

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ:

Курс лекцій.

Частина 1. Діелектричні матеріали.

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами «Електричні станції», «Електричні системи і мережі», «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси», «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії», «Електричні машини й апарати», «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність», «Управління, захист та автоматизація енергосистем» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Електротехнічні матеріали: Курс лекцій. Частина 1. Діелектричні матеріали. [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів всіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка за освітніми програмами ««Електричні станції», «Електричні системи і мережі», «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси», «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії», «Електричні машини й апарати», «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність», «Управління, захист та автоматизація енергосистем» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.М. Кириленко, К.В. Кириленко, В.М. Головка. – Електронні текстові дані (1 файл 6,698 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 224 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 2 від 09.12.2021 р.) за поданням Вченої ради факультету електроенергетехніки та автоматики

(протокол № 4 від 22.11.2021 р.)

Електронне мережеве навчальне видання

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Курс лекцій.

Частина 1. Діелектричні матеріали.

Укладачі: *Кириленко Катерина Всеволодівна*, канд. техн. наук., доц.
Кириленко Всеволод Михайлович, канд. техн. наук, доц.
Головка Володимир Михайлович, д-р. техн. наук, проф.

Відповідальний редактор *Будько В.І.*, докт. техн. наук., доц.

Рецензент *Островерхов М.Я.*, докт. техн. наук., проф., зав. кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ З ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ	6
ЛЕКЦІЯ 1.	10
1.1 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОНЯТЬ	10
1.2 КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ	17
1.2.1 Класифікація ЕТМ за основною властивістю	18
1.2.2 Зв'язок між агрегатним станом і властивостями ЕТМ.....	19
1.2.3 Хімічний зв'язок і властивості електротехнічних матеріалів	20
1.3 Класифікація ЕТМ в рамках зонної теорії.....	24
ЛЕКЦІЯ 2.	28
2.1 ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ	28
2.1.1 Загальні вимоги до діелектриків.....	28
2.2. ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ	30
2.2.1 Фізична суть поляризації.....	30
2.2.2. Класифікація видів поляризації	33
2.2.3 Пружна поляризація.....	34
2.2.4 Релаксаційна поляризація.....	36
2.2.5 Специфічні види поляризації	39
2.2.6 Інерційні властивості поляризації	40
2.2.7 Вплив температури на поляризацію діелектриків	42
2.2.8 Формули для розрахунків діелектричної проникності	43
2.2.9 Практичне визначення відносної діелектричної проникності	44
2.2.10 Поляризація активних діелектриків	46
ЛЕКЦІЯ 3	52
3.1 ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ДІЕЛЕКТРИКІВ	52
3.1.1 Загальна характеристика процесу електропровідності	52
3.1.2 Електропровідність газоподібних діелектриків	55
3.1.3 Електропровідність рідких діелектриків	57
3.1.3 Електропровідність твердих діелектриків	61
3.1.4 Контактні явища на границі діелектрик–метал	63
3.1.5 Питомий поверхневий та питомий об'ємний опори діелектрика	64
3.1.6 Вплив зовнішніх факторів на електропровідність діелектриків	65
3.1.7 Визначення питомих опорів діелектриків і діагностування ізоляції.....	69
ЛЕКЦІЯ 4	71
4.1. ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ.....	71
4.1.1 Загальна характеристика діелектричних втрат	71
4.1.2 Температурна залежність діелектричних втрат	73
4.1.3 Частотна залежність діелектричних втрат.....	75
4.1.4 Залежність діелектричних втрат від напруженості поля	78
4.1.5 Використання $\text{tg } \delta$ для діагностування електричної ізоляції.....	78
4.2 ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ.....	79
4.2.1 Класифікація видів пробою.....	79
4.2.2 Умови, необхідні для пробою діелектрика.....	82

4.1.3. Елементарні процеси при пробі діелектриків	83
ЛЕКЦІЯ 5	89
5.1 ЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРОБІЙ ГАЗОВИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ	89
5.1.1 Елементарні процеси при пробі газів	89
5.1.2 Вольт-амперна характеристика і види розрядів в газах	92
3.1.3 Лавинний, стримерний і лідерний пробі газів	94
3.1.4 Залежність пробивної напруги від тиску і відстані	95
3.1.5 Пробі газу в неоднорідному полі.....	100
3.1.6 Статистичне запізнення пробою і імпульсна міцність діелектриків	102
3.1.7 Вплив частоти на пробивну напругу газів.....	105
3.2 ПОВЕРХНЕВИЙ ПРОБІЙ.....	106
3.3 ПРОБІЙ ВАКУУМУ	107
ЛЕКЦІЯ 6	110
6.1 ПРОБІЙ РІДКИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ	110
6.1.1 Загальна характеристика пробою рідких діелектриків	110
6.1.2 Пробивна напруга чистих рідких діелектриків.....	111
6.1.3 Пробі технічних рідинних діелектриків	115
6.2 ПРОБІЙ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ	116
6.2.1 Основні закономірності пробою твердих діелектриків.....	116
6.2.2 Електричний пробі твердих діелектриків.....	117
6.2.3 Тепловий пробі твердих діелектриків.....	118
6.2.4 Пробивна напруга твердих діелектриків	124
ЛЕКЦІЯ 7	126
7.1 ІОНІЗАЦІЙНИЙ ПРОБІЙ (ТРИНГ) ДІЕЛЕКТРИКІВ	126
7.1.1 Часткові розряди у високовольтній ізоляції.....	126
7.1.2 Часткові розряди в порожнинах діелектриків при постійній напрузі	128
7.1.3 Часткові розряди в діелектриках при змінній напрузі	131
7.1.4 Теорії руйнування і строк служби полімерних діелектриків при дії часткових розрядів	134
7.1.5 Реєстрація часткових розрядів	138
7.2 ІНШІ ВИДИ ПРОБОЮ ДІЕЛЕКТРИКІВ	139
ЛЕКЦІЯ 8	141
8.1 ТЕПЛОФІЗИЧНІ, МЕХАНІЧНІ І ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ	141
8.1.1 Теплофізичні характеристики діелектриків	141
8.1.2 Механічні властивості діелектриків.....	148
8.1.3 Хімічні властивості і зволоження діелектриків	152
ЛЕКЦІЯ 9	159
9.1 СТАРІННЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ	159
9.1.1 Теплове старіння	159
9.1.2 Старіння під дією механічного навантаження	164
9.1.3 Електрохімічне старіння ізоляції.....	166
9.1.4 Стійкість до дії радіації	168
9.1.5 Старіння діелектриків під впливом навколишнього середовища.....	169
ЛЕКЦІЯ 10	173

