

**КРАСНОЛИМАНСЬКИЙ ЗАОЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**В.І. Потапенко, Т.Г. Шендрік**

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

*Конспект лекцій*

**Частина 1  
Діелектрики**

**Харків – 2009**

Потапенко В.І., Шендрік Т.Г. Електричні матеріали. Ч.1.  
Діелектрики: Конспект лекцій. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – 53 с.

Даний конспект лекцій складається з шести частин. Перша частина присвячена поляризації діелектриків, видам поляризації, діелектричній проникності діелектриків у різних агрегатних станах, а також електропровідності діелектриків.

Рекомендується для студентів спеціальностей 6.092201 „Електричні системи та комплекси транспортних засобів” та 6.092202 „Електричний транспорт” денної та заочної форм навчання Донецького інституту залізничного транспорту.

Іл. 22, табл. 1, бібліогр.: 6 назв.

Конспект лекцій розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри “Автоматика та комп’ютерні системи” 17 березня 2008 р., протокол № 7.

Рецензенти:

доц. М.І. Жемчугов (ДонІЗТ),  
ст. наук. співр. Л.В. Пашенко (ІнФОУ НАНУ)

В.І. Потапенко, Т.Г. Шендрік

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ  
КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ  
Частина 1. ДІЕЛЕКТРИКИ

Відповідальний за випуск Потапенко В.І.

Редактор Еткало О.О.

---

Підписано до друку 31.03.08 р.  
Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.  
Умовн.-друк.арк. 3,25. Обл.-вид.арк. 3,75.  
Замовлення № Тираж 30 Ціна

---

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК № 2874 від. 12.06.2007 р.  
Друкарня УкрДАЗТу,  
61050, Харків - 50, пл. Фейербаха, 7

**УКРАЇНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АКАДЕМІЇ ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ**

**Кафедра “Соціально-гуманітарних дисциплін”**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

**з дисципліни  
"ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ"**

**Частина 1. ДІЕЛЕКТРИКИ**  
для студентів спеціальностей  
6.092201 "Електричні системи та комплекси  
транспортних засобів"  
6.092202 "Електричний транспорт"

**Красний Ліман – 2007**

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри “Автоматики та комп’ютерних систем”  
“ 21 ” лютого 2008 р.      Протокол № 6

Укладачі:

Доцент

В.І. Потапенко (ДонІЗТ)

Професор, с.н.с., д.хім.н.  
НАНУ)

Т.Г. Шендрік (ІнФОУ

Рецензенти:

Доцент, к.т.н.

М.І. Жемчугов (ДонІЗТ)

С.н.с., к.т.н.  
НАНУ)

Л.В. Пащенко (ІнФОУ

## ЗМІСТ

	Загальні поняття про побудову речовини .....	4
1	Поляризація діелектриків .....	8
1.1	Діелектрик в електричному полі .....	8
1.2	Поляризація діелектриків і діелектрична проникність .....	8
1.3	Основні види поляризації діелектриків .....	10
1.4	Діелектрична проникність газів .....	12
1.5	Діелектрична проникність рідких діелектриків .....	13
1.6	Діелектрична проникність твердих діелектриків .....	15
2	Електропровідність діелектриків .....	16
2.1	Основні поняття .....	16
2.2	Електропровідність газів .....	20
2.3	Електропровідність рідин .....	21
2.4	Електропровідність твердих речовин .....	22
2.5	Поверхнева електропровідність твердих діелектриків .....	23
3	Діелектричні втрати .....	25
3.1	Основні поняття .....	25

3.2	Види діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах ..	26
3.3	Діелектричні втрати в газах .....	28
3.4	Діелектричні втрати в рідких діелектриках .....	30
3.5	Діелектричні втрати у твердих діелектриках .....	31
4	Пробій діелектриків .....	34
4.1	Загальна характеристика явища пробою .....	34
4.2	Пробій газів .....	35
4.3	Пробій рідких діелектриків .....	42
4.4	Пробій твердих діелектриків .....	44
4.5	Тепловий і електрохімічний пробій твердих діелектриків .	48
	Список літератури .....	53

## ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ПРО БУДОВУ РЕЧОВИНИ

**Види зв'язку.** Основні елементарні частки, з яких будуються усі відомі нам речовини, це *протони, нейтрони й електрони*.

З протонів і нейтронів складаються атомні ядра, електрони заповнюють оболонки атома, компенсуючи позитивний заряд ядра.

Гази, рідкі і тверді тіла можуть складатися з атомів, молекул чи іонів.

Молекули газів містять різне число атомів.

У залежності від будови зовнішніх електронних оболонок атомів можуть утворюватись різні види зв'язку.

*Ковалентним* називається зв'язок атомів один з одним, що

досягається за рахунок електронів, які стають загальними.

Молекули, у яких центри позитивних і негативних зарядів збігаються, є *нейтральними*.

Якщо в окремих молекулах центри протилежних за знаком зарядів не збігаються і знаходяться на деякій відстані один від одного, то такі молекули називаються *полярними* чи *дипольними*.

Полярна молекула характеризується величиною дипольного моменту, який визначається добутком заряду і відстані між центрами позитивного і негативного зарядів.

Ковалентний зв'язок може бути як у молекулах (у трьох агрегатних станах речовини), так і між атомами, що утворюють ґрати кристала.

*Іонний зв'язок* визначається силами притягання між позитивними і негативними іонами. Тверді тіла іонної структури характеризуються підвищеною механічною міцністю і відносно високою температурою плавлення. Типовими прикладами іонних кристалів є галоїдні солі лужних металів.

*Металевий зв'язок* приводить до утворення твердих кристалічних речовин. Метали можна розглядати як системи, побудовані з розташованих у вузлах ґрат позитивно заряджених атомних кістяків, що знаходяться в середовищі вільних електронів.

*Молекулярний зв'язок* (зв'язок Ван-дер-Ваальса). Такий зв'язок існує в ряду речовин між молекулами з ковалентними внутрішньомолекулярними зв'язками. Зв'язок Ван-дер-Ваальса спостерігається між молекулами деяких речовин, наприклад парафіну, які мають низьку температуру плавлення, що свідчить про неміцність їх кристалічних молекулярних ґрат.

**Будова і дефекти твердих речовин.** Російський вчений Е.С. Федоров майже на 40 років раніше, ніж були знайдені методи рентгеноструктурного аналізу, розраховував можливі розташування часток у кристалічних ґратах різних речовин.

Причина утворення будь-яким елементом або сполукою даної просторової ґратки в основному залежить від розмірів атома й електронної конфігурації його зовнішніх оболонок.

Порушення правильності будови кристалів і можливість зміни цих порушень треба вважати такою ж невід'ємною властивістю

реальних кристалів, як і правильність їхньої побудови з атомів.

До дефектів кристалічного твердого тіла відносяться будь-які порушення періодичності електростатичного поля кристалічних ґрат: порушення стехіометричного складу, наявність побічних домішок, механічно напружені ділянки структури, додаткові кристалографічні площини (дислокації, тріщини, шпори) тощо.

За своєю природою перераховані дефекти можуть бути тепловими чи «біографічними». Останні пов'язані з технологічним процесом одержання даного матеріалу.

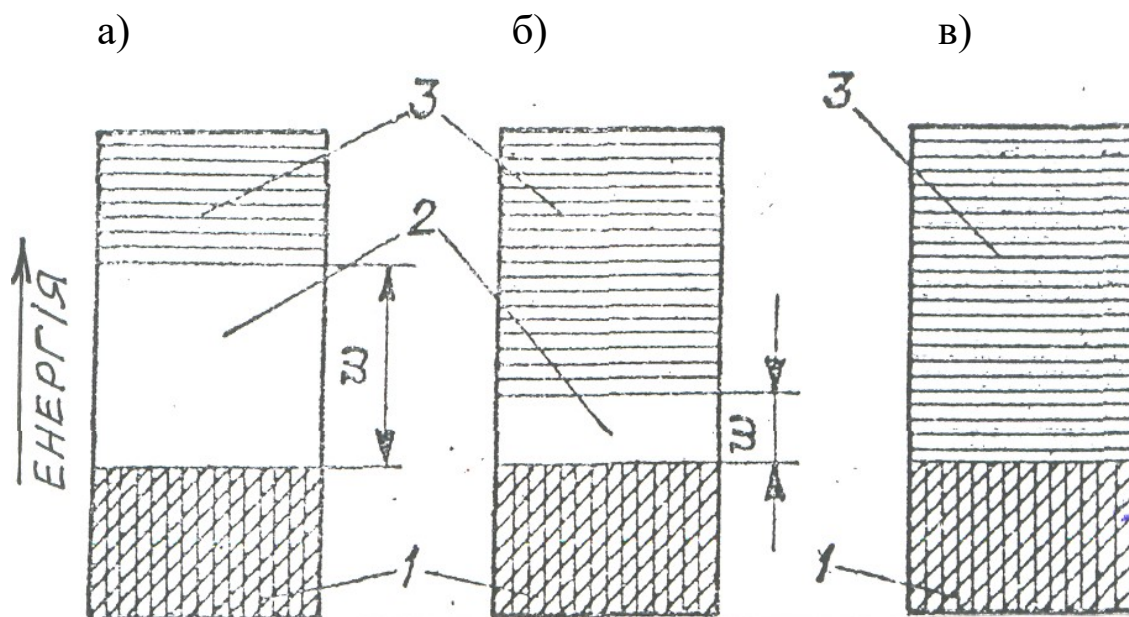
**Класифікація речовин за електричними властивостями.** Усі речовини в залежності від їхніх електричних властивостей відносять до діелектриків, провідників чи напівпровідників. Різницю між провідниками, напівпровідниками і діелектриками найбільш наочно можна показати за допомогою енергетичних діаграм зонної теорії твердих речовин.

Дослідження спектрів випромінювання різних речовин у газоподібному стані, коли атоми розташовані один від одного на великих відстанях, показує, що для атомів кожної речовини характерні цілком визначені спектральні лінії. Це говорить про наявність визначених *енергетичних станів (рівнів)* для різних атомів.

Частина цих рівнів заповнена електронами в нормальному, не збудженому стані атома, на інших рівнях електрони можуть знаходитися тільки після того, як атом буде підданий зовнішньому енергетичному впливу; при цьому він збуджений. Прагнучи прийти до стійкого стану, атом випромінює надлишок енергії в момент повернення електронів на рівні, при яких енергія атома мінімальна.

Рисунок показує розходження в енергетичних діаграмах діелектриків, напівпровідників і провідників.





1 – заповнена електронами зона, 2 – заборонена зона, 3 – зона вільних енергетичних рівнів

Енергетичні діаграми діелектриків (а), напівпровідників (б) і провідників (в) при абсолютному нулі з точки зору зонної теорії твердого тіла

*Діелектриками* є такі матеріали, у яких заборонена зона настільки велика, що електронна провідність у звичайних умовах не спостерігається.

*Напівпровідниками* є речовини з більш вузькою забороненою зоною, яку може подолати за рахунок зовнішніх енергетичних впливів.

*Провідниками* є матеріали, у яких заповнена електронами зона впритул прилягає до зони вільних енергетичних рівнів чи навіть перекривається нею. Унаслідок цього електрони в металі вільні, тому що вони можуть переходити з рівнів заповненої зони на незайняті рівні вільної зони під впливом прикладеного до провідника електричного поля слабкої напруженості.

Процес переходу електронів у вільний стан супроводжується і зворотним явищем, тобто поверненням електронів у нормальний стан. У результаті в речовині настає рівновага, тобто кількість електронів, що переходять у вільну зону, стає рівною кількості електронів, що повертаються назад у заповнену зону.

Електричні властивості визначаються умовами взаємодії атомів речовини і не є неодмінною особливістю даного атома. Наприклад, вуглець у вигляді алмазу є діелектриком, а у вигляді графіту має велику провідність.

**Класифікація речовин за магнітними властивостями.** За магнітними властивостями матеріали підрозділяються на *слабкомагнітні* і *сильномагнітні*. До перших відносяться діамагнетики і парамагнетики. До других — магнітні матеріали, що знайшли собі найбільше застосування в техніці в залежності від особливостей їхніх магнітних властивостей.

*Діамагнетиками* є речовини з магнітною проникністю  $\mu < 1$ , значення якої не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. До них відносяться водень, інертні гази, більшість органічних сполук, кам'яна сіль і ряд металів: мідь, цинк, срібло, золото, ртуть, а також вісмут, галій, сурма.

До *парамагнетиків* відносяться речовини з магнітною проникністю  $\mu > 1$ , що також не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. До цього числа входять кисень, оксид азоту, солі заліза, кобальту, нікелю і рідкісноземельні елементи, лужні метали, алюміній, платина.

Діамагнетики і парамагнетики мають магнітну проникність, близьку до одиниці, і за магнітними властивостями застосовуються в техніці обмежено.

