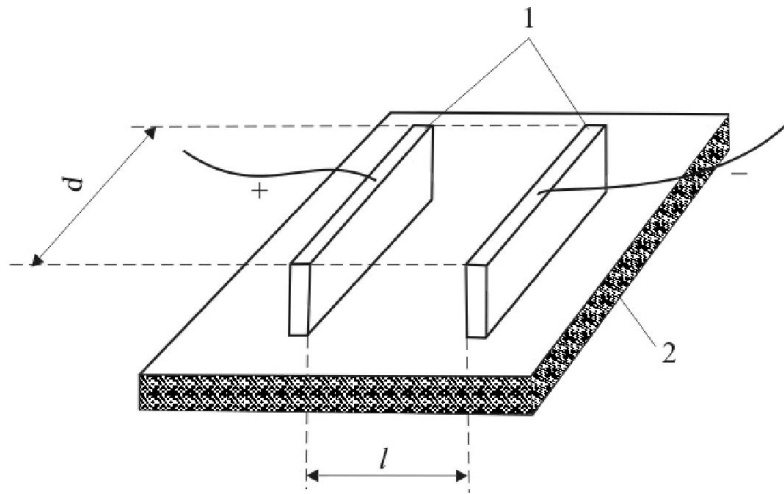
- де U - прикладена напруга, В; $I_{\text{вит}}$ - струм витоку, що спостерігається, А; $I_{\text{пол}} = I_{\text{аб}}$ - сума струмів, викликаних уповільненими механізмами поляризації, А.
- У твердих ізоляційних матеріалів розрізняють об'ємну й поверхневу електропровідності. Питомий об'ємний опір ρ чисельно дорівнює опору куба з ребром в 1 м, уявно виділеного з досліджуваного матеріалу, якщо струм проходить через дві протилежні грані цього куба; ρ виражають в Ом-см: 1 Ом-см = 100 Ом-м. Для плоского зразка матеріалу при однорідному полі питомий об'ємний опір

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

- де R - об'ємний опір, Ом; S - площа електрода, м²; h - товщина зразка, м.
- Питомий поверхневий опір ρ_s чисельно дорівнює опору квадрата (будь-яких розмірів), уявно виділеного на поверхні матеріалу, якщо струм проходить через дві протилежні сторони цього квадрата (ρ_s виражають в Ом-см):

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

- де R_s - поверхневий опір, Ом, зразка матеріалу між паралельно поставленими електродами шириною d , м, віддаленими один від одного на відстані l , м; (рис. 7).



1 - електроди, 2 - зразок з електроізоляційного матеріалу

Рисунок 7 - Схема виміру ρ_s

- За питомим об'ємним опором можна визначити питому об'ємну провідність, а питому поверхневу провідність –

$$\gamma_s = 1/(\rho_s).$$

- Повна провідність твердого діелектрика, що відповідає його опору R_{i3} складається з об'ємної й поверхневої провідностей. Постійна часу конденсатора τ_0 з ємністю C

$$\tau_0 = R_{i3} \cdot C.$$

- Електропровідність діелектриків залежить від їхнього агрегатного стану, а також від вологості й температури навколишнього середовища.
- При тривалій роботі під напругою наскрізний струм через тверді або рідкі діелектрики із часом може зменшуватися або збільшуватися. Зменшення наскрізного струму згодом свідчить про те, що електропровідність матеріалу була обумовлена іонами сторонніх домішок і зменшувалася за рахунок електричного очищення зразка (див. рис. 5, криву 1). Збільшення струму згодом (рис. 5, крива 2) свідчить про участь у ньому зарядів, які є структурними елементами самого матеріалу.
- Незворотний процес нейтралізації іонів, що протікає в діелектрику, називають старінням під напругою; він здатний поступово привести до руйнування - пробою діелектрика.
- **Електропровідність газів.** Гази при невеликих значеннях напруженості електричного поля мають дуже малу провідність. Струм у газах може виникнути тільки при іонізації нейтральних молекул газу, що виникає або під дією зовнішніх факторів, або внаслідок зіткнень іонізованих частинок самого газу, прискорених електричним полем, з молекулами газу (ударна іонізація).
- Зовнішніми факторами, що викликають іонізацію газу, є рентгенівські, ультрафіолетові й космічні промені, радіоактивне випромінювання, а також термічний вплив (сильне нагрівання газу).
- Одночасно із процесом іонізації, при якому відбувається утворення позитивних і негативних іонів або електронів, частина позитивних іонів, з'єднуючись із негативними частинками, утворюють нейтральні молекули. Цей процес називають **рекомбінацією**. Наявність рекомбінації перешкоджає безмежному зростанню кількості іонів у газі й обумовлює встановлення певної концентрації іонів через короткий час після початку дії зовнішнього іонізатора.