10.1 ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ.....	173
10.2 ГАЗОПОДІБНІ ДІЕЛЕКТРИКИ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ.....	175
10.3 РІДКІ ДІЕЛЕКТРИКИ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ	176
10.3.1 Нафтові електроізоляційні оливи	177
10.3.2 Мінеральні трансформаторна, кабельна та конденсаторна оливи.....	177
10.3.3 Синтетичні рідини, характеристики та застосування	181
10.4 ТВЕРДІ ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ.....	182
10.4.1 Органічні діелектричні матеріали	183
10.4.2 Електроізоляційні смоли	185
10.4.3 Електроізоляційні лаки і емалі.....	188
ЛЕКЦІЯ 11	193
11.1 ВИСОКОМОЛЕКУЛЯРНІ ОРГАНІЧНІ ДІЕЛЕКТРИКИ	193
11.1.1 Загальна характеристика	193
11.1.2 Неполярні полімеризаційні термопластичні синтетичні діелектрики....	195
11.1.3 Полярні полімеризаційні термопластичні синтетичні діелектрики.....	198
11.1.4 Поліконденсаційні органічні діелектрики.....	199
11.1.5 Пластмаси (пластикати).....	201
11.1.6 Еластомери.....	203
11.2 ВОЛОКНИСТІ ДІЕЛЕКТРИКИ	205
ЛЕКЦІЯ 12	209
12.1 МІНЕРАЛЬНІ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....	209
12.1.1 Види, характеристика та призначення слюди	209
12.1.2 Матеріали на основі слюди	210
12.1.3 Слюденіти та слюдопласти, їх застосування.....	211
12.2 СКЛО, КЛАСИФІКАЦІЯ ЗА ПРИЗНАЧЕННЯМ І ХІМІЧНИМ СКЛАДОМ.....	212
12.3 ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНІ КЕРАМІЧНІ МАТЕРІАЛИ.....	214
12.3.1 Характеристики керамічних діелектриків.....	215
12.3.2 Активні діелектрики.	219
ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	224

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ З ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

Дані лекції орієнтовані на студентів вищих навчальних закладів за спеціальністю 141 „Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” всіх форм навчання і містять інформацію з курсу „Електротехнічні матеріали”.

Сучасне електроенергетичне та електротехнічне устаткування, лінії електропередачі високої та низької напруги, електрофізичне і електротехнологічне обладнання, пристрої електроніки, радіотехніки, автоматики і телемеханіки не можуть бути якісно спроектованими і сконструйованими без використання електротехнічних матеріалів і не можуть ефективно вироблятися та експлуатуватися без знання властивостей і особливостей застосування цих матеріалів. Основні завдання сучасного електротехнічного матеріалознавства: розробляти нові і підвищувати ефективність використання існуючих електротехнічних матеріалів в електроенергетиці, електротехніці та електромеханіці, зокрема за рахунок підвищення питомої потужності електрообладнання, зменшити втрати електроенергії при її передачі в повітряних і кабельних лініях і при роботі електричних машин і пристроїв, забезпечити безаварійність і безпеку роботи при обслуговуванні електроустаткування.

Вивчення дисципліни "Електротехнічні матеріали" сприяє розумінню процесів, що відбуваються в електротехнічних матеріалах і допомагає визначити можливість використання матеріалів в електроенергетиці, електротехніці і електромеханіці та ефективність функціонування і експлуатаційну надійність електрообладнання. Засвоєння критеріїв вибору електротехнічних матеріалів в залежності від принципу роботи, конструкції і умов використання обладнання, формує фахівця, здатного виконувати роботу дослідника, конструктора, технолога та експлуатаційника електроенергетичного, електротехнічного, електромеханічного, електрофізичного та випробувального обладнання для виробництва, перетворення, транспортування, розподілу та використання електричної енергії, забезпечуючи в процесі проектування і виробництва високу якість цього обладнання, а в процесі експлуатації ефективно використання, кваліфіковане технічне обслуговування та надійність.

Дисципліна "Електротехнічні матеріали" є обов'язковою при підготовці бакалаврів для роботи в галузі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, а також в суміжних галузях.

В процесі вивчення курсу студент повинен:

- засвоїти класифікацію *електротехнічних* матеріалів за призначенням, властивостями і складом, а також за особливостями процесу їхнього виробництва;
- здобути знання про фізичні процеси, що відбуваються в електротехнічних матеріалах під впливом електромагнітних полів, встановити зв'язок властивостей електротехнічних матеріалів з хімічним складом, структурою та режимами технологічної обробки, вивчити залежність властивостей, характеристик і параметрів матеріалів від температури, характеристик напруги та напруженості поля, механічних напружень, тиску, вологості, дії радіації, хімічних та інших зовнішніх факторів;

- навчитися оцінювати за електрофізичними, магнітними, теплофізичними, механічними, хімічними та фізико-хімічними характеристиками придатність матеріалів для застосування в електроенергетиці, електротехніці, електромеханіці, електроніці, приладобудуванні, їхню взаємозамінність;
- ознайомитися з методами випробувань та вимірювань основних електричних, магнітних і фізико-механічних параметрів електротехнічних матеріалів;
- засвоїти критерії раціонального техніко-економічного вибору електротехнічних матеріалів при конструюванні і ремонтах електротехнічного та електроенергетичного обладнання;
- засвоїти критерії забезпечення ефективної експлуатації обладнання, в якому використовуються електротехнічні матеріали, з врахуванням дії на нього експлуатаційних та зовнішніх факторів.

При вивченні курсу "Електротехнічні матеріали", особливо на першому курсі, у зв'язку зі зниженням рівня викладання фізики в школі найскладнішими для засвоєння виявляються розділи, в яких описуються різноманітні теоретичні аспекти фізичних процесів, що відбуваються у матеріалах. Важливо розібратися у фізичній суті кожного явища, яке вивчається, не обмежуючись формальними відомостями про параметри матеріалів та їхню залежність від зовнішніх факторів. Це допоможе в процесі професійної діяльності ефективно експлуатувати електрообладнання, правильно оцінювати його технічний стан та приймати оптимальні рішення відносно продовження його експлуатації, виведення в ремонт чи списання.

Студенти повинні засвоїти класифікацію матеріалів (загальну та окрему для кожної групи), а також усвідомити фізику явищ, що спостерігаються в основних групах матеріалів при дії на них зовнішніх факторів (електричного та магнітного полів, температури, тиску, вологості, механічних напружень, хімічно агресивного середовища, радіоактивного випромінювання тощо). При вивченні конкретних типів матеріалів, необхідно з'ясувати, перш за все, якою мірою їхні властивості можуть бути пояснені раніше вивченими загальними закономірностями, а коли вимагають подальшого конкретного розгляду. Студенти мають навчитися пояснювати функціональні залежності того чи іншого параметра матеріалу від інтенсивності дії зовнішніх факторів, виходячи з фізичних уявлень про відповідні процеси.