У *магнітних* матеріалів  $\mu \gg 1$  і залежить від напруженості магнітного поля. До них відносяться залізо, нікель, кобальт і їхні сплави, сплави хрому і марганцю, гадоліній, ферити різного складу.

## 1 ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ

### 1.1 Діелектрик в електричному полі

Основним, характерним для будь-якого діелектрика процесом, що виникає при впливі на нього електричної напруги, є *поляризація*

– обмежений зсув зв'язаних зарядів чи орієнтація дипольних молекул.

Про явища, обумовлені поляризацією діелектрика, можна судити за значенням *діелектричної проникності*, а також *кута діелектричних втрат*, якщо поляризація діелектрика супроводжується розсіюванням енергії, що викликає нагрівання діелектрика. У нагріванні технічного діелектрика можуть брати участь нечисленні вільні заряди, що містяться в ньому, які обумовлюють виникнення під впливом електричної напруги *малого наскрізного струму*, що проходить через товщу діелектрика і по його поверхні. Наявність наскрізного струму говорить про явище електропровідності технічного діелектрика, який чисельно характеризується значеннями питомої *об'ємної і поверхневої* електричної провідності, що є зворотним відповідним значенням питомих об'ємного і поверхневого електричних опорів.

При напругах, вищих за граничні значення, настає *пробій діелектрика* – повна втрата ним електроізоляційних властивостей.

Значення напруги, при якій відбувається пробій діелектрика, називається *пробивною напругою*, а відповідне значення напруженості зовнішнього однорідного електричного поля – *електричною міцністю діелектрика*.

## 1.2 Поляризація діелектриків і діелектрична проникність

Під впливом електричного поля пов'язані електричні заряди діелектрика зміщуються в напрямку діючих на них сил і тим більше, чим вище напруженість поля. При знятті електричного поля заряди повертаються в колишній стан. У полярних діелектриках, що містять дипольні молекули, вплив електричного поля викликає ще й орієнтацію диполів у напрямку поля; при відсутності поля диполі дезорієнтуються внаслідок теплового руху.

Будь-який діелектрик з нанесеними на нього електродами, увімкнений в електричне коло, може розглядатися як конденсатор визначеної ємності (рисунок 1.1).

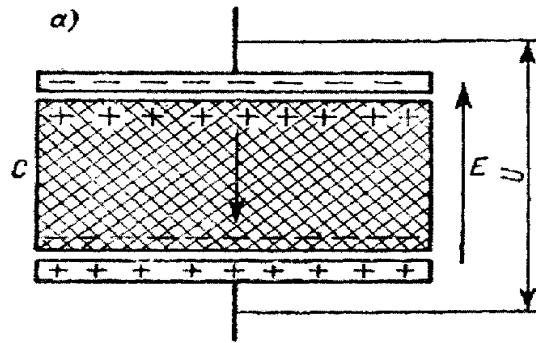


Рисунок 1.1 – Діелектрик складного складу з різними механізмами поляризації в електричному полі

Заряд будь-якого конденсатора, як відомо, дорівнює

$$Q = C \cdot U, \quad (1.1)$$

де  $C$  – ємність конденсатора;

$U$  – прикладена до нього напруга.

Кількість електрики  $Q$  при заданому значенні прикладеної напруги складається з двох складових:  $Q_0$ , що була наявна на електродах, якби їх розділяв вакуум, і  $Q_d$ , що обумовлена поляризацією діелектрика, фактично поділяючого електроди:

$$Q = Q_0 + Q_d. \quad (1.2)$$

Однією з найважливіших характеристик діелектрика, що має особливе значення для техніки, є його *відносна діелектрична проникність*  $\epsilon$ .

Ця величина являє собою відношення заряду  $Q$ , отриманого при деякій напрузі на конденсаторі, що містить даний діелектрик, до заряду  $Q_0$ , який можна було б одержати в конденсаторі тих же розмірів і при тій же напрузі, якби між електродами знаходився вакуум:

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0}. \quad (1.3)$$

З виразу (1.3) випливає, що відносна діелектрична проникність будь-якої речовини більше одиниці і дорівнює одиниці тільки у випадку вакууму. Співвідношення (1.1) може бути подане у вигляді

$$Q = Q_0 \cdot \varepsilon = C \cdot U = C_0 \cdot U \cdot \varepsilon, \quad (1.4)$$

де  $C$  – ємність, яку мав би даний конденсатор, якби його електроди розділяв вакуум.

З формули (1.4) видно, що діелектричну проникність речовини  $\varepsilon$  можна визначити як відношення ємності конденсатора з даним діелектриком до ємності конденсатора тих же розмірів, діелектриком якого є вакуум.

### 1.3 Основні види поляризації діелектриків

Переходячи до розгляду явища поляризації у зв'язку з агрегатним станом і структурою діелектриків, варто розрізнити два основних види поляризації.

До першого виду відноситься поляризація, що відбувається в діелектрику під впливом електричного поля практично миттєво, цілком пружно, без розсіювання енергії, тобто без виділення тепла. Другий вид поляризації не відбувається миттєво, а наростає й убуває уповільнено і супроводжується розсіюванням енергії в діелектрику, тобто його нагріванням. Такий вид поляризації називають *релаксаційною* поляризацією.

До першого виду поляризації відносяться електронна й іонна, інші механізми належать до релаксаційної поляризації.

*Електронна поляризація* являє собою пружний зсув і деформацію електронних оболонок атомів та іонів. Час встановлення електронної поляризації мізерно малий (близько  $10^{-15}$  с). Діелектрична проникність речовини з чисто електронною поляризацією чисельно дорівнює квадрату показника переломлення світла  $n$ . Зсув і деформація електронних орбіт атомів чи іонів не залежить від температури, однак електронна поляризація речовини зменшується з підвищенням температури у зв'язку з тепловим розширенням діелектрика і зменшенням числа часток в одиниці

об'єму.

*Іонна поляризація* характерна для твердих тіл з іонною будовою й обумовлюється зсувом пружно пов'язаних іонів. З підвищенням температури вона підсилюється в результаті ослаблення пружних сил, що діють між іонами, через збільшення відстані між ними при тепловому розширенні, і в більшості випадків температурний коефіцієнт діелектричної проникності іонних діелектриків виявляється позитивним.

Час встановлення іонної поляризації – близько  $10^{-13}$  с.

*Дипольно-релаксаційна поляризація* для стислості названа *дипольною*. Вона відрізняється від електронної й іонної тим, що пов'язана з тепловим рухом часток. Дипольні молекули, що знаходяться в хаотичному тепловому русі, частково орієнтуються під дією поля, що і є причиною поляризації.

Дипольна поляризація можлива, якщо молекулярні сили не заважають диполям орієнтуватися вздовж поля. Зі збільшенням температури молекулярні сили послаблюються, в'язкість речовини знижується, що повинно підсилювати дипольну поляризацію, однак у той же час зростає енергія теплового руху молекул, що зменшує орієнтуючий вплив поля. У зв'язку з цим дипольна поляризація зі збільшенням температури спочатку зростає – поки ослаблення молекулярних сил впливає сильніше, ніж зростання хаотичного теплового руху. Потім, коли хаотичний рух стає інтенсивнішим, дипольна поляризація з ростом температури починає падати.

Дипольна поляризація характерна для полярних газів і рідин. Такий вид поляризації називають також дипольно-радикальною поляризацією.

*Іонно-релаксаційна поляризація* спостерігається в неорганічних склах і в деяких іонних кристалічних неорганічних речовинах з нещільним упакуванням іонів.

*Електронно-релаксаційна поляризація* відрізняється від електронної та іонної і виникає за рахунок збуджених тепловою енергією надлишкових (дефектних) електронів чи дірок.

Електронно-релаксаційна поляризація характерна головним чином для діелектриків з високим показником переломлення, великим внутрішнім полем і електронною електропровідністю.

*Міграційна поляризація* розуміється як додатковий механізм

поляризації, що виявляється у твердих речовинах неоднорідної структури при макроскопічних неоднорідностях і наявності домішок. Ця поляризація виявляється при низьких частотах і пов'язана зі значним розсіюванням електричної енергії. Причинами такої поляризації є провідні і напівпровідні включення в технічних діелектриках, наявність шарів з різною провідністю тощо.

*Мимовільна* чи *спонтанна поляризація* існує в сегнетоелектриках.

У речовинах з мимовільною поляризацією існують окремі зони (*домени*), які мають електричний момент ще під час відсутності зовнішнього поля. Однак при цьому орієнтація електричних моментів у різних доменах різна.

Діелектрична проникність при спонтанній поляризації залежить від напруженості електричного поля. У температурній залежності є спостерігається один чи кілька максимумів. У змінних електричних полях матеріали з мимовільною поляризацією характеризуються значним розсіюванням енергії, тобто виділенням тепла.

#### 1.4 Діелектрична проникність газів

Газоподібні речовини характеризуються дуже малими щільностями унаслідок великих відстаней між молекулами. Тому діелектрична проникність усіх газів незначна і близька до одиниці.

Поляризація газу може бути чисто електронною чи дипольною, якщо молекули газу полярні, проте і для полярних газів основне значення має електронна поляризація. Діелектрична проникність газу тим вища, чим більший радіус молекули. Температурна залежність діелектричної проникності звичайно характеризується виразами

$$TK_{\varepsilon} = \alpha_{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (1.5)$$

Формула (1.5) дає можливість обчислити відносну зміну діелектричної проникності при підвищенні температури на один градус. Ця величина називається *температурним коефіцієнтом*

діелектричної проникності.

Величину  $TK_\epsilon$  неполярного газу можна знайти за виразом:

$$TK_\epsilon = \frac{\epsilon - 1}{T}. \quad (1.6)$$

### 1.5 Діелектрична проникність рідких діелектриків

Рідкі діелектрики можуть бути побудовані з неполярних молекул чи з полярних (дипольних). Значення діелектричної проникності неполярних рідин невеликі і близькі до значення квадрата показника переломлення світла

$$\epsilon \approx n^2. \quad (1.7)$$

Залежність діелектричної проникності неполярної рідини від температури пов'язана зі зменшенням числа молекул в одиниці об'єму.

Значення діелектричної проникності неполярних рідин звичайно не перевищує 2,5. Вплив температури і частоти на діелектричну проникність неполярної рідини показаний на рисунку 1.2.

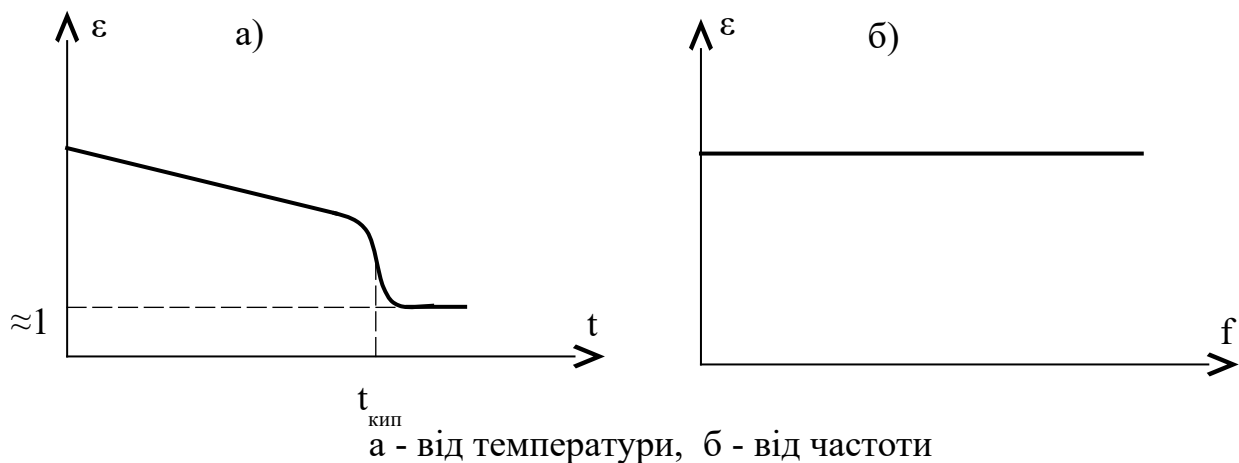


Рисунок 1.2 – Залежність діелектричної проникності неполярної рідини

Поляризація рідин, що містять дипольні молекули, визначається одночасно електронною і дипольною поляризаціями.



Такі рідини мають тим більшу діелектричну проникність, чим більший електричний момент диполів і число молекул в одиниці об'єму.

Сильнополярні рідини, що характеризуються дуже високим значенням діелектричної проникності, наприклад вода, етиловий спирт, не можуть знайти практичного застосування як діелектрики внаслідок їхньої великої провідності.

На рисунку 1.3 наведена залежність діелектричної проникності від температури для полярної рідини – совола.