- **Електропровідність рідких діелектриків.** У неполярних рідинах електропровідність визначається наявністю дисоційованих домішок, у тому числі води. У полярних рідинах електропровідність залежить не тільки від домішок; іноді вона викликається дисоціацією молекул самої рідини. Струм у рідині може бути обумовлений як пересуванням іонів, так і переміщенням відносно великих заряджених колоїдних частинок.
- Полярні рідини в порівнянні з неполярними завжди мають підвищену питому провідність. Сильнополярні рідини відрізняються настільки високою питомою провідністю, що розглядаються вже не як рідкі діелектрики, а як провідники з іонною електропровідністю.
- Зі збільшенням температури в результаті зменшення в'язкості рідини зростає рухливість іонів і може збільшуватися ступінь теплової дисоціації. Ці фактори впливають на збільшення питомої провідності

$$\gamma = A \exp(\alpha / T),$$

- де A , Cm/m і α , K - постійні, що характеризують матеріал.
- **Електропровідність твердих діелектриків** обумовлена як пересуванням іонів самого діелектрика, так і іонів випадкових домішок, або наявністю вільних електронів. Іонна електропровідність (на відміну від електронної) супроводжується переносом речовини на електроди.
- У твердих діелектриках з іонною будовою електропровідність обумовлена головним чином переміщенням іонів. При низьких температурах пересуваються слабо закріплені іони, зокрема іони домішок, а при високих - власні іони, що покидають вузли решітки під впливом теплових флуктуацій.
- У діелектриках з атомною або молекулярною решіткою електропровідність залежить від наявності домішок.

- **Питома провідність** (Смм-1) (*сименсах на метр*) при температурі Т:

$$\gamma = q N_T \mu_T$$

- де **q** — заряд носія; Кл; **N_T** - число носіїв в одиниці об'єму (концентрація), м³ ; **μ_T** – рухливість, м²/(Вс).
- При відносно невисоких напруженностях електричного поля концентрація носіїв заряду й рухливість **μ** не залежать від **E**, тобто швидкість дрейфу **V** пропорційна напруженості поля

- і виконується закон Ома.
$$\bar{V} = \bar{E} \mu$$

- При іонній електропровідності
$$\gamma = A \exp (- b/T),$$

- К; де **b=(E_д+E_{пер})/k**, К ; **E_д** - енергія дисоціації, Дж; **E_{пер}** - енергія переміщення іону, Дж.
- Звичайно **E_д >> E_{пер}**, тому температурна залежність провідності визначається головним чином зміною концентрації носіїв. Величина **b** для твердих речовин лежить у межах 10000...22000 К.

- **Поверхнева електропровідність твердих діелектриків** обумовлена наявністю вологи, забрудненнями й різними дефектами поверхні діелектрика.
- Питома поверхнева провідність тим нижче, чим менше полярність речовини й чим чистіше поверхня діелектрика. Високу поверхневу провідність мають об'ємнопористі матеріали, тому що процес поглинання вологи вглиб матеріалу стимулює також і утворення її плівки на поверхні діелектрика.
- **3 Втрати в діелектриках**
- **Діелектричними втратами** називають електричну потужність, яка витрачається на нагрівання діелектрика, що перебуває в електричному полі.
- Втрати енергії в діелектриках спостерігаються як при змінній, так і при постійній напрузі. При постійній напрузі, коли немає періодичної поляризації, якість матеріалу характеризується значеннями питомих об'ємного й поверхневого опорів, які визначають величину R_{i3} . При змінній напрузі у діелектрику крім наскрізної електропровідності можуть проявлятися інші механізми перетворення електричної енергії в теплову. Тому якість матеріалу недостатньо характеризувати тільки опором ізоляції. В інженерній практиці найчастіше для характеристики здатності діелектрика розсіювати енергію в електричному полі використовують кут діелектричних втрат, а також тангенс цього кута.
- **Кутом діелектричних втрат δ** називають кут, що доповнює до 90° кут зсуву фаз ϕ між струмом і напругою в ємнісному ланцюзі. У випадку ідеального діелектрика вектор струму в такому ланцюзі випереджає вектор напруги на кут 90° ; при цьому кут δ дорівнює нулю. Чим більша розсіювана в діелектрику потужність, тим менше кут зсуву фаз ϕ і тим більше кут діелектричних втрат δ і його функція $\text{tg}\delta$. **Тангенс кута діелектричних втрат** безпосередньо входить у формулу для потужності, що розсіюється в діелектрику, тому практично найчастіше користуються цією характеристикою. Вираз для потужності, що розсіюється в діелектрику:

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

де P_a - активна потужність, Вт; U - напруга, В; ω - кругова частота, с⁻¹; C - ємність, Ф.