Рекомендується в загальному випадку дотримуватися системного підходу. При вивченні як фізичних основ електроматеріалознавства, так і властивостей конкретних електротехнічних матеріалів потрібно навчитися враховувати дію експлуатаційних факторів на електротехнічні матеріали у складі виробів під час функціонування останніх, а також факторів зовнішнього середовища, набір яких залежить від умов експлуатації як виробів, так і матеріалів у них. Необхідно усвідомити, що властивості електротехнічних матеріалів, що використовуються, обов'язково повинні відповідати вимогам, які сформульовані у відповідних державних стандартах.

Потрібно на основі функціонального підходу до визначення класу матеріалів підібрати ряд прикладів застосування електротехнічних матеріалів для використання у відповідях при екзаменаційних та залікових іспитах.

Самостійна робота з літературою – основний вид роботи студента заочної форми навчання, але вона надзвичайно важлива і для студентів денної форми, бо формує здатність самостійно розв'язувати практичні задачі в процесі професійної діяльності. При вивченні текстів лекцій чи будь-якого підручника зі списку літератури необхідно скласти конспект, в якому слід зафіксувати закони й формули, що відображають ці закони, основні властивості електротехнічних матеріалів і фізичні параметри, що характеризують ці властивості, а також основні методи вимірювання цих параметрів.

Бажано, звичайно, вивчити складні формули, що описують процеси в електротехнічних матеріалах, структурні формули високомолекулярних сполук (полімерів), а також хімічний склад неорганічних діелектриків, але обов'язково потрібно знати природу та будову речовин (нейтральних, полярних та іонних), фізику явищ, термінологію, розрахункові формули, їх фізичний зміст, порядок значень діелектричної проникності, питомого опору, тангенса кута діелектричних втрат, електричної міцності, магнітної проникності та інших технічних параметрів електротехнічних матеріалів.

У процесі вивчення курсу студенти для придбання практичних навичок повинні виконати лабораторні роботи у передбаченому робочою програмою обсязі, а також домашню контрольну роботу для студентів стаціонару та контрольну роботу для заочників. Після оформлення звіту про лабораторні роботи проводиться співбесіда викладача зі студентами, основною метою якої повинна бути перевірка розуміння постановки і ходу процесу досліджень, а також закономірностей, отриманих в їх результаті.

Вивчення дисципліни "Електротехнічні матеріали" базується на отриманих раніше знаннях із загальноосвітніх і інженерних дисциплін, зокрема розділів "Будова атома", "Періодична система", "Типи хімічних зв'язків у речовині", "Загальна характеристика хімічних елементів", "Теорія корозії металів і полімерних матеріалів" з курсу "Хімія"; "Основи молекулярної фізики та термодинаміки", "Закони дифузії", "Теплопровідність і внутрішнє тертя", "Елементи фізики твердого тіла" з курсу "Фізика"; "Загальні поняття і закони теорії електромагнітного поля", "Частотні властивості електричних кіл і резонансні ефекти" з курсу "Теоретичні основи електротехніки" або "Загальна електротехніка". Якщо дисципліна вивчається раніше, ніж студенти познайомилися з відповідною інформацією при вивченні перерахованих дисциплін згідно навчального плану, що на жаль трапляється, то бажано самостійно познайомитися з нею або, у крайньому випадку, обмежитися короткими відомостями, наведеними в тексті лекцій.

При вивченні властивостей електротехнічних матеріалів необхідно, перш за все, свідомо намагатися подолати психологічний міждисциплінарний бар'єр, який часто заважає студентам використовувати знання із суміжних дисциплін. Крім того, дуже важливо усвідомити і дотримуватися на практиці положення, що знати навчальний матеріал – це добре, але знання без розуміння нічого не вартє. По-перше, в часи інформаційних технологій ходячі носії інформації нікому не потрібні, потрібні спеціалісти, які знають і розуміють, як втілити інформацію в реальні справи. По-друге, розуміння проблеми дозволяє вибрати в неосяжному морі інформації в інтернеті потрібну і, що не менш важливо, якісну інформацію. В той же час потрібно також

враховувати, що розуміння без певного багажу знань теж неможливе. Особливу увагу слід приділити засвоєнню фізичної суті основних термінів з електроматеріалознавства і їхніх визначень, без чого вивчення дисципліни в значній мірі позбавлено сенсу.

Необхідно враховувати, що вивченням дії різних факторів на речовину, в тім числі і електричних та магнітних полів, займаються також спеціалісти з електронної техніки. Але в центрі уваги радіоелектронного матеріалознавства знаходяться перш за все явища, що відбуваються в малому об'ємі матеріалу в слабких електричних, магнітних, механічних, теплових і оптичних полях в активних діелектриках (сегнето-, п'єзо- і піроелектрики) , напівпровідниках (*p-n* перехід, контактні явища, польові характеристики тощо) і магнітних матеріалах. В той же час в електротехніці основна увага приділяється поведінці матеріалів в сильних електричних і магнітних полях з врахуваннями одночасної дії на них інших факторів.

Оскільки дисципліна «Електротехнічні матеріали» базується в першу чергу на електрофізичних властивостях діелектриків, напівпровідників, провідників і на магнітних властивостях магнетиків, то основні положення фізики відповідних матеріалів, враховуючи що відповідні курси відсутні в навчальних планах спеціальності, широко застосовуються без детального обґрунтування при поясненні явищ, що відбуваються в електротехнічних матеріалах. За рахунок цього утворюється певний запас знань для вивчення таких дисциплін, як «Технічна діагностика електрообладнання», «Теорія надійності» та інших.

Електротехнічне матеріалознавство постійно розвивається, розробляються модифікації відомих матеріалів з кращими характеристиками, створюються нові матеріали з унікальними властивостями, а тому потрібно знати основні напрямки розвитку електротехнічного матеріалознавства та його потенціальні можливості, що відкриваються завдяки використанню сучасних матеріалів.

ЛЕКЦІЯ 1.

1.1 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОНЯТЬ

Враховуючи, що електротехнічні матеріали (ЕТМ) розглядаються зараз на першому курсі, тобто при їх вивченні можна використовувати тільки шкільні знання з хімії і фізики, які недостатні для вивчення дисципліни, розглянемо хоча б фрагментарно основні поняття з електрики, без яких не обійтись при розгляді електротехнічних матеріалів.

При вивченні дисципліни необхідно мати на увазі, що в природі існує чотири функціональні види взаємодій:

- слабка (визначає взаємодію між елементарними частинками та їхні взаємні перетворення);
- сильна (має місце в атомних ядрах);
- гравітаційна;
- електромагнітна.

В електротехніці ми маємо справу саме з електромагнітними силами.

Наведемо визначення основних понять, пов'язаних з електромагнітною взаємодією, таких як електромагнітне поле, різновидності і характеристики електричного поля, види електричного струму, а також магнітне поле і його характеристики. Ці визначення, як і всі інші, що використовуються в подальшому, наведені у відповідності до Державних стандартів України ДСТУ 2843-94, ДСТУ 2815-94, ДСТУ 2725-94 і інших (понад 30 ДСТУ присвячено термінам і визначенням в області електротехніки) та рекомендацій Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК).