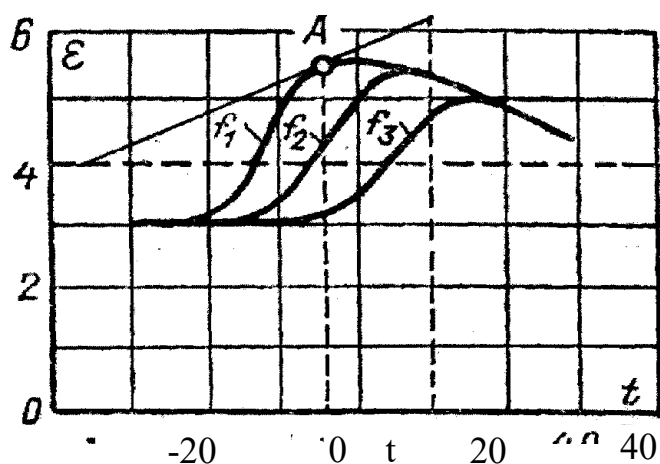


Рисунок 1.3 – Залежність діелектричної проникності від температури для полярної рідини – совола

Значний вплив на  $\epsilon$  дипольної рідини має частота. На рисунку 1.4 подана залежність  $\epsilon$  від частоти для полярної рідини. Хід кривої підтверджує положення: поки частота настільки мала, що диполі встигають прямувати за полем,  $\epsilon$  велика і близька до значення  $\epsilon_0$ , визначеного при постійній напрузі. Коли ж частота стає настільки великою, що молекули вже не встигають прямувати за змінами поля, діелектрична проникність зменшується, наближаючись до значення  $\epsilon_\infty$ , обумовленого електронною поляризацією ( $\epsilon_\infty = n^2$ ).

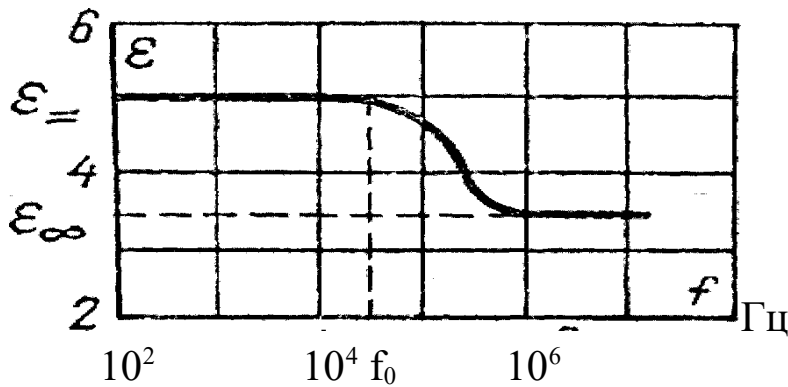


Рисунок 1.4 – Залежність діелектричної проникності від частоти для полярної рідини – совола

Діелектрична проникність полярних рідин, які використовуються як технічні діелектрики, знаходиться у межах від 3,5 до 5, тобто помітно підвищена в порівнянні з  $\epsilon$  неполярних рідин. Вплив частоти на характер залежності діелектричної проникності від температури для полярної рідини був показаний на рисунку 1.3.

## 1.6 Діелектрична проникність твердих діелектриків

Діелектрична проникність твердих речовин може набувати найрізноманітніших числових значень відповідно до різноподібності структурних особливостей твердого діелектрика. У твердих тілах можливі усі види поляризації. Для твердих неполярних діелектриків характерні ті ж закономірності, що і для неполярних рідин і газів.

Тверді діелектрики, які являють собою іонні кристали з щільним упакуванням часток, які мають електронну та іонну поляризацію та мають діелектричну проникність, що лежить у широких межах. Тверді діелектрики, які являють собою іонні кристали з нещільним упакуванням часток, у яких спостерігається, крім електронної й іонної, також і іонно-релаксаційна поляризація, характеризуються в більшості випадків порівняно невисоким значенням діелектричної проникності і великим її позитивним температурним коефіцієнтом.

Полярні органічні діелектрики виявляють дипольну

поляризацію у твердому стані. До таких діелектриків відносяться целюлоза та продукти її переробки, полярні полімери. Діелектрична проникність зазначених матеріалів підпорядковується тим же закономірностям, які спостерігаються для полярних рідин.

Діелектрична проникність сегнетоелектриків велика і має різко виражену залежність від напруженості поля і від температури. Характерною особливістю сегнетоелектриків є наявність у них *діелектричного гістерезису*. До сегнетоелектриків відносяться сегнетова сіль  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , титанат барію  $\text{BaTiO}_3$ , кислий фосфорнокислий калій  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , та ін.

Температура, при якій  $\epsilon$  має максимум, називається *температурою (точкою) Кюрі*. В області температур вище точки Кюрі втрачаються сегнетоелектричні властивості матеріалу, зокрема зникає залежність  $\epsilon$  від напруженості електричного поля.

У сегнетоелектриках спостерігається явище електричного старіння, що виражається згодом в зменшенні діелектричної проникності. Можлива причина цього явища – перегрупування доменів. Особливо різка зміна діелектричної проникності згодом спостерігається в сегнетоелектриках при температурах, близьких до точки Кюрі.

*Діелектрична проникність твердих складних діелектриків*, що являють собою суміш компонентів з різними діелектричними проникностями, може бути в першому наближенні визначена на підставі логарифмічного закону змішання, який в загальному випадку застосовується для розрахунку різних властивостей (наприклад, теплопровідності, показника переломлення тощо).

## 2 ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ДІЕЛЕКТРИКІВ

### 2.1 Основні поняття

Поляризаційні процеси зсуву пов'язаних зарядів у речовині до моменту встановлення рівноважного стану протікають у часі, створюючи *поляризаційні струми, або струми зсуву* у діелектриках. Струми зсуву пружно пов'язаних зарядів при електронній та іонній поляризаціях настільки короткочасні, що їх звичайно не вдається

зафіксувати приладом. Струми зсуву різних видів уповільненої поляризації, які спостерігаються у великого числа технічних діелектриків, називають *абсорбційними струмами*. При постійній напрузі абсорбційні струми, змінюючи свій напрямок, протікають тільки в моменти вмикання і вимикання напруги; при змінній напрузі вони існують протягом усього часу перебування матеріалу в електричному полі.

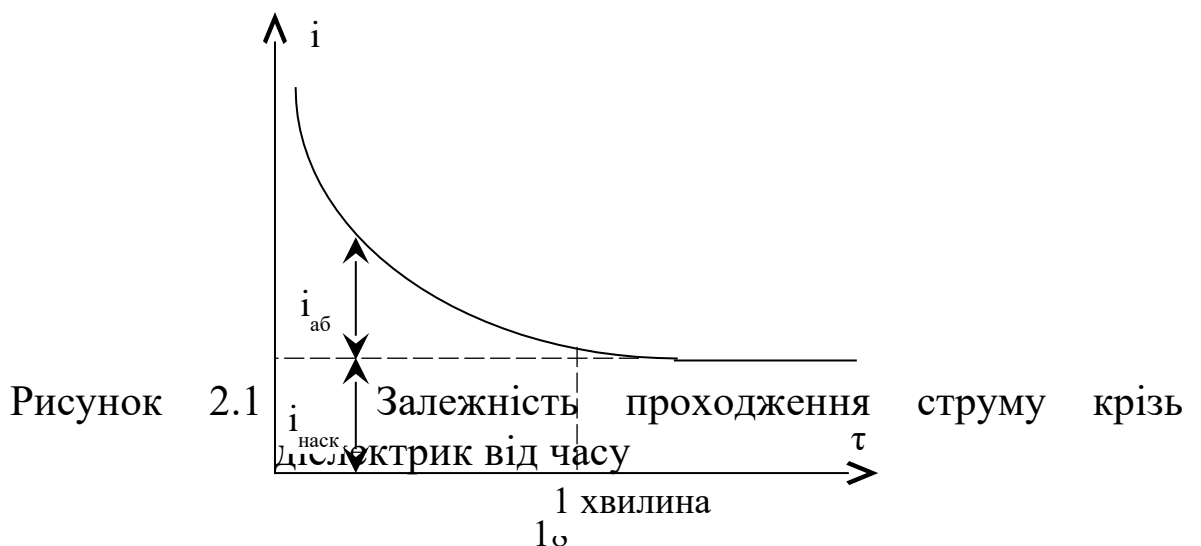
Наявність у технічних діелектриках невеликого числа вільних зарядів приводить до виникнення слабких по величині *наскрізних струмів, або струмів витоку*. Таким чином, повна густина струму в діелектрику являє собою суму густини струмів витоку і зсуву:

$$I = I_{\text{наск}} + I_{\text{аб}}. \quad (2.1)$$

Густина струму зсуву визначається швидкістю зміни вектора індукції  $D$ , обумовленого миттєвими (електронне, іонне) та уповільненими зсувами зарядів

$$I_{\text{аб}} = \frac{\partial D}{\partial \tau}. \quad (2.2)$$

Після завершення процесів поляризації через діелектрик протікає тільки наскрізний струм (рисунок 2.1).



Поляризаційні струми необхідно брати до уваги при вимірюваннях провідності діелектриків через те, що при невеликій витримці зразка діелектрика під напругою звичайно реєструється не тільки *наскрізний струм*, але і супроводжуючий його *струм абсорбції*, унаслідок чого може створитися неправильне уявлення про велику провідність. Провідність діелектрика при постійній напрузі визначається по наскрізному струму, що супроводжується виділенням і нейтралізацією зарядів на електродах. При змінній напрузі активна провідність визначається не тільки наскрізним струмом, але й активними складовими поляризаційних струмів.

Особливістю електропровідності діелектриків у більшості випадків є її неелектронний (іонний) характер.

Істинний опір діелектрика  $R_{із}$ , який визначає величину наскрізного струму, може бути обчислений за такою формулою:

$$R_{із} = \frac{U}{i - \sum i_n} = \frac{U}{i_{наск}}, \quad (2.3)$$

де  $i$  – струм, що спостерігається;

$U$  – прикладена напруга;

$\sum i_n = i_{аб}$  – сума струмів, викликаних уповільненими видами поляризації;

$i_{наск}$  – наскрізний струм.

Оскільки визначення поляризаційних струмів навіть уповільнених видів поляризації викликає деякі труднощі, опір діелектрика розраховується звичайно як частка від поділу напруги на струм, вимірюваний через одну хвилину після увімкнення напруги і прийнятий за наскрізний струм.

Для твердих електроізоляційних матеріалів необхідно розрізняти об'ємну й поверхневу електропровідність.

Для порівняльної оцінки різних матеріалів у відношенні їх об'ємної і поверхневої електропровідності користуються значеннями *питомого об'ємного опору*  $\rho$  і *питомого поверхневого опору*  $\rho_s$ .

За питомим об'ємним опором може бути визначена питома об'ємна провідність, за питомим поверхневим опором – *питома поверхнева провідність*.

У випадку плоского зразка матеріалу при однорідному полі питомий об'ємний опір (Ом·мм<sup>2</sup>/м) розраховується за формулою

$$\rho = \frac{RS}{h}, \quad (2.4)$$

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

Питома об'ємна провідність  $\gamma$  виміряється в ом-квадратних міліметрах на метр (Ом·мм<sup>2</sup>/м). Питомий поверхневий опір дорівнює опору квадрата (будь-яких розмірів), думкою виділеного на поверхні матеріалу, якщо струм проходить через квадрат, від однієї його сторони до протилежної.

Питомий поверхневий опір  $\rho_s$ , ом, розраховується за формулою

$$\rho_s = \frac{R_s \cdot d}{\ell}, \quad (2.5)$$

де  $R_s$  – поверхневий опір зразка матеріалу, Ом, між паралельно поставленими електродами шириною d, що знаходяться один від одного на відстані  $\ell$ .

Повна провідність твердого діелектрика, що відповідає його опору  $R_{із}$ , складається з об'ємної і поверхневої провідності.

Електропровідність ізоляційних матеріалів обумовлюється станом речовини: газоподібним, рідким чи твердим, а також залежить від вологості і температури навколишнього середовища. Деякий вплив на провідність діелектриків має також напруженість поля в зразку, при якій проводиться вимірювання.

При тривалій роботі під напругою струм через тверді і рідкі діелектрики з плином часу може зменшуватися або збільшуватися. Зменшення струму згодом говорить про те, що електропровідність матеріалу була обумовлена іонами сторонніх домішок і зменшувалася за рахунок електричного очищення зразка.

## 2.2 Електропровідність газів

Гази при невеликих значеннях напруженості електричного поля мають винятково малу провідність. Струм у газах може виникнути тільки при наявності в них іонів або вільних електронів. Іонізація нейтральних молекул газу виникає або під дією зовнішніх факторів, або внаслідок зіткнень заряджених часток з молекулами.

Зовнішніми факторами, які викликають іонізацію газу, є рентгенівські промені, ультрафіолетові, космічні промені, радіоактивне випромінювання, а також термічний вплив (сильне нагрівання газу). Електропровідність газу, обумовлена дією зовнішніх іонізаторів, називається *несамостійною*.