Діелектричні втрати, віднесені до одиниці об'єму діелектрика, називають питомими втратами. Їх можна розрахувати за формулою

$$P = P / V = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta / V = \omega \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta E^2,$$

де V - об'єм діелектрика між плоскими електродами, м³; E - напруженість електричного поля, В/м.

Великі діелектричні втрати в електроізоляційному матеріалі викликають сильне нагрівання виготовленого з нього виробу й можуть призвести до його теплового руйнування. Якщо ж діелектрик використовується в коливальному контурі, то діелектричні втрати перешкоджають досягненню високої добротності (гострого настроювання на резонанс), тому що зі збільшенням еквівалентного опору втрат підсилюється загасання коливань у контурі. Діелектричні втрати за їхньою фізичною природою й особливостями підрозділяють на чотири основних види: 1) втрати на електропровідність; 2) релаксаційні втрати; 3) іонізаційні втрати; 4) резонансні втрати.

- **Втрати на електропровідність** виявляються в діелектриках, що мають помітну електропровідність, об'ємну або поверхневу. Діелектричні втрати цього виду не залежать від частоти прикладеної напруги; $\text{tg}\delta$ зменшується із частотою за гіперболічним законом (рис. 8). Значення тангенса кута діелектричних втрат при даній частоті може бути обчислене за формулою

$$\text{tg}\delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\epsilon f \rho}.$$

- Втрати наскрізної електропровідності зехостають із ростом температури за експонентним законом

$$P_{aT} = A \exp(-b/T),$$

- де **A** (Вт) і **b** (К) - постійні матеріалу.