Електромагнітне поле – це вид матерії, що визначається в усіх точках двома векторними величинами, які характеризують дві його сторони, звані "електричне поле" і "магнітне поле", і чинить силову дію на електрично заряджені частки, залежну від їх швидкості і електричного заряду.

Електричне поле – одна з двох сторін електромагнітного поля, що характеризується дією на електрично заряджену частку з силою, пропорційною заряду цієї частки і не залежною від її швидкості.

В залежності від умов електричне поле може виступати в одному з таких варіантів:

- **електростатичне поле** – електричне поле нерухомих заряджених тіл при відсутності в них електричних струмів;
- **стаціонарне електричне поле** – електричне поле електричних струмів, що не змінюються в часі, при умові нерухомості провідників зі струмами;
- **безвихрове електричне поле** – електричне поле, в якому ротор¹ напруженості електричного поля скрізь дорівнює нулю;

¹ Ротор – це векторна величина, що характеризує завихреність електромагнітного поля і відмінна від нуля тільки при наявності замкнених силових ліній поля. Вона пов'язує між собою основні характеристики електричного і магнітного полів згідно з рівняннями Максвелла $\text{rot } E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ і $\text{rot } B = j + \frac{\partial D}{\partial t}$, де E і B – напруженості електричного та магнітного полів, D – електрична індукція, j – густина струму провідності.

- **вихрове електричне поле** – електричне поле, в якому ротор напруженості електричного поля не скрізь дорівнює нулю;
- **індуковане електричне поле** – електричне поле, що породжується змінним в часі магнітним полем.

Таким чином, електричне поле можна розглядати, як простір, в кожній точці якого на заряджену частку діє сила. Ця сила визначається напруженістю електричного поля.

Напруженість електричного поля E – векторна величина, що дорівнює відношенню сили, діючої на заряджену частку, до її заряду і має напрям сили F , діючої на частку з позитивним зарядом q . (тобто – сила, яка діє на одиничний позитивний заряд): $E = F/q$.
Одиниця вимірювання – **В/м** (Вольт/метр)

З фізики відомо, що електричне поле можна характеризувати крім напруженості електричного поля електричною індукцією D .

Електрична індукція (електричне зміщення) D – скалярна величина, яка дорівнює нормальній складовій густини вільного поверхневого заряду на електродах σ_n .
Одиниця вимірювання – **Кл/м²** (Кулон/метр²)

В загальному випадку електрична індукція і напруженість електричного поля для конденсатора з плоским полем зв'язані лінійною залежністю

$$D_e = \epsilon_a e = \epsilon_0 \epsilon_r e = \sigma_n,$$

де ϵ_a – абсолютна діелектрична проникність, ϵ_0 – електрична стала (абсолютна діелектрична проникність вакууму), ϵ_r – відносна діелектрична проникність. В неоднорідному полі також можна перейти до відображення кожної точки поля в об'ємі, що розглядається, з допомогою d замість e , вважаючи, що e відповідає нормальній (тобто перпендикулярній до поверхні) складовій густини вільного поверхневого заряду на електродах, яка б давала таке ж значення напруженості електричного поля в даній точці у випадку однорідного поля.

Але, як правило, в електротехніці електричне поле завжди задається напруженістю поля.

Електричне поле, задане через напруженість, є **векторним**. Але його можна задати і як **скалярне** поле з допомогою **електричного потенціалу**.

Електричний потенціал ϕ – скалярна характеристика електричного поля в даній точці, що дорівнює *дорівнює відношенню потенційної енергії зарядженого тіла W до значення його заряду q* : $\phi = W / q$.

Одиниця вимірювання – **В** (Вольт)

На практиці, з врахуванням відсутності природного нуля енергії, як правило, визначають **різницю (електричних) потенціалів**, що дорівнює різниці електричних потенціалів даної і іншої, довільно вибраної точки. Прийнято, що при визначенні електричного потенціалу за таку, довільно вибрану точку вибирають нескінченність,

бо на нескінченності потенційна енергія зарядженого тіла дорівнює нулю. Таким чином, при визначення електричного потенціалу мова йде про перенесення з даної точки на нескінченність тіла з позитивним зарядом, тому що різниця потенціалів має різні знаки в залежності від напрямку руху.

Потенціал одновимірного електричного поля зв'язаний з його напруженістю співвідношенням $\varphi(x) = -\int_{\infty}^x E(x)dx$.

Електрична напруга (різниця потенціалів) U – це скалярна величина, рівна лінійному інтегралу напруженості електричного поля уздовж заданого шляху від точки 1 до точки 2.

Одиниця вимірювання – В (Вольт)

Визначається електрична напруга за формулою

$$U_{12} = \int_{r1}^{r2} \mathbf{E}d\mathbf{l} = \int_{-\infty}^{r2} \mathbf{E}d\mathbf{l} - \int_{-\infty}^{r1} \mathbf{E}d\mathbf{l} = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{W_2}{q} - \frac{W_1}{q},$$

де $d\mathbf{l}$ – нескінченно малий елемент шляху; $r1$ і $r2$ – радіуси-вектори точок 1 і 2

(рис. 1). (Механічний аналог: робота $A = \int_{r1}^{r2} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$)

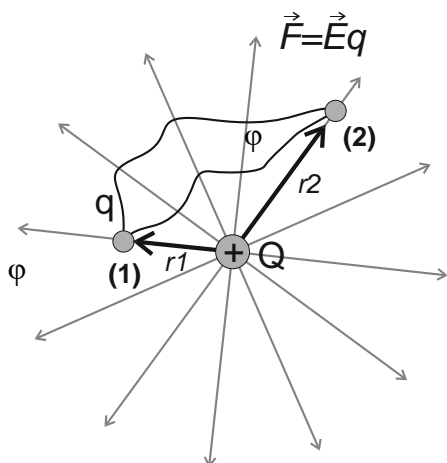


Рис.1.1. Визначення різниці електричних потенціалів

Таким чином, **електрична напруга – це робота по перенесенню одиничного позитивного заряду між точками 1 і 2.** Ця робота не залежить від шляху, яким рухався заряд, бо **електричне поле є потенційним**, тобто – полем, у якому робота по переміщенню заряду характеризується незалежністю від вибору шляху і визначається тільки початковою і кінцевою точками.

Електрорушійна сила ЕРС – скалярна величина, що характеризує здатність стороннього поля і індукованого електричного поля викликати електричний струм.