З іншого боку, особливо в розріджених газах, можливе створення електропровідності за рахунок іонів, що утворюються в результаті зіткнення заряджених часток з молекулами газу. Ударна іонізація виникає в газі в тих випадках, коли кінетична енергія заряджених часток, що одержується під дією електричного поля, досягає досить великих значень. Електропровідність газу, обумовлена ударною іонізацією, називають *самостійною*.

У слабких полях ударна іонізація відсутня і самостійна електропровідність не виявляється. При іонізації газу, обумовленій зовнішніми факторами, відбувається розщеплення молекул на позитивні і негативні іони. Одночасно частина позитивних іонів, з'єднуючись з негативними частками, утворює нейтральні молекули. Цей процес, як відомо, називається *рекомбінацією*.

На рисунку 2.2 показаний характер залежності струму від напруги. Початкова ділянка кривої до напруги  $U_{\text{поч}}$  відповідає області виконання закону Ома, коли запас позитивних і негативних іонів достатній і його можна вважати постійним. Струм пропорційний напрузі на газовому проміжку. В міру зростання прикладеної напруги іони несуться до електродів, не встигаючи рекомбінувати, і при деякій напрузі всі іони, які утворюються в газовому проміжку, будуть розряджатися на електродах. Подальше збільшення напруги вже не буде викликати зростання струму, що відповідає горизонтальній ділянці кривої рисунка 2.2 (струм насичення при напругах від  $U_{\text{поч}}$  до  $U_{\text{кр}}$ ).

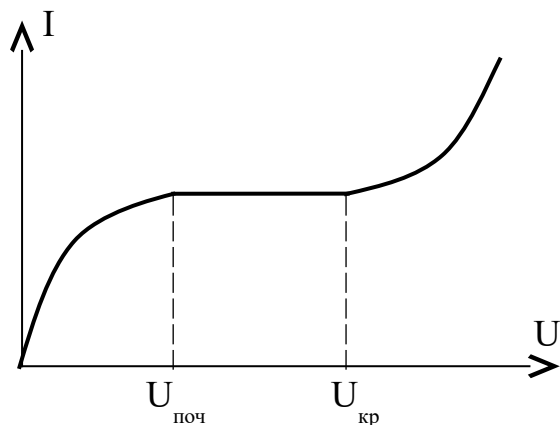


Рисунок 2.2 – Залежність струму в газі від напруги

При збільшенні напруги струм залишається постійним доти, поки іонізація здійснюється під дією зовнішніх факторів. При виникненні ударної іонізації з'являється самостійна електропровідність (за  $U_{кр}$ ) і струм знову починає збільшуватися зі зростанням напруги.

### 2.3 Електропровідність рідин

Електропровідність рідких діелектриків тісно пов'язана з будовою молекул рідини. У неполярних рідинах електропровідність залежить від наявності дисоційованих домішок, у тому числі води; у полярних рідинах електропровідність визначається не тільки домішками, але іноді і дисоціацією молекул самої рідини. Струм у рідині може бути обумовлений як пересуванням іонів, так і переміщенням відносно великих заряджених колоїдних часток. Неможливість повного видалення здатних до дисоціації домішок з рідкого діелектрика ускладнює одержання електроізоляційних рідин з малими значеннями питомої провідності.

Полярні рідини завжди мають підвищену провідність у порівнянні з неполярними, причому зростання діелектричної проникності приводить до зростання провідності. Сильнополярні рідини відрізняються настільки високою провідністю, що розглядаються вже не як рідкі діелектрики, а як провідники з іонною електропровідністю. Очищення рідких діелектриків від



домішок, що містяться в них, помітно підвищує їхній питомий опір.

Питома провідність будь-якої рідини сильно залежить від температури. Зі збільшенням температури зростає рухливість іонів у зв'язку зі зменшенням в'язкості і може збільшуватися ступінь теплової дисоціації. Обидва ці фактори підвищують провідність.

У колоїдних системах спостерігається *моліонна* чи *електрофоретична електропровідність*, при якій носіями заряду є групи молекул – моліони. З колоїдних систем в електротехніці використовуються *емульсії* (обидва компоненти – рідини) і *суспензії* (тверді частки в рідині). Стійкість емульсій і суспензій пояснюється наявністю на частках дисперсної фази електричних зарядів. При накладенні поля моліони починають рухатися, що і виражається зовні, як явище *електрофорезу*. Електрофорез відрізняється від електролізу тим, що при цьому не спостерігається утворення нових речовин, а лише змінюється відносна концентрація дисперсної фази в різних шарах рідини. Електрофоретична електропровідність спостерігається, зокрема, в маслах, які містять емульговану воду, і в органічних рідинах, що містять смоли.

## 2.4 Електропровідність твердих речовин

Електропровідність твердих речовин обумовлюється пересуванням як іонів самого діелектрика, так і іонів випадкових домішок, а в деяких матеріалах може бути викликана наявністю вільних електронів. Електронна електропровідність найбільш помітна при сильних електричних полях. Вид електропровідності встановлюють експериментально, використовуючи закон Фарадея. Іонна електропровідність супроводжується переносом речовини. При електронній електропровідності це явище не спостерігається. У процесі проходження електричного струму через твердий діелектрик іони домішок, які містяться в ньому, можуть частково видалятися, виділяючись на електродах, як це буває у рідинах.

У діелектриках з атомними чи молекулярними ґратами електропровідність пов'язана тільки з наявністю домішок, питома провідність їх дуже мала.

У тілах кристалічної будови з іонними ґратами

електропровідність пов'язана з валентністю іонів. Кристали з одновалентними іонами мають більшу провідність, ніж кристали з багатовалентними іонами. Так, для кристала NaCl провідність значно вища, ніж для кристалів MgO чи Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Питома провідність аморфних тіл однакова в усіх напрямках та обумовлюється складом матеріалів і наявністю домішок. У високомолекулярних органічних і елементоорганічних полімерів вона залежить також від ступеня полімеризації (наприклад, для фенолоформальдегідної смоли), від ступеня вулканізації (для ебоніту). Органічні неполярні аморфні діелектрики, як, наприклад, полістирол, відрізняються дуже малою питомою провідністю.

Велику групу аморфних тіл складає неорганічне скло. Електропровідність скла найтісніше пов'язана з хімічним складом, що дає можливість у ряді випадків одержувати заздалегідь задану величину питомої провідності.

Уведення до складу скла важких оксидів (наприклад, оксидів барію або свинцю) не лише нейтралізує шкідливий вплив лужних оксидів, але і приводить до значного зниження питомої провідності скла.

Тверді пористі діелектрики при наявності в них вологи, навіть у мізерних кількостях, різко збільшують свою питому провідність. Висушування матеріалів підвищує їхній питомий опір, але при перебуванні висушених матеріалів у вологому середовищі знову зменшується.

Керамічні матеріали, на відміну від органічної ізоляції при відсутності електричного поля не старіють, тобто не відбувається необоротних змін їхніх властивостей під дією високих температур. Однак в електричному полі спостерігається електрохімічне старіння кераміки, яке призводить до втрати її електричної міцності.

## **2.5 Поверхнева електропровідність твердих діелектриків**

Поверхнева електропровідність обумовлена наявністю вологи або інших забруднень на поверхні діелектрика. Вода відрізняється значною питомою провідністю. Досить найтоншого шару вологи на поверхні діелектрика, щоб була виявлена помітна провідність,

обумовлена в основному товщиною цього шару. Однак, оскільки опір адсорбованої плівки вологи пов'язаний з природою матеріалу, на поверхні якого вона знаходиться, поверхневу електропровідність звичайно розглядають як властивість самого діелектрика.

Адсорбція вологи на поверхні діелектрика знаходиться в тісній залежності від відносної вологості навколишнього середовища. Тому відносна вологість є найважливішим чинником, що визначає значення питомої поверхневої провідності діелектрика. Особливо різке зменшення питомого поверхневого опору спостерігається при відносній вологості, що перевищує 70-80%.

Питома поверхнева провідність тим нижча, чим менша полярність речовини, чим чистіша поверхня діелектрика і чим краще вона відполірована. Найбільш високе значення питомого поверхневого опору мають неполярні діелектрики, поверхня яких не змочується водою. Полярні діелектрики характеризуються більш низькими значеннями  $\rho_s$ , що помітно зменшуються у вологому середовищі. Особливо різке зниження питомого поверхневого опору можна спостерігати в полярних діелектриків, частково розчинних у воді, у яких на поверхні утворюється плівка електроліту. До поверхні полярних діелектриків легко прилипають різні забруднення, що також приводять до зниження  $\rho_s$ . Низькі значення питомого поверхневого опору мають і об'ємно пористі матеріали, тому що процес поглинання вологи товщею матеріалу стимулює також і утворення поверхневих плівок води.

З метою підвищення питомого поверхневого опору застосовують різноманітні прийоми очищення поверхні: промивання водою, розчинниками, прожарювання при температурі 600-700°C. Найбільш ефективним є очищення поверхні виробу, що не усмоктує воду, тривалим кип'ятінням у дистильованій воді.

Покриття кераміки і скла кремнійорганічними лаками значно підвищує величину питомого поверхневого опору виробів у вологому середовищі.

### **3 ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ**

### 3.1 Основні поняття

*Діелектричними втратами* називають енергію, що розсіюється в одиницю часу в діелектрику при впливі на нього електричного поля і спричиняє нагрівання діелектрика.

Втрати енергії в діелектриках спостерігаються як при змінній напрузі, так і при постійній, оскільки в матеріалі виявляється наскрізний струм, обумовлений провідністю. При постійній напрузі, коли немає періодичної поляризації, якість матеріалу характеризується значеннями питомих об'ємного і поверхневого опорів. При змінній напрузі необхідно використовувати якусь іншу характеристику якості матеріалу, тому що в цьому випадку, крім наскрізної електропровідності, виникає ряд додаткових причин, що викликають втрати енергії в діелектрику.

Діелектричні втрати в електроізоляційному матеріалі можна характеризувати потужністю, що розсіюється, віднесеною до одиниці об'єму, або *питомими втратами*; частіше для характеристики здатності діелектрика розсіювати енергію в електричному полі користуються кутом діелектричних втрат, а також тангенсом цього кута.

У технічних електроізоляційних матеріалах, крім втрат від наскрізної електропровідності і втрат від уповільненої поляризації, виникають діелектричні втрати, які значно впливають на електричні властивості діелектриків. Ці втрати викликаються наявністю ізольованих один від одного сторонніх провідних або напівпровідних включень вуглецю, оксидів заліза тощо і значні навіть при малому вмісті таких домішок в електроізоляційному матеріалі. У випадку високих напруг втрати в діелектрику виникають внаслідок іонізації газових включень усередині діелектрика, що особливо інтенсивно відбувається при високих частотах.

Неприпустимо великі діелектричні втрати в електроізоляційному матеріалі викликають значне нагрівання виготовленого з нього виробу і можуть привести до його теплового руйнування. Природа діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах різна в залежності від агрегатного стану речовини.

Якщо відомо для даного діелектрика, що втрати в ньому визначаються тільки втратами від наскрізної електропровідності в широкому діапазоні частот, то кут втрат конденсатора з таким діелектриком може бути обчислений для будь-якої частоти, що лежить у цьому діапазоні, за формулою

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega CR}, \quad (3.1)$$

де  $C$  й  $R$  – постійні, вимірювані при даній частоті.

Втрати в такому конденсаторі, як легко бачити, не залежать від частоти і визначаються виразом:

$$P = U^2/R. \quad (3.2)$$

Навпаки, якщо втрати в конденсаторі обумовлюються головним чином опором проводів, які підводяться, а також опором самих електродів (обкладок: наприклад, тонкий шар срібла в слюдяному конденсаторі), то потужність, що розсіюється, у такому конденсаторі буде зростати з частотою, пропорційною її квадрату:

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C \omega Cr = U^2 \omega^2 C^2 r. \quad (3.3)$$

З останнього виразу можна зробити дуже важливий практичний висновок: конденсатори, призначені для роботи на високій частоті, повинні мати по можливості малий опір як обкладок, так і сполучних проводів та перехідних контактів.

### **3.2 Види діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах**

Діелектричні втрати за їх особливостями і за фізичною природою можна підрозділити на чотири основних види:

- 1) діелектричні втрати, обумовлені поляризацією;
- 2) діелектричні втрати наскрізної електропровідності;

- 3) іонізаційні діелектричні втрати;
- 4) діелектричні втрати, обумовлені неоднорідністю структури.

*Діелектричні втрати, обумовлені поляризацією, особливо чітко спостерігаються в речовинах, що мають релаксаційну поляризацію: у діелектриках дипольної структури й у діелектриках іонної структури з нещільним упакуванням іонів.*

Релаксаційні діелектричні втрати викликаються порушенням теплового руху часток під впливом сил електричного поля. Це порушення приводить до розсіювання енергії і нагрівання діелектрика.

У температурній залежності тангенса кута релаксаційних діелектричних втрат спостерігається максимум при деякій температурі, характерній для даної речовини.