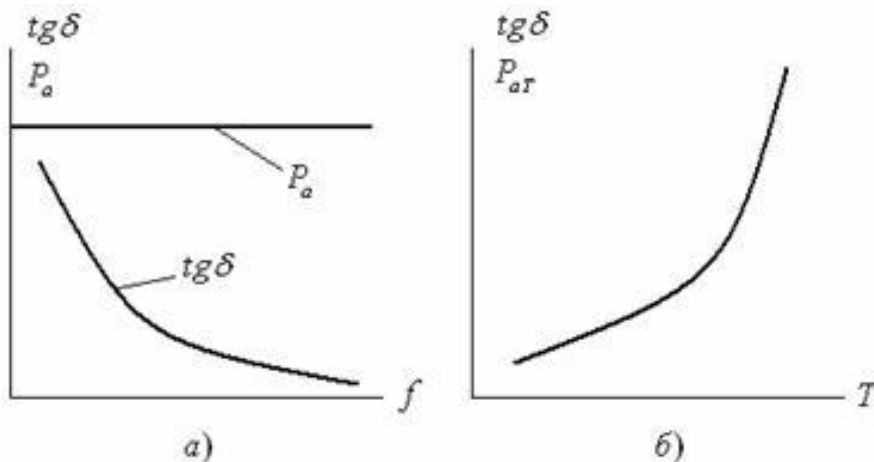


Рис. 8. Частотні (а) і температурні (б) залежності втрат на електропровідність

- Релаксаційні втрати** обумовлені активними складовими поляризаційних струмів. Вони характерні для діелектриків, що мають уповільнені види поляризації, і проявляються в області досить високих частот, коли позначається відставання поляризації від зміни поля. Температурна й частотна залежності $\text{tg}\delta$ мають максимуми. При низькій температурі через велику в'язкість діелектрика час релаксації поляризації великий ($\tau_0 \gg 1/\omega$), можливості повороту диполів у в'язкому середовищі вкрай обмежені. Тому тангенс кута діелектричних втрат є малим. З підвищенням температури в'язкість зменшується, а час релаксації наближається до часу періоду зміни поля. Дипольно-релаксаційна поляризація (**$P_{др}$**) має більший розвиток, завдяки чому зростає $\text{tg}\delta$. При ще більш високих температурах час релаксації стає істотно меншим за час періоду зміни напруженості поля. Тому практично зникає запізнювання поляризації відносно поля і зменшуються релаксаційні втрати. Релаксаційні втрати спостерігаються й у лінійних діелектриків з іонно-релаксаційними і електронно-релаксаційними механізмами поляризації.
- При впливі на діелектрик синусоїдальної напруги високої частоти дипольні молекули не встигають орієнтуватися в в'язкому середовищі і слідувати за зміною поля. Відставання поляризації можна охарактеризувати залежностями, показаними на рис. 10а. Воно виражається в появі деякого кута фазового запізнювання Ψ між поляризацією діелектрика **$P_{др}$** і напруженістю поля **E** . За допомогою кривих рис. 10а легко довести, що залежність **$P_{др}(E)$** при наявності фазового зсуву між ними має форму еліпса (рис. 10б). Інтеграл по замкнутому контуру 0-б-г-е-0, т. е. площа петлі переполіаризації, характеризує енергію, яка витрачається електричним полем на поляризацію одиниці об'єму діелектрика за один період.

- При незмінній напруженості поля площа петлі залежить від амплітудного значення поляризованості $P_{др}$ і кута фазового зсуву Ψ , які в свою чергу визначаються співвідношенням часу релаксації τ_0 і періоду зміни поля. Якщо виконується умова $\tau_0 \ll 1/\omega$, то за час кожного напівперіоду поляризація отримує повний розвиток, її відставання від зміни поля практично відсутня. При цьому еліпс, що характеризує залежність, вироджується в пряму лінію (рис. 10в). Таким чином, якщо немає запізнювання поляризації по відношенню до поля, то немає і релаксаційних втрат.
- В протилежному випадку, коли $\tau_0 \gg 1/\omega$, релаксаційна поляризація виражена дуже слабо, тобто середній кут повороту диполів за короткий час напівперіоду виявляється вельми незначним. Тому втрати енергії за період будуть також малі (рис. 10г). Максимуму втрат відповідають такі умови, при яких період зміни поля порівняний з часом встановлення поляризації τ_0 (рис. 10б).