Одиниця вимірювання – В (Вольт)

Слід чітко розділяти поняття **напруги і електрорушійної сили**. При протіканні струму відбувається постійна нейтралізація зарядів протилежного знаку. Для того, щоб підтримувати сталі значення сили струму потрібно весь час знову розділяти заряди – до цього зводиться процес генерування електроенергії. Роботу по розділенню зарядів виконують в джерелі напруги (струму) сторонні сили не електростатичного

походження, зумовлені хімічними процесами (акумулятори, батарейки, паливні елементи), дифузією носіїв заряду в неоднорідному середовищі (електростатичні генератори, рп – переходи), змінними в часі магнітними полями (електричні турбо-, гідрогенератори). Вони заставляють позитивні заряди рухатися проти електростатичного поля всередині джерела напруги і таким чином підтримують їх неперервний рух (рис. 2,а). Повна робота в замкненому електричному колі дорівнює роботі саме сторонніх сил (рис. 2,б), а сума робіт електростатичного поля в середині джерела напруги і в зовнішньому колі дорівнює нулю внаслідок протилежного напрямку руху носіїв заряду в відповідно різних знаків роботи (робота – псевдоскаляр).

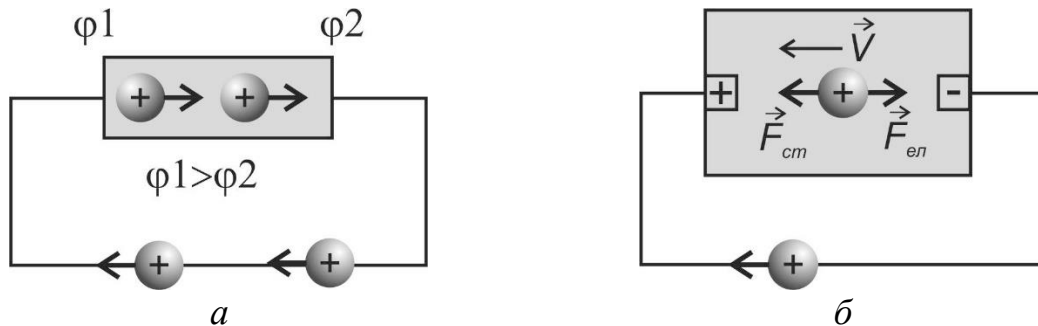


Рис. 1.2. Рух позитивних зарядів в джерелі напруги за рахунок сторонніх сил і в зовнішньому колі внаслідок дії електростатичних сил: *а* – при протіканні струму; *б* – напрям сторонніх і електростатичних сил і руху зарядів в джерелі напруги

При дії електричного поля на заряджені частинки в вакуумі або в речовині ці частинки можуть рухатись і створювати електричний струм.

Електричний струм – направлений рух заряджених частинок.

Сила струму – заряд, що проходить через даний переріз електричного кола в одиницю часу.

Середнє значення сили струму $I=Q/t$.

Миттєве значення сили струму, у відповідності з фізичним змістом похідної – $I=dQ/dt$.

Одиниця вимірювання – *А* (Ампер)

При цьому, в залежності від характеру зміщення цих частинок розрізняють:

Повний струм – скалярна величина, що рівна сумі електричного струму провідності, електричного струму зміщення і електричного струму перенесення крізь дану поверхню.

Електричний струм провідності – явище спрямованого руху вільних носіїв електричного заряду в речовині або в порожнечі, що кількісно характеризується скалярною величиною, рівною похідній за часом від електричного заряду, що переноситься вільними носіями заряду через дану поверхню.

Струм провідності визначається здатністю речовини проводити під дією електричного поля, що не змінюється в часі, електричний струм, і характеризується **питомою електричною провідністю**, або оберненою їй величиною **питомого електричного опору**.

Електричний струм зміщення – сукупність електричного струму зміщення в порожнечі і електричного струму поляризації, що кількісно характеризується скалярною величиною, рівною похідній за часом від потоку електричного зміщення через дану поверхню.

Електричний струм зміщення в вакуумі – явище зміни електричного поля в вакуумі, що кількісно характеризується скалярною величиною, рівною похідній за часом від потоку електричного зміщення в вакуумі через дану поверхню¹.

Електричний струм поляризації – явище руху зв'язаних заряджених частинок в діелектрику при зміні його поляризованості, що кількісно характеризується скалярною величиною, рівною похідній за часом від суми абсолютних значень електричних зарядів частинок, що перетинають дану поверхню при зміні поляризованості діелектрика.

Електричний струм перенесення – електричний струм, здійснюваний перенесенням електричних зарядів макроскопічними тілами, кількісно характеризується скалярною величиною, рівною похідній за часом від електричного заряду, що переноситься тілами через дану поверхню.

Електричний диполь – сукупність двох частинок, що знаходяться одна від одної на відстані, багато більшому розміру частинок і багато меншому відстані від частинок до точок спостереження, і що мають електричні заряди, рівні по абсолютному значенню, але протилежні за знаком.

Електричний момент електричного диполя – векторна величина, рівна добутку абсолютного значення одного із зарядів електричного диполя і відстані між частинками, що утворюють диполь, і спрямована від частинки з негативним зарядом до частинки з позитивним зарядом: $\vec{p} = q \times \vec{l}$. (рис.3).

Одиниця вимірювання – **Кл·м** (Кулон на метр)



Рис.1.3. Схематичне зображення диполя

Електрична поляризація – стан речовини, при якій електричний момент цієї речовини, що дорівнює векторній сумі електричних моментів всіх частинок, що входять до її складу, має значення відмінне від нуля. Встановлюється електрична поляризація внаслідок обмеженого зміщення зв'язаних зарядів в даному тілі або орієнтації його полярних молекул (диполів).

¹ Струм зміщення в діелектрику визначається зміщенням зв'язаних зарядів в електричному полі, але струм зміщення у вакуумі, введений в електродинаміку Максвелом, не супроводжується зміщенням чого-небудь, а зумовлений електростатичною взаємодією зарядів на електродах. Можна припустити, враховуючи, що втрати енергії в ідеальному конденсаторі дорівнюють нулю, що в даному випадку мова йде про зміщення зарядів вздовж електродів, перпендикулярно напруженості електричного поля при заряді конденсатора.

Електричний момент тіла (об'єму речовини) – векторна величина, рівна геометричній сумі електричних моментів усіх електричних диполів, що входять до складу цього тіла (об'єму речовини):

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^n \vec{P}_i .$$

Одиниця вимірювання – Кл·м (Кулон на метр)

Електрична поляризованість – векторна величина, що характеризує міру електричної поляризації речовини, рівна границі відношення електричного моменту, пов'язаного з елементом об'єму речовини, до об'єму цього елемента, коли об'єм і усі

розміри цього елемента об'єму прямують до нуля: $\vec{P} = \frac{d\vec{p}}{dV}$.

Одиниця вимірювання – Кл/м² (Кулон/метр²)

Магнітне поле – одна з двох сторін електромагнітного поля, що характеризується дією на електрично заряджену частинку, що рухається, з силою Лоренца, пропорційною заряду цієї частинки і її швидкості. Магнітна сила Лоренца $F = q[vH]$ ¹, з якою магнітне поле діє на рухому частинку, направлена під прямим кутом до напрямку руху частинки (напрям векторного добутку векторів швидкості і напруженості магнітного поля) і не може змінювати її енергію.