Діелектричні втрати, що спостерігаються в сегнетоелектриках, пов'язані з явищем спонтанної поляризації. Тому втрати в сегнетоелектриках значні при температурах нижче точки Кюрі, коли відбувається спонтанна поляризація. При температурах вище точки Кюрі втрати в сегнетоелектриках зменшуються. Електричне старіння сегнетоелектрика згодом супроводжується деяким зменшенням втрат.

До діелектричних втрат, обумовлених поляризацією, варто віднести так звані резонансні втрати, що виявляються в діелектриках при світлових частотах.

Резонансні втрати можливі й у твердих речовинах, якщо частота змущених коливань, викликаних електричним полем, збігається з частотою власних коливань часток твердої речовини.

*Діелектричні втрати, обумовлені наскрізною електропровідністю, виявляються у діелектриках, які мають помітну електропровідність, об'ємну або поверхневу. Тангенс кута діелектричних втрат у цьому випадку може бути обчислений за формулою*

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon \cdot f \cdot \rho} \cdot \quad (3.4)$$

*Іонізаційні діелектричні втрати властиві діелектрикам у газоподібному стані.*

Іонізаційні втрати виявляються в неоднорідних електричних полях при напруженостях, що перевищують значення, відповідне початку іонізації даного газу.

Іонізаційні втрати можуть бути обчислені за формулою:

$$P_i = A_1 f (U - U_0)^3 \quad (3.5)$$

де  $A_1$  – постійний коефіцієнт;

$f$  – частота поля;

$U$  – прикладена напруга;

$U_0$  – напруга, що відповідає початку іонізації.

Формула справедлива при

$$U > U_0 \quad (3.6)$$

і лінійній залежності  $\text{tg}\delta$  від  $E$ . Іонізаційна напруга  $U_0$  залежить від тиску, при якому знаходиться газ, оскільки розвиток ударної іонізації молекул пов'язаний з довжиною вільного пробігу носіїв заряду. Зі збільшенням тиску газу величина напруги початку іонізації зростає.

*Діелектричні втрати, обумовлені неоднорідністю структури, спостерігаються в шаруватих діелектриках із просоченого паперу і тканини, у пластмасах з наповнювачем, у пористій кераміці, у похідних слюди – міканітах, мікалексі тощо.*

Через різноманітність структури неоднорідних діелектриків і особливостей компонентів, що містяться в них, не існує загальної формули розрахунку діелектричних втрат у цьому випадку.

### **3.3 Діелектричні втрати в газах**

Діелектричні втрати в газах при напруженостях поля, які лежать нижче значення, необхідного для розвитку ударної іонізації молекул газу, дуже малі. У цьому випадку газ можна практично розглядати як ідеальний діелектрик.

Джерелом діелектричних втрат газу може бути в основному

тільки електропровідність, тому що орієнтація дипольних молекул газів при їхній поляризації не супроводжується діелектричними втратами.

Як відомо, усі гази відрізняються досить малою електропровідністю, і кут діелектричних втрат у зв'язку з цим буде мізерно малий, особливо при високих частотах. Величина  $\operatorname{tg} \delta$  може бути обчислена за формулою (3.4).

При високих напругах і неоднорідному полі, коли напруженість в окремих місцях перевищить деяке критичне значення, молекули газу іонізуються, унаслідок чого в газі виникають втрати на іонізацію.

На рисунку 3.1 показаний вплив газових включень на характер зміни  $\operatorname{tg} \delta$  зі збільшенням напруги. При напрузі  $U_0$  починається іонізація газу в порах і  $\operatorname{tg} \delta$  помітно збільшується. При напрузі більше  $U_1$ , коли газ у включеннях вже іонізований і енергія на процес іонізації не витрачається,  $\operatorname{tg} \delta$  зменшується.

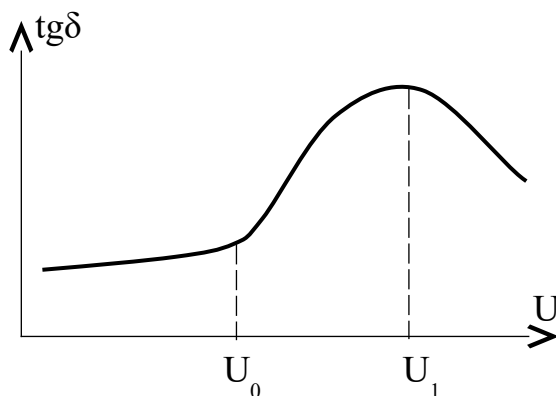


Рисунок 3.1 – Зміна  $\operatorname{tg} \delta$  у залежності від напруги для ізолюючого матеріалу з повітряними включеннями

Криву  $\operatorname{tg} \delta = f(U)$  часто називають *кривою іонізації*. При високих частотах іонізація і втрати в газах зростають настільки, що явище може довести до розігріву і руйнування виробів з газовою ізоляцією, якщо напруга перевищує  $U_0$ .

На лініях електромережі високої напруги втрати на іонізацію повітря в поверхні проводів (явище *корони*) знижують ККД лінії.



### 3.4 Діелектричні втрати в рідких діелектриках

У неполярних рідинах діелектричні втрати обумовлені тільки електропровідністю, якщо рідина не містить домішок з дипольними молекулами. Питома провідність нейтральних чистих рідин надзвичайно мала, завдяки чому малі і діелектричні втрати.

Полярні рідини в залежності від умов (температура, частота) можуть мати помітні втрати, пов'язані з дипольно-релаксаційною поляризацією, крім втрат, обумовлених електропровідністю. У рідких діелектриках з полярними молекулами помітно виявляється залежність діелектричних втрат від в'язкості.

Діелектричні втрати, що спостерігаються в полярних в'язких рідинах при змінній напрузі, значно перевершують втрати, обумовлені електропровідністю. Такі втрати називають *дипольно-релаксаційними втратами*.

Дипольні молекули, прямуючи за зміною електричного поля, повертаються у в'язке середовище і викликають втрати електричної енергії на тертя з виділенням тепла. Якщо в'язкість рідини досить велика, молекули не встигають прямувати за зміною поля і дипольна поляризація практично зникає; діелектричні втрати при цьому будуть малі.

Характер залежності потужності, що розсіюється,  $P_a$  при дипольно-релаксаційних втратах у рідкому діелектрику від частоти поданий на рисунку 3.2 верхньою кривою. Втрати зростають з частотою доти, поки поляризація устигає прямувати за зміною поля. Коли ж частота стає настільки велика, що дипольні молекули вже не встигають цілком орієнтуватися в напрямку поля і  $\operatorname{tg} \delta$  падає, то втрати  $P_a$  стають постійними відповідно до формули (3.3). Таким чином, характер залежності діелектричних втрат  $P_a$  від частоти не відповідає характеру частотної залежності  $\operatorname{tg} \delta$ .

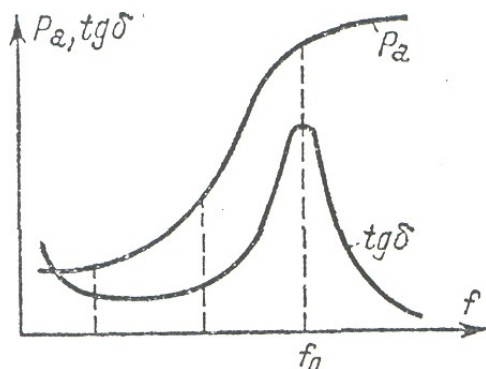


Рисунок 3.2 – Залежність розсіяної потужності та  $\text{tg}\delta$  від частоти для дипольної рідини

Дипольно-релаксаційні втрати в мало в'язких рідинах при низьких частотах незначні і можуть бути менше втрат наскрізної електропровідності.

### 3.5 Діелектричні втрати у твердих діелектриках

Діелектричні втрати у твердих діелектриках необхідно розглядати у зв'язку з їхньою структурою. Тверді речовини мають різноманітний склад і будову; у них можливі усі види діелектричних втрат.

Діелектричні втрати в твердих речовинах можна підрозділити на чотири групи: діелектрики молекулярної структури, іонної структури, сегнетоелектрики і діелектрики неоднорідної структури.

*Діелектричні втрати в діелектриках молекулярної структури залежать від виду молекул.*

У випадку неполярних молекул, у речовинах, що не мають домішок, діелектричні втрати мізерно малі. До таких діелектриків відносяться сірка, парафін, неполярні полімери – поліетилен, політетрафторетилен, полістирол та ін. Зазначені речовини у зв'язку з їх малими втратами знаходять застосування як високочастотні діелектрики.

Діелектрики молекулярної структури з полярними молекулами являють собою головним чином органічні речовини, які широко використовуються в техніці. До них належать матеріали на основі

целюлози (папір, картон та ін.), полярні полімери: поліметилметакрилат (органічне скло), поліаміди (капрон та ін.) і поліуретани, каучукові матеріали (ебоніт), фенолоформальдегідні смоли (бакеліт та ін.), ефіри целюлози (ацетилцелюлоза та ін.). Усі вони через властиву їм дипольно-релаксацію поляризацію мають великі втрати.

*Діелектричні втрати твердих речовин іонної структури пов'язані з особливостями упакування іонів у ґратах.*

У речовинах кристалічної структури з щільним упакуванням іонів при відсутності домішок, що спотворюють ґрати, діелектричні втрати дуже малі. При підвищених температурах у таких речовинах з'являються втрати від наскрізної електропровідності. Прикладом сполук такого роду є також кам'яна сіль, чисті кристали якої мають незначні втрати; найменші домішки, що спотворюють ґрати, різко (на 2–3 порядки) збільшують діелектричні втрати.

До діелектриків кристалічної структури з нещільним упакуванням іонів відноситься ряд кристалічних речовин, які характеризуються релаксаційною поляризацією, що викликає підвищені діелектричні втрати. До цих речовин відносяться: муліт, що входить до складу ізоляторної порцеляни, кордієрит – компонент кераміки з малим температурним коефіцієнтом розширення.

Діелектричні втрати в аморфних речовинах іонної структури (неорганічне скло) пов'язані з явищем поляризації і наявністю електропровідності.

*Діелектричні втрати в сегнетоелектриках вищі, ніж у звичайних діелектриків. Особливістю сегнетоелектриків є наявність у них мимовільної поляризації, що виявляється у визначеному температурному інтервалі аж до точки Кюрі. Діелектричні втрати в сегнетоелектриках мало змінюються з температурою в області мимовільної поляризації і різко падають при температурі вище точки Кюрі, коли сегнетоелектричні властивості втрачаються і мимовільна поляризація зникає.*

На рисунку 3.3 показані температурні залежності тангенса кута діелектричних втрат і діелектричної проникності двох керамічних сегнетоелектриків, які мають різний склад і відповідно до цього різні точки Кюрі.

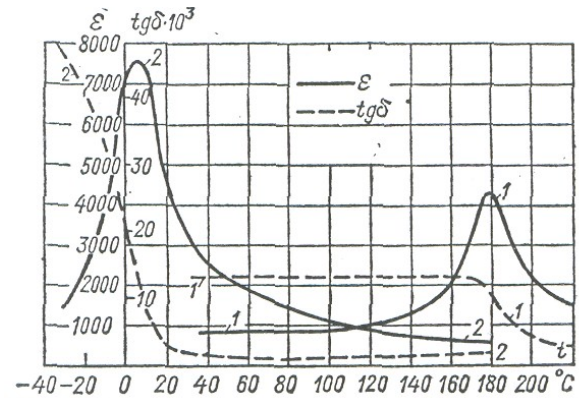


Рисунок 3.3 – Залежність  $\text{tg}\delta$  та діелектричної проникності від температури для зразків титанату барію з різними домішками (1 та 2 – номери зразків)

*Діелектричні втрати у твердих речовинах неоднорідної структури.* До твердих речовин цього типу, які використовуються як діелектрики, належать матеріали, до складу яких входить не менш двох компонентів, механічно змішаних один з одним. До неоднорідних діелектриків відноситься насамперед кераміка. У складі кераміки розрізняють кристалічну, склоподібну і газову фази.

Діелектричні втрати в кераміці залежать від характеру кристалічної і склоподібної фаз та кількісного співвідношення між ними.

До числа неоднорідних матеріалів варто віднести слюду, що має шарувату структуру. Наявність напівпровідних прошарків у пластинках слюди викликає збільшення  $\text{tg}\delta$  при змінній напрузі низької частоти в порівнянні зі значенням  $\text{tg}\delta$  найтонших монокристалів цього матеріалу.

У сучасній електроізоляційній техніці застосовується велика кількість неоднорідних діелектриків. В одних випадках це визначається вимогами механічної міцності (волокниста основа), в других – здешевленням вартості та наданням необхідних властивостей (наповнювачі в пластмасах і гумах), у третіх – використанням цінних відходів (слюдяні матеріали тощо).