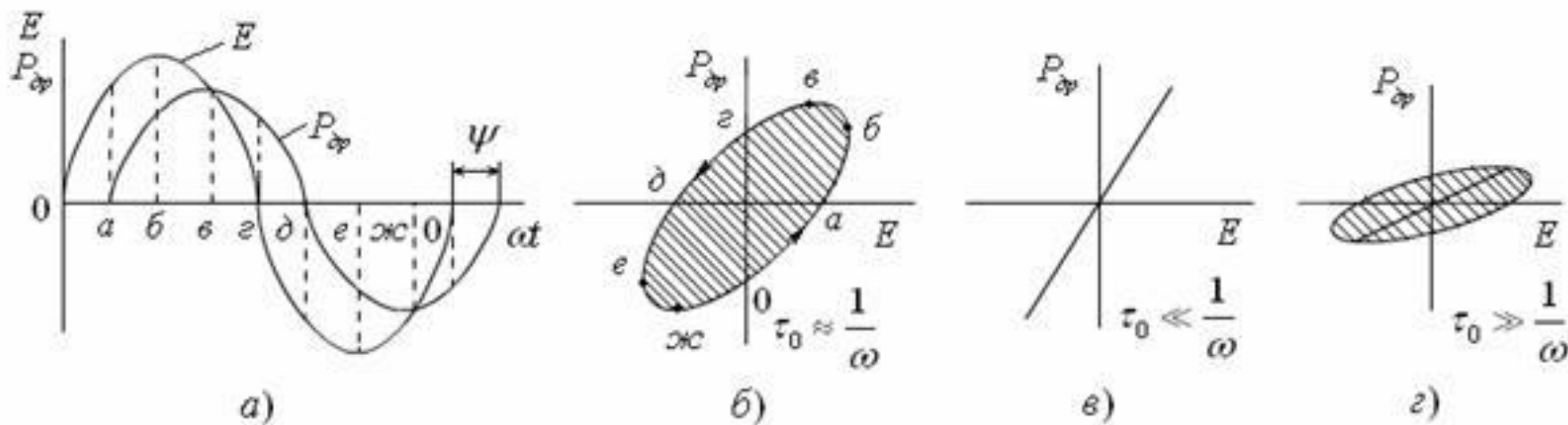


Рисунок 10. Пояснення механізму релаксаційних втрат в діелектриках

- Втрати, обумовлені міграційною поляризацією, є в матеріалах з випадковими домішками або окремими компонентами, навмисно введеними в діелектрик для необхідної зміни його властивостей.
- **Іонізаційні втрати** властиві діелектрикам у газоподібному стані.
- **Резонансні втрати** спостерігаються в деяких газах при певній частоті й виражаються в інтенсивному поглинанні енергії електромагнітного поля. Резонансні втрати можливі й у твердих тілах, якщо частота змушених коливань, викликана електричним полем, збігається із частотою власних коливань частинок твердої речовини.

• **4 Пробій діелектриків**

- Діелектрик, перебуваючи в електричному полі, може втратити властивості ізоляційного матеріалу, якщо напруженість поля перевищить деяке критичне значення. Явище утворення провідного каналу в діелектрику під дією електричного поля називають **пробоєм**.
- Мінімальну, прикладену до діелектрика напругу, що призводить до його пробою, називають **пробивною напругою $U_{пр}$** .
- Передпробійний стан діелектрика характеризується різким зростанням струму, відступом від закону Ома у бік збільшення провідності. Значення пробивної напруги залежить від товщини діелектрика h і форми електричного поля, яка обумовлена конфігурацією електродів і самого діелектрика. Тому для порівняння властивостей різних матеріалів більш зручною характеристикою є електрична міцність.
- Електричною міцністю називають мінімальну напруженість однорідного електричного поля, що призводить до пробою діелектрика: **$E_{пр} = U_{пр}/h$** .

- Якщо пробій відбувся в газоподібному діелектрику, то завдяки високій рухливості молекул пробита ділянка після зняття напруги відновлює свої електричні властивості. На противагу цьому, пробій твердих діелектриків закінчується руйнуванням ізоляції. Однак руйнування матеріалу можна попередити, обмеживши наростання струму при пробіі припустимою межею.
- Пробій діелектриків може виникати в результаті чисто електричних, теплових, а в деяких випадках і електрохімічних процесів, обумовлених дією електричного поля.
- **Пробій газів.** Повітря є ізоляційним середовищем для різних електронних приладів, для ліній електропередачі. У радіоелектроніці використовується повітря як при значному розрідженні, так і при підвищеному тиску.
- Пробивна напруженість повітря в нормальних умовах невелика в порівнянні з більшістю рідких і твердих діелектриків і становить ~ 4 МВ/м.
- Пробій повітря й інших газів є наслідком розвитку процесів ударної й фотоіонізації.
- Велику електричну міцність вакууму використовують у техніці при конструюванні високочастотних вакуумних конденсаторів, призначених для підвищених напруг.
- Знижену порівняно з повітрям електричну міцність мають інертні гази, використовувані для заповнення електровакуумних приладів і джерел світла. Підвищеною електричною міцністю характеризуються деякі важкі гази з високою молекулярною масою, зокрема, єлегаз (SF₆)^[1] Знижену порівняно з повітрям електричну міцність мають інертні гази, використовувані для заповнення електровакуумних приладів і джерел світла. Підвищеною електричною міцністю характеризуються деякі важкі гази з високою молекулярною масою, зокрема, єлегаз (SF₆)^[1] і фреон (CCl₂F₂)^[2] к у яких проивна напружність приблизно в 2,5 рази вище, ніж у

- **[1]** Гексафторид сірки (також елегаз або шестифториста сірка, SF6) — неорганічна речовина, при нормальних умовах — важкий газ, в 5 разів важчий за повітря. Назва «елегаз» шестифториста сірка отримала від скорочення «електричний газ». Електрична міцність при атмосферному тиску і зазорі 1 см становить $E = 89 \text{ кВ/см}$. Характерним є дуже великий коефіцієнт теплового розширення і висока густина. Це важливо для енергетичних установок, в яких проводиться охолодження будь-яких частин пристрою, так як при великому коефіцієнті теплового розширення легко утворюється конвективний потік, що відносить тепло.
- **[2]** Дифлуородихлорометан (дихлородифторометан, Фреон-12, R-12) — фреон CCl2F2, холодоагент.
- **Пробій рідких діелектриків** відбувається при більш високих значеннях електричної міцності, ніж газів в нормальних умовах завдяки меншій довжині вільного пробігу електронів.
- Наявність домішок значно збільшує явище пробою рідких діелектриків.
- Пробій рідини при радіочастотах обумовлений її розігрівом за рахунок діелектричних втрат, що може призводити до термічного руйнування рідини. Тому гранично припустимі робочі напруженості поля для рідких діелектриків на радіочастотах виявляються нижчими, ніж на промисловій частоті.
- В твердих діелектриках можуть спостерігатися три основні механізми пробою: 1) електричний; 2) тепловий; 3) електрохімічний.
- **Електричний пробій** твердих діелектриків протікає за час не більше за $10^{-7} \dots 10^{-8} \text{ с}$, він не обумовлений тепловою енергією і супроводжується у своїй початковій стадії руйнуванням діелектрика в дуже вузькому каналі. Це є чисто електронний процес, коли з деяких початкових електронів у твердому тілі створюється електронна лавина. Розвиток лавин супроводжується фотоіонізацією, що прискорює утворення провідного каналу.