Розрізняють:

- **магнітостатичне поле** – магнітне поле нерухомих намагнічених тіл;
- **стаціонарне магнітне поле** – магнітне поле електричних струмів, що не змінюються в часі, при умові нерухомоті провідників зі струмами;
- **індуковане магнітне поле** – магнітне поле, що наводиться змінним в часі електричним полем.

Магнітний диполь – будь-який елементарний об'єм, що створює на великих у порівнянні з його розмірами відстанях магнітне поле, ідентичне магнітному полю елементарного контуру з електричним струмом.

Магнітний момент магнітного диполя – векторна величина для магнітного диполя, що асоціюється з елементарним контуром електричного струму і дорівнює добутку цього струму на поверхню, що охоплюється контуром струму, причому напрям магнітного моменту нормальний (перпендикулярний) площині контуру и зв'язаний з напрямком струму в контурі правилом правоходового гвинта.

Одиниця вимірювання – А·м² (Ампер на метр²)

Намагнічення – створення в речовині намагніченості.

Магнітний момент тіла – векторна величина, що дорівнює геометричній сумі магнітних моментів всіх магнітних диполів в даному тілі.

Одиниця вимірювання – А·м² (Ампер на метр²)

¹ Векторний добуток $[vH] = \vec{i}(v_y H_z - v_z H_y) + \vec{j}(v_x H_z - v_z H_x) + \vec{k}(v_x H_y - v_y H_x)$, де \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} – орти (одичинні вектори), направлені по осях OX, OY і OZ, а нижній індекс біля змінної означає проекцію змінної на відповідну вісь.

Намагніченість – векторна величина, що характеризує магнітний стан речовини, рівна границі відношення магнітного моменту, пов'язаного з елементом об'єму речовини, до об'єму цього елемента, коли об'єм і усі розміри цього елемента прямують до нуля: $\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dV}$, $\vec{m} = \sum_{i=1}^n \vec{m}_i$, де \vec{m} і \vec{m}_i – магнітні моменти об'єму і частинок, що входять до нього.
Одиниця вимірювання – A/m^2 (Ампер/метр²)

Магніторушійна сила (вдовж контуру) – скалярна величина, що дорівнює лінійному інтегралу напруженості магнітного поля уздовж контуру, що розглядається, і рівна повному струму, що охоплюється цим контуром.
Одиниця вимірювання – A (Ампер)

Скалярний магнітний потенціал – різниця скалярних магнітних потенціалів даної точки і іншої, довільно вибраної.
Одиниця вимірювання – A (Ампер)

Електромагнітна індукція – явище виникнення електрорушійної сили в контурі при зміні магнітного потоку, що зчіплюється з ним.

Магнітна індукція – векторна величина, що характеризує магнітне поле і визначає силу, що діє на рухому частинку зі сторони магнітного поля.
Одиниця вимірювання – $Tл$ (Тесла)

Магнітна індукція чисельно дорівнює відношенню сили, що діє на заряджену частинку, до добутку заряду і швидкості частинки, якщо напрям швидкості такий, що ця сила максимальна, і має напрям перпендикулярний до векторів сили і швидкості, який співпадає з поступальним рухом правого гвинта при його обертанні від напрямку сили до напрямку швидкості частинки з позитивним зарядом.

Напруженість магнітного поля – векторна величина, що дорівнює геометричній (векторній) різниці магнітної індукції, поділеної на магнітну сталу, і намагніченості.
Одиниця вимірювання – A/m (Ампер/метр)

Векторний магнітний потенціал – векторна величина, ротор якої дорівнює магнітній індукції.

Різниця скалярних магнітних потенціалів (магніторушійна сила) – скалярна величина, що дорівнює лінійному інтегралу напруженості магнітного поля між двома точками вдовж вибраної ділянки шляху, що проходить в області, де густина електричного струму дорівнює нулю.
Одиниця вимірювання – A (Ампер, раніше МРС вимірювалася в A -виток)

Крім визначень, пов'язаних з електромагнітним полем, наведемо ще одну характеристику руху частинок – розподіл їх енергій за значенням.

Розподіл Больцмана використовується в тих випадках, коли мова йде про термоактивовані процеси, тобто процеси, що відбуваються внаслідок поглинання теплової енергії і переході в стан з більшою енергією або про подолання енергетичних бар'єрів, що відділяють рівноважні положення частинок в речовині. Як відомо з кінетичної теорії газів, частинки газу завжди знаходяться в хаотичному русі, обмінюючись при зіткненнях імпульсом і енергією. Внаслідок цього, при даній температурі газу, яка є мірою середньої кінетичної енергії його частинок, частинки газу можуть мати різну індивідуальну енергію. У класичній фізиці кількість частинок, що *мають енергію ε в газі з рівноважною температурою T* , визначається за формулою **Больцмана**:

$$n(\varepsilon) = n_0 \exp(-\varepsilon/kT).$$

В квантовій фізиці з врахуванням квантових ефектів розподіл частинок за енергіями змінює вигляд і для ферміонів, частинок з напівцілим спіном (власним механічним моментом), наприклад електронів, спін яких дорівнює $\hbar/2$, використовують **розподіл Фермі-Дірака**

$$n(\varepsilon) = n_0 / (1 - \exp(-(\varepsilon - \mu)/kT)),$$

а для бозонів, квантових частинок з цілим спіном (як правило це квазічастинки, які відповідають гармонікам при розкладанні реального процесу в часі в ряд, таким як фотони, фонони і т.п.) – **розподіл Бозе-Енштейна**

$$n(\varepsilon) = n_0 / (1 + \exp(-(\varepsilon - \mu)/kT)),$$

де μ – рівень хімічного потенціалу, тобто енергетичний рівень, ймовірність заповнення якого дорівнює 0,5.

1.2 КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

В процесі вивчення курсу досить часто доведеться мати справу з різноманітними класифікаціями, тобто розподілом тих чи інших об'єктів на класи, групи в залежності від спільних ознак. Одна і та ж сукупність об'єктів може бути поділена на різні класи в залежності від критерію класифікації. Таким чином, мова про будь-яку класифікацію повинна починатися з критерію класифікації. Для електротехнічних матеріалів критерієм класифікації є особливі (основні) властивості: до *електротехнічних матеріалів відносять речовини, що мають особливі властивості щодо електричного, магнітного та електромагнітного полів і використовуються з врахуванням цих властивостей.*

1.2.1 Класифікація ЕТМ за основною властивістю

Електротехнічні матеріали ділять на чотири класи за основною властивістю:

<u>Діелектрик</u> –	це електротехнічний матеріал, основною властивістю якого є	здатність поляризуватися в електричному полі ¹
<u>Напівпровідник</u> –		сильна залежність електропровідності від зовнішніх факторів.
<u>Провідник</u> –		здатність проводити електричний струм.
<u>Магнетик</u> –		здатність намагнічуватися.