#### 4 ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ

## 4.1 Загальна характеристика явища пробою

Діелектрик, знаходячись в електричному полі, втрачає властивості електроізоляційного матеріалу, якщо напруженість поля перевищить деяке критичне значення. Це явище носить назву *пробою діелектрика* чи порушення його електричної міцності. Значення напруги, при якій відбувається пробій діелектрика, називається *пробивною напругою*, а відповідне значення напруженості поля – *електричною міцністю діелектрика*.

Пробивна напруга позначається  $U_{пр}$  і вимірюється найчастіше в кіловольтах. Електрична міцність визначається пробивною напругою, віднесеною до товщини діелектрика в місці пробою:

$$E_{міцн} = \frac{U_{пр}}{h}, \quad (4.1)$$

де  $h$  – товщина діелектрика.

Пробій газу обумовлюється явищем ударної і фотонної іонізації. Пробій рідких діелектриків відбувається в результаті іонізаційних теплових процесів. Одним з найголовніших факторів, що сприяють пробою рідин, є наявність у них сторонніх домішок. Пробій твердих тіл може бути викликаний як електричними, так і тепловими процесами, що виникають під дією поля.

Явище електричного пробою пов'язане з електронними процесами в діелектрику, що виникають у сильному електричному полі, які приводять до раптового різкого місцевого зростання щільності електричного струму до моменту пробою.

При тривалій дії напруги пробій може бути викликаний електрохімічними процесами, що відбуваються в діелектрику під впливом електричного поля.

## 4.2 Пробій газів

Електрична міцність повітря в нормальних умовах невелика в порівнянні з  $E_{\text{міцн}}$  більшості рідких і твердих діелектриків.

Невелика кількість позитивних і негативних іонів, що містяться в газі, і електронів, що знаходяться, як і нейтральні молекули газу, у безладному тепловому русі, при накладенні поля одержує деяку додаткову швидкість і починає переміщатися в напрямку поля або протилежному, у залежності від знака заряду. При цьому заряджена частка газу набуває додаткової енергії

$$W = q \cdot U_{\lambda}, \quad (4.2)$$

де  $q$  – заряд;

$U_{\lambda}$  – спадання напруги на довжині вільного пробігу  $\lambda$ .

Додаткова енергія заряджених часток передається молекулам, з якими вони зіштовхуються. Якщо ця енергія досить велика, відбувається збудження атомів і молекул, пов'язане з переходом електрона на більш віддалену від ядра орбіту, чи навіть іонізація молекул, тобто їхнє розщеплення на електрони і позитивні іони.

Умовою, що визначає можливість іонізації, є

$$W \geq W_i, \quad (4.3)$$

причому  $W$  містить у собі й енергію теплового руху, звичайно невелику при нормальній температурі. Енергію іонізації  $W_i$  звичайно характеризують *іонізаційним потенціалом*

$$U_i = W_i/q. \quad (4.4)$$

При заданих значеннях тиску газу і температури ударна іонізація починається при визначеній напруженості поля, оскільки  $q$  і  $\lambda$  постійні для кожного газу. Ця напруженість поля  $E$  називається *початковою напруженістю*.

Здавалося б, що, подібно електронам, і позитивні іони, розігнані полем, зіштовхуючись з нейтральними частками газу, повинні викликати іонізацію газу. Насправді при енергіях до сотні і тисячі електрон-вольт зіткнення позитивних іонів з частками газу

безпосередньо не приводять до іонізації газу. Це розходження бомбардування часток газу електронами і позитивними іонами пояснюється тим, що електрони мають значно більшу рухливість, ніж іони. Крім того, електрон, що відщеплюється, відштовхується електронем, який зіштовхнувся з часткою газу, і, навпаки, притягається позитивним іоном. Позначається також і те, що для електрона довжина вільного пробігу більша, ніж для іона. Якщо позитивний іон, розігнаний полем, зіткнеться з периферичним електронем нейтральної частки, то умови для відщеплення електрона виявляються несприятливими, тому що при великій різниці маси енергія, яка віддається електрону при ударі, мала. Іонізація при зіткненні іонів з частками газу залежить від хімічної природи часток, що зіштовхнулися, тому що зіткнення є елементарним актом хімічної реакції. У явищах розряду в газі, що знаходиться між металевими електродами, позитивні іони вивільняють електрони з металу при бомбардуванні поверхні катода.

У ряді випадків електрон, розігнаний полем, може не іонізувати молекулу, а привести її, як указувалося вище, у збуджений стан. У наступний момент ця збуджена молекула віддає свою надлишкову енергію у формі випромінювання – випускає фотон. Фотон поглинається будь-якою іншою молекулою, що при цьому може іонізуватися. Така внутрішня *фотонна іонізація* газу завдяки великій швидкості поширення випромінювання приводить до особливо швидкого розвитку в розрядному проміжку каналів з підвищеною провідністю газу.

На рисунку 4.1 наведена схема, що пояснює, чому ріст електропровідного каналу – *стрімера* – проходить швидше, ніж просування електронної лавини. На цьому рисунку лавини умовно показані у вигляді заштрихованих конусів, а хвилястими лініями зображені шляхи фотонів. Усередині кожного конуса, що являє собою лавину, яка розвивається, газ іонізується ударами електронів; знову відщеплені електрони, що розганяються полем, іонізують частки газу, які зустрічаються ними, і таким чином лавиноподібно наростає число електронів, що рухаються до анода, і число позитивних іонів, які прямують до катода.

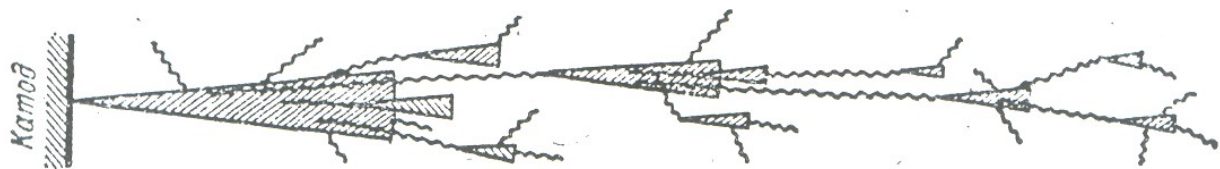


Рисунок 4.1 – Схематичне зображення поширення стримера при пробії газу

Початки хвилястих ліній виходять з атомів, що були порушені ударами електронів і слідом за тим випустили фотон. Рухаючись зі швидкістю  $3 \cdot 10^8$  м/с, фотони випереджують лавину і в якомусь місці, що відповідає кінцю хвилястої лінії, іонізують частку газу. Відщеплений тут електрон, спрямовуючись до анода, породжує нову лавину далеко попереду першої лавини. Таким чином, поки перша лавина виростає, наприклад, на довжину малої стрілки АВ, показаної на рисунку 4.1, канал підвищеної провідності газу, що намічається, тобто стример поширюється на довжину великої стрілки СД показаної на тому ж рисунку.

У наступній стадії окремі лавини в негативному стримері, наганяючи один одного, зливаються, утворюючи суцільний канал іонізованого газу.

Явище пробією газу залежить від ступеня однорідності електричного поля, в якому здійснюється пробій. Розглянемо явище пробією газу в *однорідному полі*. Однорідне поле можна одержати між плоскими електродами з закругленими краями, а також між сферами великого діаметра при малій відстані між ними. У такому полі пробій настає практично миттєво при досягненні строго визначеної напруги, яка залежить від температури і тиску газу. Між електродами виникає іскра, що потім переходить у дугу, якщо джерело напруги має достатню потужність. Появу іскри при відомій відстані між електродами використовують для визначення значення прикладеної напруги (вимір високих напруг за допомогою кульових розрядників).

Залежність електричної міцності повітря (амплітудні значення) від відстані між електродами показана на рисунку 4.2.



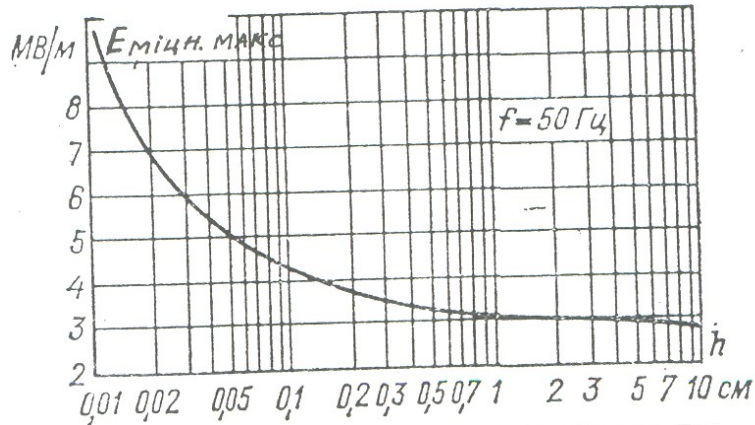


Рисунок 4.2 – Залежність електричної міцності повітря від відстані між електродами в однорідному полі

При малих відстанях між електродами спостерігається значне збільшення електричної міцності. Це явище можна пояснити труднощами формування розряду при малій відстані між електродами. При нормальних умовах, тобто при тиску 0,1 МПа і температурі 20°С, електрична міцність повітря при відстані між електродами 1 см складає приблизно 3,2 МВ/м; вона досягає 70 МВ/м при  $h=5$  мкм.

Електрична міцність газу в значному ступені залежить від його щільності (тобто від тиску, якщо температура постійна). При малих змінах температури і тиску газу пробивна напруга пропорційна щільності газу. Тому для розрахунку пробивних напруг повітря застосовується формула

$$U_{np} = U_{про} \delta, \quad (4.5)$$

де  $U_{np}$  – пробивна напруга при даних температурі і тиску;

$U_{про}$  – пробивна напруга при нормальних умовах ( $t=20^\circ\text{C}$  і  $p=0,1$  МПа);

$\delta$  – відносна щільність повітря, розрахована за співвідношенням

$$\delta = 0,386 \frac{p}{t + 273} \quad (4.6)$$

при нормальних умовах  $\delta=1$ .

При великих тисках і відповідно підвищеній щільності газу

відстань між окремими молекулами стає меншою; тим самим зменшується довжина пробігу електронів, для того щоб пробій відбувся, повинна бути збільшена напруженість поля.

При зменшенні тиску спочатку спостерігається спад електричної міцності, як це видно з рисунка 4.3; коли ж тиск досягає деякої межі, нижчої за атмосферний тиск, та розрідження досягає високих ступенів, електрична міцність починає знову зростати. Це зростання пояснюється зменшенням числа молекул газу в одиниці об'єму при сильному розрідженні і зниженням імовірності зіткнень електронів з молекулами. При високому вакуумі пробій можна пояснити явищем виривання електронів з поверхні електрода (холодна емісія). У цьому випадку електрична міцність доходить до досить високих значень та залежить від матеріалу і стану поверхні електродів. Велику електричну міцність вакууму використовують у техніці при конструюванні вакуумних конденсаторів для великих напруг високої частоти. Гази при великих тисках використовуються як ізоляція для високовольтної апаратури, а також у виробництві кабелів і конденсаторів високої напруги. Хімічний склад газу помітно впливає на величину електричної міцності.

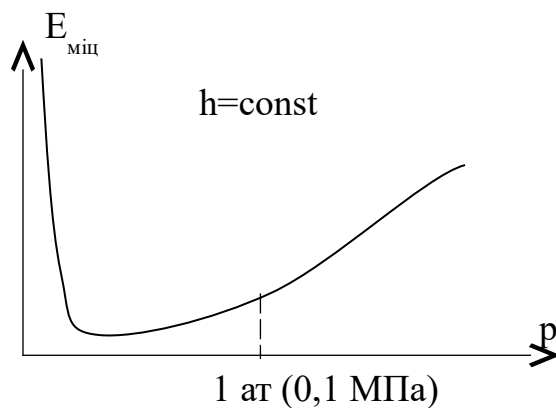


Рисунок 4.3 – Залежність електричної міцності газу від тиску

Закономірності, яким підкоряється пробій газів у *неоднорідному полі*, помітно відрізняються від описаних вище закономірностей, що спостерігаються при пробії в однорідному

полі. Неоднорідне поле виникає між двома вістрями, вістрям і площиною, між проводами ліній електропередачі, між сферичними поверхнями при відстані між ними, яка перевищує радіус сфери, тощо.

Особливістю пробою газу в неоднорідному полі є виникнення часткового розряду у вигляді *корони* в місцях, де напруженість поля досягає критичних значень, з подальшим переходом корони в іскровий розряд і дугу при зростанні напруги.