- Прискорені полем електрони при зіткненнях передають свою енергію вузлам решітки й розігривають діелектрик аж до плавлення. У розрядному каналі створюється значний тиск, pojawiaються тріщини або ізолятор повністю руйнується.
- У випадку однорідного поля й повної однорідності структури в монокристалах багатьох окислів і деяких органічних полімерів E досягає більше як 1000 МВ/м. Електричний пробій спостерігається в більшості діелектриків при короткочасному (імпульсному) впливі напруги. Тонкі плівки можуть мати істотно більш високу електричну міцність, ніж масивні зразки.
- **Тепловий пробій** виникає в тому випадку, коли тепла енергія, що виділяється в діелектрику за рахунок діелектричних втрат, не встигає розсіюватися через його низьку теплопровідність; при цьому порушується тепла рівновага, а процес здобуває лавиноподібний характер. Матеріал розігривається в електричному полі до температур, що відповідають розплавлюванню, обвуглюванню та ін.
- Електрична міцність при тепловому пробіі є характеристикою не тільки матеріалу, але й виробу з нього, тоді як електрична міцність при електричному пробіі служить характеристикою самого матеріалу. Пробивна напруга, обумовлена нагріванням діелектрика,
- Прискорені полем електрони при зіткненнях передають свою енергію вузлам решітки й розігривають діелектрик аж до плавлення. У розрядному каналі створюється значний тиск, pojawiaються тріщини або ізолятор повністю руйнується.
- У випадку однорідного поля й повної однорідності структури в монокристалах багатьох окислів і деяких органічних полімерів E досягає більше як 1000 МВ/м. Електричний пробій спостерігається в більшості діелектриків при короткочасному (імпульсному) впливі напруги. Тонкі плівки можуть мати істотно більш високу електричну міцність, ніж масивні зразки.

- залежить від частоти, умов охолодження, температури навколишнього середовища та від нагрівостійкості матеріалу. Органічні діелектрики (наприклад, полістирол) за інших рівних умов мають більш низькі значення електротеплових пробивних напруг, ніж неорганічні (кварц, кераміка), внаслідок їх малої нагрівостійкості.
- **Іонізаційний пробій** є різновидом теплового пробою. Він характерний для твердих пористих діелектриків і обумовлений іонізацією газу в порах.
- **Електрохімічний пробій** електротехнічних матеріалів має істотне значення при підвищених температурах і високій вологості повітря. Цей вид пробою спостерігається при постійній і змінній напругах низької частоти, коли в матеріалі розвиваються процеси, що обумовлюють незворотне зменшення опору ізоляції (електрохімічне старіння). Крім того, електрохімічний пробій може мати місце при високих частотах, якщо в закритих порах матеріалу відбувається іонізація газу, найчастіше - у кераміці, що містить окисли металів змінної валентності (наприклад, TiO_2) та у багатьох органічних матеріалах.
- **Поверхневий пробій** - це пробій газу або рідини поблизу поверхні твердого діелектрика. При поверхневому пробої електрична міцність твердого діелектрика не порушується, однак утворення провідного каналу на поверхні істотно обмежує робочі напруги ізолятора.
- Ефективним заходом боротьби з поверхневим пробоєм є заміна повітря рідким діелектриком, наприклад, трансформаторним маслом, яке має більш високу електричну міцність і сприяє зниженню напруженості поля на поверхні твердого діелектрика. Тому зануренням ізолятора в рідкий діелектрик можна домогтися підвищення граничних робочих напруг.