Наведена класифікація тісно пов'язана з застосуванням електротехнічних матеріалів в електроенергетиці, електротехніці, електромеханіці, електронній техніці та приладобудуванні.

Слід звернути увагу на *відносний характер класифікації* матеріалів за основною властивістю, яка *справедлива тільки для нормальних умов*. А тому додатковою ознакою для загальної класифікації електротехнічних матеріалів є їхнє *призначення*, згідно з властивостями, завдяки яким вони використовуються для конкретної мети. Цей критерій широко використовується також при розгляді окремих класів електротехнічних матеріалів.

Всі діелектрики внаслідок поляризації збільшують ємність електротехнічних пристроїв, а тому їх можна використовувати як конденсаторні матеріали. Мала питома електрична провідність, дозволяє застосовувати їх також як електроізоляційні матеріали.

Нелінійні діелектрики, електрофізичні характеристики яких залежать від параметрів зовнішнього електричного поля та інших діючих факторів, застосовуються як активні діелектричні матеріали для перетворення механічної та теплової енергії в електричну та навпаки і керування електричними сигналами в електрофізиці та в електронній техніці.

Провідники мають значну питому електропровідність і використовуються в електротехнічних пристроях як струмопровідні провідники електричного струму (обмотки електричних машин і апаратів, контактні вузли, струмопровідні елементи приладів, жили проводів, кабелів і т.п.), або потенціальні елементи електротехнічних конструкцій і виробів (електростатичні екрани, обкладинки конденсаторів тощо).

¹ Для визначення діелектрика в ДСТУ 2843-94 "Електротехніка. Основні поняття. Терміни і визначення" використовується низька електропровідність діелектрика: "Діелектрик – речовина, що погано проводить електричний струм і питомий опір якої становить $10^8 - 10^{17}$ Ом·м", але таке визначення вимагає уточнення "при нормальних умовах" і знаходиться в протиріччі з визначенням, що дається Міжнародною Електротехнічною Комісією (МЕК), а також наводиться, наприклад, у ДСТУ 2815-94 "Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни і визначення".

Напівпровідники за питомою електропровідністю займають проміжне місце між провідниками та діелектриками. Враховуючи основну властивість напівпровідників – сильно змінювати електропровідність під дією зовнішніх факторів – їх використовують для виготовлення активних елементів електронної техніки (напівпровідникові діоди, транзистори, тиристори, інтегральні схеми тощо, в яких використовуються нелінійні (залежні від напруженості електричного поля) властивості напівпровідників, для обмеження перенапруг і перетворення сонячної і теплової енергії в електричну в електроенергетиці, а також датчиків для перетворення неелектричних величин в електричні в приладобудуванні та автоматичі.

Магнетики відрізняються властивістю підсилювати або послаблювати магнітне поле, в якому їх розміщують, в залежності від природи магнітного моменту речовини. Найширше використання в електротехніці знайшли феромагнетики, а в електронній техніці також ферити. Ці матеріали мають велику і нелінійну відносну магнітну проникність і використовуються в магнітних колах (магнітні осердя, магнітопроводи, магнітні підсилювачі), а також, враховуючи наявність залишкової індукції, для виготовлення постійних магнітів.

Крім особливих властивостей в електричних, магнітних та електромагнітних полях, враховуючи сферу застосування і умови роботи електрообладнання, електротехнічні матеріали повинні в загальному випадку задовольняти таким вимогам:

1. Мати добру технологічність, тобто порівняно легко та швидко обробляться, допускати масове виготовлення деталей.
2. Нормально працювати в широкому діапазоні температур, який визначається режимом роботи електрообладнання.
3. Мати достатню механічну міцність (при розтяганні, стисканні, удари і інших видах механічного навантаження).
4. Мати стабільні експлуатаційні характеристики в часі при комплексній дії експлуатаційних та зовнішніх факторів.
5. Мати достатню стійкість до дії навколишнього середовища, вологостійкість, хімічну стійкість та стійкість до радіації.

1.2.2 Зв'язок між агрегатним станом і властивостями ЕТМ

Агрегатний стан і віднесення речовини до одного з класів електротехнічних матеріалів досить жорстко регламентовані, за виключенням твердого стану.

Якщо речовина відноситься до **газоподібного** стану, то вона, як правило, **діелектрик**. Інколи серед них виділяють такі, що мають властивості **магнетиків**.

Речовина, що відноситься до **рідкого** стану, якщо вона є **чистою рідиною**, теж є **діелектриком**, дуже рідко напівпровідником. Але якщо це **розплав металів, чи розчин солей, лугів, кислот**, то це переважно **провідник**.

Плазма є **провідником** із специфічним амбіполярним (рухом в одному напрямку електронів і позитивних іонів в електричному полі) характером провідності.

Тверда речовина може відноситися до **одного з чотирьох класів електротехнічних матеріалів** в залежності від **типу хімічного зв'язку**.

1.2.3 Хімічний зв'язок і властивості електротехнічних матеріалів

Хімічний зв'язок в речовині тісно пов'язаний з властивостями електротехнічних матеріалів.

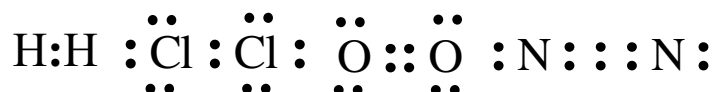
Хімічний зв'язок у молекулах поділяється на:

- ковалентний (неполярний або полярний) – утворюється за рахунок спільних електронних пар (рис. 1.4);
- іонний (утворюється за рахунок кулонівської взаємодії між різноіменними іонами) (рис. 1.5, 1.6);
- металевий (одна електронна орбіталь об'єднує всі атоми) (рис. 1.7);
- водневий (здійснюється за рахунок іонів водню).



Рис.1.4. Молекули з ковалентним зв'язком: а – неполярним; б – полярним

При ковалентному неполярному зв'язку молекули утворюються при рівному вкладі електронів від *однакових* реагуючих атомів в електронні зв'язувальні пари, які утворюють молекулярні орбіталі. Наприклад, молекули азоту, кисню, хлору мають таку електронну конфігурацію:



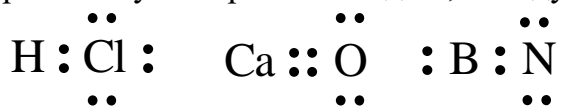
Між атомами нарисовані спільні пари електронів (чорні кружечки), які зумовлюють зв'язок. Кожен атом водню і хлору віддає по одному електрону на зв'язок, кисню – по два, азоту – по три електрони. Найміцнішою є молекула азоту з потрійним міжмолекулярним зв'язком, найслабшими – молекули водню і хлору з одиничним зв'язком.

Для газового стану з неполярним ковалентним зв'язком або при конденсації однакових атомів мають місце ковалентні речовини з нульовим електричним моментом при відсутності поля, характерні для *діелектриків* або у випадку твердих речовин – *простих напівпровідників*.