У випадку електродів голка-площина та позитивній полярності голки пробій відбувається при меншій напрузі, ніж при зворотній полярності (рисунок 4.4). Це пояснюється таким способом. Іонізація газу при будь-якій полярності на електродах відбувається в районі голки, де існують найбільші значення напруженості електричного поля, і, отже, біля неї утворюється “хмара” з позитивно заряджених іонів – молекул, з орбіт яких зірвані електрони. При позитивній полярності на голці цей об’ємний заряд служить продовженням голки і скорочує довжину розрядного проміжку. Позитивний об’ємний заряд відштовхується і йде від позитивно зарядженої голки, однак більш рухливі електрони, що обумовлюють процес іонізації, увесь час устигають його відновлювати, тобто виходить картина “проростання” позитивного об’ємного заряду, пов’язаного з голкою, у бік негативно зарядженої площини. Тому пробій і настає при меншій напрузі, ніж у випадку протилежної полярності електродів, коли об’ємний заряд частково нейтралізує та екранує голку з негативною полярністю від площини, зарядженої позитивно.

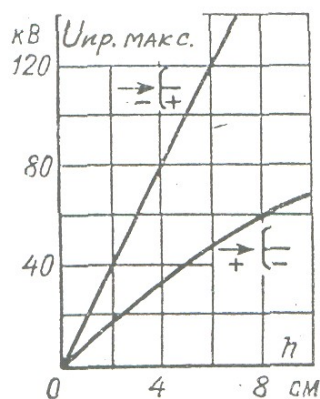


Рисунок 4.4 – Залежність пробивної напруги повітря від

відстані між електродами у неоднорідному полі

Порівняння пробивної напруги повітря в різко неоднорідному полі при низькій і високій частотах надано на рисунку 4.5. При високих частотах напруга, що відповідає появі корони, майже збігається з пробивною напругою, яка мало зростає зі збільшенням відстані між електродами. Цього не спостерігається при промисловій частоті, де залежність практично лінійна.

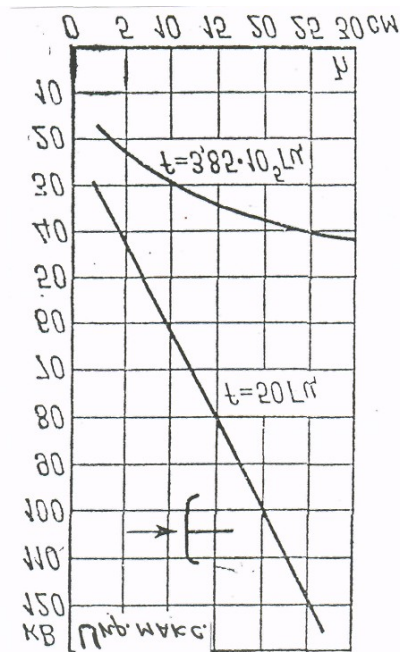


Рисунок 4.5 – Залежність пробивної напруги повітря від відстані між електродами при різних частотах

Розряд у повітрі біля поверхні твердого діелектрика, який називають у техніці *поверхневим розрядом (перекриттям)*, виникає звичайно при більш низьких напругах, ніж у тому випадку, коли між електродами є тільки повітря. На розрядну напругу впливають форма електричного поля, обумовлена конфігурацією електродів і діелектрика, частота поля, стан поверхні діелектрика, тиск повітря.

Відносна вологість повітря значно впливає на розрядні напруги ізоляторів при низькій частоті і постійній напрузі і мало позначається при радіочастотах. При частоті 50 Гц підвищення відносної вологості повітря з 60 до 80-90%, наприклад, знижує майже вдвічі розрядні напруги керамічних ізоляторів

бочкоподібного типу.

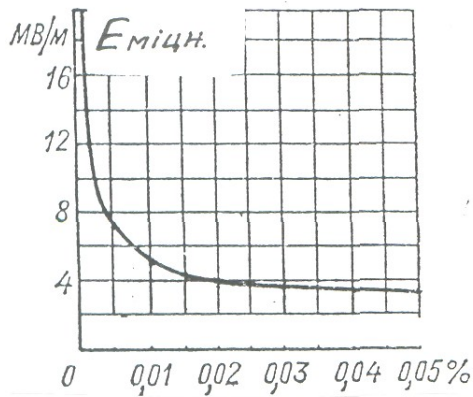
### 4.3 Пробій рідких діелектриків

Рідкі діелектрики відрізняються значно більш високою електричною міцністю, ніж гази в нормальних умовах.

Гранично чисті рідини одержати надзвичайно важко. Постійними домішками в рідких діелектриках є вода, гази і тверді частки. Наявність домішок і визначає в основному явище пробою рідких діелектриків та викликає великі утруднення для створення точної теорії пробою цих речовин.

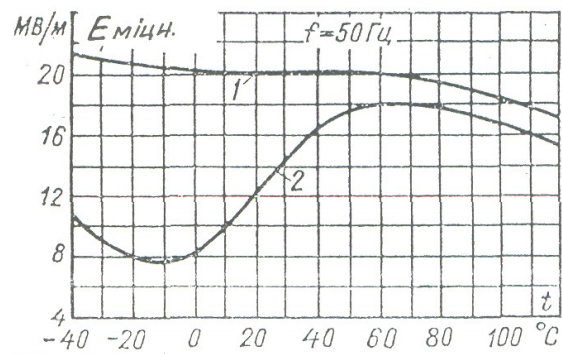
Теорію електричного пробою застосовують до рідин, максимально очищених від домішок. При високих значеннях напруженості електричного поля може відбуватися виривання електронів з металевих електродів та, як і для газів, руйнування молекул самої рідини за рахунок ударів зарядженими частками. При цьому підвищена електрична міцність рідкого діелектрика в порівнянні з газоподібним обумовлена значно меншою довжиною вільного пробігу електронів. Пробій рідин, які містять газові включення, пояснюють місцевим перегрівом рідини (за рахунок енергії, що виділяється у пухирцях газу, які відносно легко іонізуються), що приводить до утворення газового каналу між електродами. Вплив води, що не змішується з трансформаторним маслом при нормальній температурі і утримується в ньому у вигляді окремих дрібних крапельок, наведено на рисунку 4.6.

На рисунку 4.7 показаний вплив температури на електричну міцність трансформаторного масла чистого що містить деяку кількість води. Електрична міцність чистого масла не залежить від температури в межах до  $80^{\circ}\text{C}$ , коли починається кипіння легких масляних фракцій і утворення великої кількості пухирців пари усередині рідини. Наявність води знижує електричну міцність масла при нормальній температурі. Підйом  $E_{\text{міцн}}$  при підвищенні температури обумовлений переходом води зі стану емульсії в стан молекулярного розчину. Подальше зниження електричної міцності пояснюється процесами кипіння рідини. Збільшення електричної міцності при низьких температурах пов'язано зі збільшенням в'язкості масла і меншими значеннями діелектричної проникності льоду в порівнянні з водою (рисунк 4.8).



Випробування проведене у стандартному розряднику ( $h=2,5$  мм)

Рисунок 4.6 – Залежність електричної міцності від вмісту води у маслі



1 – висушене масло;  
2 – експлуатаційне (зі слідами води)

Рисунок 4.7 – Залежність електричної міцності трансформаторного масла від температури

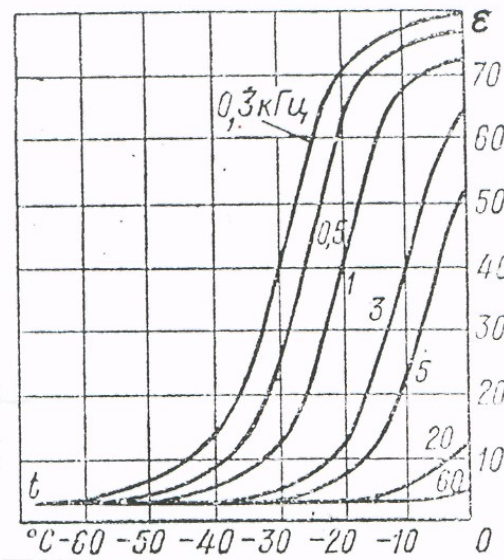


Рисунок 4.8 – Залежність діелектричної проникності льоду від температури при різних частотах

Тверді забруднення (сажа, обривки волокон тощо)

спотворюють електричне поле усередині рідини і також приводять до зниження електричної міцності діелектричних рідин. Очищення рідких діелектриків, зокрема масел, від домішок помітно підвищує електричну міцність. Так, наприклад, неочищене трансформаторне масло має  $E_{\text{міцн}} \approx 4 \text{ МВ/м}$ ; після ретельного очищення електрична міцність масла підвищується до 20-25 МВ/м.

#### 4.4 Пробій твердих діелектриків

Розрізняють чотири види пробою твердих діелектриків:

- 1) електричний пробій макроскопічно однорідних діелектриків;
- 2) електричний пробій неоднорідних діелектриків;
- 3) тепловий (електротепловий) пробій;
- 4) електрохімічний пробій.

Кожний із зазначених видів пробою може спостерігатися для того самого матеріалу в залежності від характеру електричного поля (постійного або змінного, імпульсного, низької чи високої частоти), наявності в діелектрику дефектів, зокрема закритих пор від умов охолодження, часу впливу напруги.

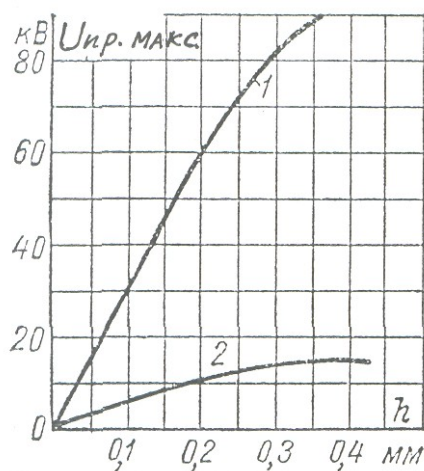
**Електричний пробій макроскопічно однорідних діелектриків.** Цей вид пробою характеризується досить швидким розвитком, він протікає за час, менше  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  с, і не обумовлений тепловою енергією, хоча електрична міцність при електричному пробі в деякій мірі залежить від температури.

Електричний пробій за своєю природою є чисто електронним процесом, коли з небагатьох початкових електронів у твердому тілі створюється електронна лавина. Електрони розсіюють енергію свого руху, накопичену в електричному полі, збуджуючи пружні коливання кристалічних ґрат. Електрони, які досягли визначеної критичної швидкості, відщеплюють нові електрони, і стаціонарний стан порушується, тобто виникає ударна іонізація електронами у твердому тілі.

Чисто електричний пробій спостерігається, коли виключений вплив електропровідності і діелектричних втрат, які обумовлюють

нагрівання матеріалу, а також відсутність іонізації газових включень. У випадку однорідного поля і повної однорідності структури матеріалу напруженість поля при електричному пробії може служити мірою електричної міцності речовини. Такі умови вдається спостерігати для монокристалів лужно-галоїдних сполук і деяких органічних полімерів; у цьому випадку  $E_{\text{міцн}}$  досягає 1000 МВ/м і більш.

Для однорідних матеріалів спостерігається помітна різниця між значеннями пробивної напруги в однорідному і неоднорідному полях, як це видно з рисунка 4.9.



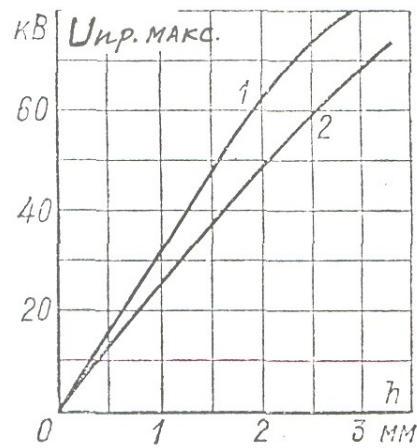
1 – однорідне поле; 2 – різко неоднорідне поле

Рисунок 4.9 – Залежність пробивної напруги від товщини при 50 Гц для одного із сортів технічного скла

**Електричний пробій неоднорідних діелектриків.** Такий пробій характерний для технічних діелектриків, які найчастіше містять газові включення. Так само, як і електричний пробій однорідного діелектрика, він відрізняється дуже швидким розвитком.

Пробивні напруги для неоднорідних діелектриків, що спостерігаються в зовнішньому однорідному або неоднорідному полі, як правило, невисокі і мало відрізняються одна від одної (рисунок 4.10).





1 – однорідне поле; 2 – різко неоднорідне поле

Рисунок 4.10 – Залежність пробивної напруги від товщини при 50 Гц для електротехнічної порцеляни

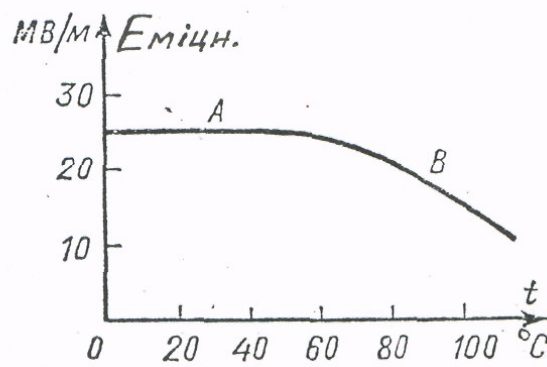
Прийнято вважати, що в однорідному полі електрична міцність скла, порцеляни і ряду інших твердих діелектриків не залежить від товщини зразка. Однак основні роботи з вивчення впливу ступеня однорідності поля на електричну міцність проводилися лише зі склом при дуже малій товщині зразків – від 0,05 до 0,2-0,5 мм, коли число дефектів невелике. Дані рисунків 4.9 та 4.10 показують, що зі збільшенням товщини зразка підсилюється неоднорідність структури, зростає кількість слабких місць, газових включень і знижуються електричні міцності як в однорідному, так і в неоднорідному полі.

Іноді на досвіді можна спостерігати, що електрична міцність кераміки при електродах, що створюють зовнішнє неоднорідне поле, буде навіть вище, ніж при електродах, які забезпечують однорідне поле. Так, електрична міцність зразків рутилової кераміки товщиною 1,6-1,7 мм при постійній напрузі у випадку електродів голка – площа складає приблизно 24 МВ/м, а при плоских електродах – усього 12,5-15 МВ/м.

Отже, чим менша площа електродів, тим вище може бути значення електричної міцності керамічних матеріалів унаслідок зменшення кількості слабких місць, що потрапляють у межі поля, хоча поле в цьому випадку різко неоднорідне. Зниження

електричної міцності твердих діелектриків при збільшенні площі електродів спостерігається не тільки в кераміці, але й у ряду інших матеріалів: паперу, картону, лакотканин та ін.

Електрична міцність твердих діелектриків практично не залежить від температури до деякого її значення. Вище цього значення спостерігається помітне зниження електричної міцності, що говорить про появу механізму теплового пробою. Як приклад на рисунку 4.11 показана залежність електричної міцності від температури для електротехнічної порцеляни при частоті 50Гц.



А – область електричного пробою; В – область теплового пробою

Рисунок 4.11 – Залежність електричної міцності електротехнічної порцеляни від температури при  $f=50$  Гц

Низькою електричною міцністю відрізняються діелектрики з відкритою пористістю; до таких діелектриків відносяться мрамур, непросочений папір, деревина, пориста кераміка. Електрична міцність їх порівняно мало відрізняється від міцності повітря; винятком є папір з підвищеною щільністю. Тверді діелектрики з закритими порами, наприклад щільна кераміка, характеризуються більш високою електричною міцністю. Наявність газових включень у твердій ізоляції особливо небезпечна при високих частотах.

Високою електричною міцністю характеризуються діелектрики, що мають щільну структуру і не містять газових включень. До них відносяться слюда, папір, ретельно просочений рідким діелектриком, скло.

Значення електричної міцності деяких твердих діелектриків наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Значення електричної міцності деяких твердих діелектриків в однорідному полі при частоті 50 Гц

Матеріал	$E_{міцн}$ , МВ/м	Особливості структури
Скло	100-300	Однорідні щільні і шаруваті діелектрики, якщо поле перпендикулярне шарам
Кам'яна сіль	100-150	
Слюда	100-300	
Просочений папір	100-300	
Органічні плівки (полістирол, триацетат целюлози)	90-120	
Кераміка	10-30	Неоднорідні за структурою діелектрики з закритими або сполученими між собою капілярами
Мікалекс	10-15	
Пластичні маси із наповнювачем (фенолоформальдегідні, амінопласти)	10-15	
Мармур	4-5	Діелектрики з відкритими великими порами
Пориста кераміка	1,5-2,5	
Деревина	4-6	
Непросочений кабельний папір	7-10	

#### 4.5 Тепловий і електрохімічний пробій твердих діелектриків

**Тепловий пробій.** Електротепловий (скорочено тепловий) пробій зводиться до розігрівання матеріалу в електричному полі до температур, які відповідають хоча б місцевій втраті цим матеріалом електроізоляційних властивостей, пов'язаній з надмірним зростанням наскрізної електропровідності чи діелектричних втрат. Пробивна напруга при тепловому пробіі залежить від ряду факторів: частоти поля, умов охолодження, температури

навколишнього середовища та ін. Крім того, напруга теплового пробою пов'язана з нагрівостійкістю матеріалу. Органічні діелектрики внаслідок малої нагрівостійкості за інших рівних умов мають більш низькі значення пробивних напруг при тепловому пробі, ніж неорганічні. При розрахунках напруження теплового пробою повинні братися до уваги  $\text{tg}\delta$  діелектрика і його залежність від температури, а також діелектрична проникність матеріалу. У колах змінного струму низької частоти знаходять застосування матеріали, які дають різке зростання  $\text{tg}\delta$  вже при нагріванні вище  $20-30^\circ\text{C}$ ; з іншого боку, відомі діелектрики, значення  $\text{tg}\delta$  яких мало змінюється в дуже широкому інтервалі температур, аж до  $150-200^\circ\text{C}$ ; в останньому випадку тепловий пробій зможе розвиватися тільки при досягненні цих температур.

Температура нагрівання ізолятора в електричному полі високої напруги встановлюється тоді, коли тепловиділення виявляється рівним тепловіддачі в навколишнє середовище. У більшості випадків відведення тепла обумовлюється конвекцією повітря. Такі умови роботи підвісних і опорних ізоляторів, керамічних конденсаторів, каркасів котушок індуктивності. Відведення тепла за рахунок теплопровідності навколишнього середовища має місце для кабелів, уведень, вмонтованих у стіни. Звичайно при розрахунку ізоляторів вибирають таку робочу напругу, яка відповідає сталій температурі, щоб температура нагрівання не перевершувала деякого заданого значення, небезпечного з точки зору нагрівостійкості діелектрика.

Зі збільшенням прикладеної до ізолятора напруги зростає реактивна потужність, що викликає ріст тепловиділення і нагрів ізолятора.

Для того, щоб температура ізолятора не перевищувала деякого критичного значення, вище якого неминуче настає теплове руйнування ізолятора, необхідно правильно установити допустиме напруження. Якщо вважати, що вся зміна температури відбувається поза діелектриком, то робочу напругу можна знайти, дорівнявши тепловиділення до кількості тепла, що відводиться при заданій температурі з поверхні ізолятора:

$$U^2 \omega C \text{tg} \delta = \sigma S (t_{\text{поб}} - t_0), \quad (4.7)$$

де  $U$  – напруга, В;  
 $U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$  – реактивна потужність, В·А;  
 $\omega$  – кутова частота,  $\text{с}^{-1}$ ;  
 $C$  – ємність ізолятора, Ф;  
 $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс кута втрат при робочій температурі;  
 $\sigma$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  
 $S$  – поверхня ізолятора,  $\text{м}^2$ ;  $t_{\text{роб}}$  і  $t_0$  – температури поверхні ізолятора та навколишнього середовища, К.

Формула (4.7) дає можливість з достатньою точністю розрахувати допустиме напруження для виробів з відомою електричною ємністю і теплопровідністю діелектрика, що забезпечує малий перепад у температурі по перетину виробу, наприклад для керамічних конденсаторів.

На рисунку 4.12 крива 1 являє собою залежність активної потужності  $P_a$ , що виділяється в ізоляторі за рахунок діелектричних втрат, від температури; форма кривої визначається температурною залежністю  $\operatorname{tg} \delta$ . Цю криву можна розглядати як залежність  $\operatorname{tg} \delta = f(t)$  у масштабі реактивної потужності ізолятора при даній напрузі  $U_1$  та частоті  $\omega$ .

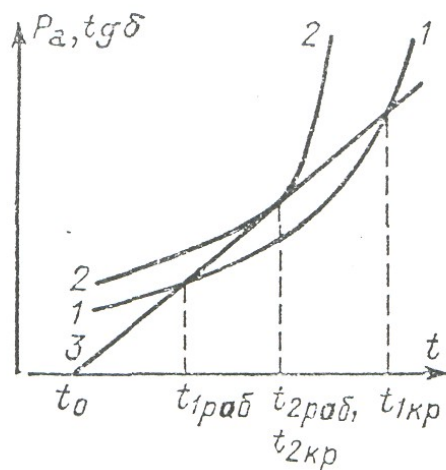


Рисунок 4.12 – Криві залежності  $P_a$  (1 та 2) від температури при різному напруженні, яке прикладене до ізолятора ( $U_2 < U_1$ ) та пряма тепловіддачі (3)

Це справедливо, якщо вважати, що діелектрична проникність матеріалу або, точніше, ємність ізолятора не змінюється з температурою, що можна прийняти для практичних розрахунків. Пряма 3 являє собою залежність тепловіддачі з поверхні ізолятора від температури. Тангенс кута нахилу цієї прямої дорівнює добутку поверхні ізолятора і коефіцієнта тепловіддачі. Пряма 3 перетинає вісь абсцис у точці, що відповідає температурі навколишнього середовища  $t_0$ .

У загальному випадку крива 1 має дві точки перетину з прямою 3: при так званій робочій температурі  $t_{\text{роб}}$  і температурі критичній  $t_{\text{кр}}$ . Діелектрик, який знаходиться при визначеній напрузі  $U_1$ , нагрівається за рахунок діелектричних втрат; остаточно стала температура його нагрівання повинна бути  $t_{\text{роб}}$ . Однак в умовах використання ізолятора можливе додаткове нагрівання його за рахунок стороннього випадкового джерела тепла, наприклад сонячних променів тощо. Якщо нагрівання за рахунок сторонніх джерел тепла зробить температуру ізолятора вище критичної  $t_{\text{кр}}$ , то, як бачимо з рисунка 4.12,  $\text{tg}\delta$  діелектрика настільки збільшиться, що потужність, яка виділяється, перевищить кількість тепла, що відводиться. Температура ізолятора почне зростати аж до повного руйнування його. Різниця температур  $t_{\text{кр}}$  і  $t_{\text{роб}}$  вказує на припустимий перегрів ізолятора відносно робочої температури за рахунок зовнішніх джерел тепла. Крива 2 являє собою залежність, що лежить на межі електричної міцності ізолятора при тепловому пробіі.

Теплова рівновага ізоляторів може бути знайдена в кожному окремому випадку з урахуванням зміни температури за товщиною. Для цього розраховують або експериментально визначають ємність ізолятора, після чого, з урахуванням температурної залежності  $\text{tg}\delta$ , графоаналітично розв'язують поставлену задачу.

**Електрохімічний пробій** ізоляційних матеріалів має особливо істотне значення при підвищених температурах і високій вологості повітря. Цей вид пробою спостерігається при постійній і змінній напругах низької частоти, коли в матеріалі розвиваються електролітичні процеси, що обумовлюють необоротне зменшення

опору ізоляції.

Таке явище часто називають також *старінням* діелектрика в електричному полі, оскільки воно приводить до поступового зниження електричної міцності, яке закінчується пробоем при напруженості поля, значно меншій, ніж пробивна напруженість, отримана при короткочасному випробуванні.

Електрохімічний пробій потребує для свого розвитку тривалого часу, тому що він пов'язаний з явищем електропровідності, яке приводить до повільного виділення в матеріалі малих кількостей хімічно активних речовин, або з утворенням напівпровідних сполук. У кераміці, що містить окисли металів змінної валентності (наприклад  $TiO_2$ ), електрохімічний пробій зустрічається значно частіше, ніж у кераміці, що складається з окислів алюмінію, кремнію, магнію, барію.

При електрохімічному пробі, що спостерігається при постійній напрузі і низьких частотах в умовах підвищених температур чи високій вологості повітря, велике значення має матеріал електрода. Срібло, здатне дифундувати в кераміку, полегшує електрохімічний пробій на противагу, наприклад, золоту.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Богородицкий Н.П. Электротехнические материалы. - Л.: Энергия, 1977. – 352 с.
- 2 Горелик С.С., Дашевский М.Я. Материаловедение полупроводников и металловедение. – М.: Металлургия, 1973. – 496 с.
- 3 Майофис И.М. Химия диэлектриков. – М.: Высш. шк., 1970. – 320 с.
- 4 Рахлин И.В. Научно-технический прогресс и эффективность новых материалов. – М.: Наука, 1973. – 349 с.
- 5 Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – М.: Энергия, 1974-1976. – Т. 1-3.
- 6 Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергия, 1973. – 326 с.





Потапенко Валентина Іванівна  
Шендрік Тетяна Георгіївна

## **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

**з дисципліни "ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ"**

**Частина 1.**

### **ДІЕЛЕКТРИКИ**

для студентів спеціальностей  
6.092200 "Електричні системи"  
6.092202 "Електричний транспорт"

Відповідальний за випуск Самойлов В.В.  
Редактор Радковська В.Є., Нікуль Л.Ю.  
Технічний редактор Григор'єва Л.В., Навальнева О.В.  
Підписано до друку  
Формат 60\*84/16 Бум. кн. журн.  
Тираж 50 прим. Замовлення № \_\_\_\_\_  
Друк – ксероксний

Донецький інститут залізничного транспорту  
83018, г. Донецьк, вул. Горна, 6