Ковалентний полярний зв'язок утворюють електропозитивні і електронегативні атоми. У цьому випадку електропозитивний елемент частково оголяється і отримує позитивний заряд, в той час як електронегативний – перетягає на себе електронну хмару і приймає негативний заряд. Внаслідок такої несиметричної взаємодії молекула отримує *електричний дипольний момент*, що дорівнює

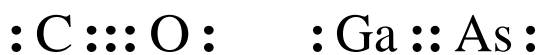
$$p = ql,$$

де \bar{l} – відстань від центру позитивних до центру негативних зарядів, q – заряд, що може бути дробовим по відношенню до заряду електрона, в залежності від того, на яку частину електрон проводить більше часу біля електронегативних атомів. Як приклад, наведена структура молекул хлористого водню, оксиду кальцію, нітриду бора:



Газоподібні і конденсовані речовини, що складаються з полярних молекул, тобто є електричними диполями з електричним моментом, що не дорівнює нулю, будуть відноситися до **діелектриків**. Ковалентний полярний зв'язок може мати місце також у **напівпровідниках і магнетиках**.

Донорно-акцепторний зв'язок має багато спільного з полярним ковалентним зв'язком, але відрізняється від нього тим, що утворення спільних пар електронів відбувається не на рівноправній основі, а електронегативний елемент віддає на створення спільних пар більше електронів, ніж електропозитивний, внаслідок чого збідаються електронами і набуває позитивного заряду. Таким чином, утворюється зворотний диполь з **електронегативним зарядом на електропозитивному елементі**, напрям і заряд, якого відрізняються від значень, характерних для полярного ковалентного зв'язку. При цьому не працюють і звичайні уявлення про валентність, що характерно, перш за все, для **напівпровідників типу A^nB^m** , де $n + m = 8$, а також **діелектриків та металоподібних сполук перехідних металів**, в яких елементи виступають формально, як чотиривалентні, утворюючи сполуки з однаковою кількістю електронегативних і електропозитивних атомів. Наведемо приклади донорно-акцепторних зв'язків для молекул оксиду вуглецю та арсеніду галію, що ілюструють сказане:



Іонний зв'язок є однією з граничних меж полярного ковалентного зв'язку, коли електрон від електропозитивного атома повністю переходить до електронегативного і утворюються два іони. Іонні молекули полярні, але на відміну від полярних діелектриків дипольний момент іонної молекули пропорційний повному заряду електрона. *Ці іони можуть бути незалежними, а можуть за рахунок кулонівської взаємодії утворювати іонні молекули*, що при конденсації приводять до утворення **іонних діелектриків**. Зверніть увагу на співвідношення розмірів атомів і іонів металів і неметалів (рис. 5). Класичний приклад іонних діелектриків – кухонна сіль. Атоми металів мають більші розміри, ніж неметалів, а іони навпаки, бо при утворенні позитивного іона розмір його стає в півтора - два рази менший розміру атома, а при утворенні негативного – іон має розмір,

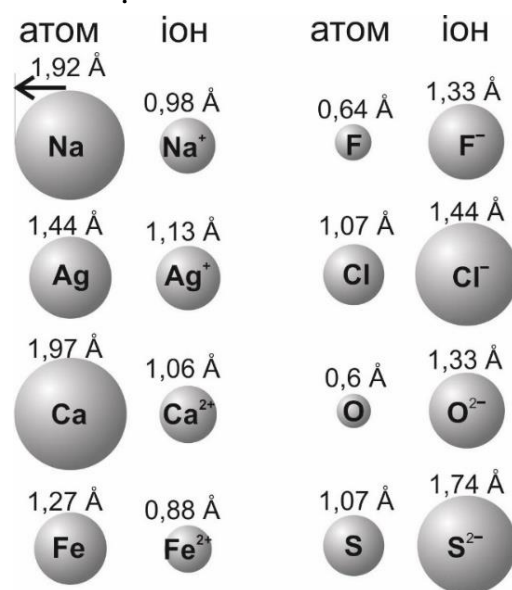


Рис. 1.5. Зміна розмірів електронегативних та електропозитивних атомів при утворенні іонів.

що більший за розмір атома.

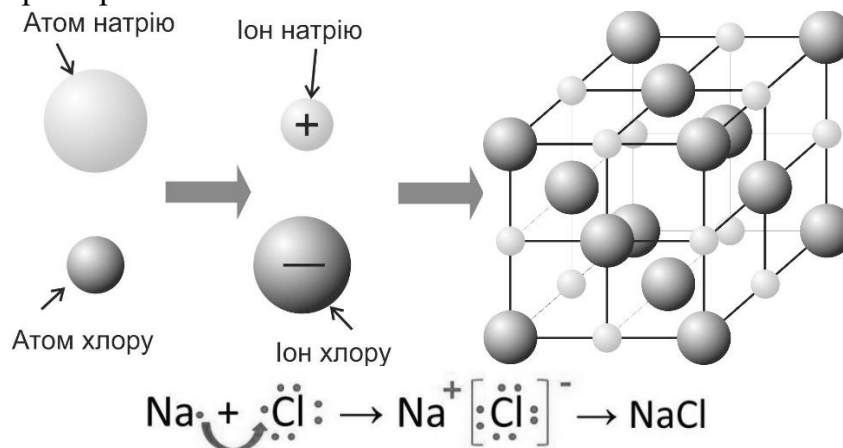


Рис. 1.6. Схематичне зображення утворення іонного зв'язку

До речовин з іонною структурою відносяться також оксидні напівпровідники та магнетики.

Металевий зв'язок характерний для металів. Його особливістю є те, що його можна розглядати як другу крайню межу ковалентного зв'язку – багатоцентровий

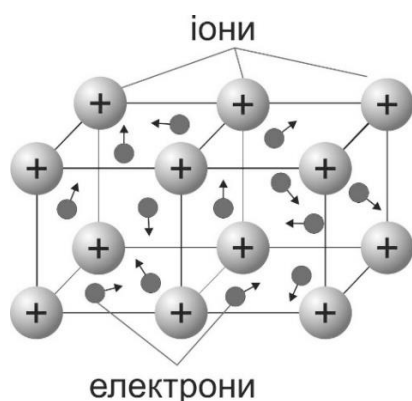


Рис. 1.7. Схематичне зображення металевого зв'язку

ковалентний зв'язок, що з'єднує однією молекулярною орбіталлю всі атоми, які належать до даного об'єму. В сучасній теорії металів ця суперорбіталь називається поверхнею Фермі. Саме завдяки цій суперорбіталі електрони в металах почувають себе вільними і мають можливість рухатися по всьому об'єму речовини поверхнею Фермі.

Металевий зв'язок можна описувати класичною моделлю Друде-Лоренца, в якій речовина розглядається як кристалічна ґратка з позитивних іонів, відштовхування яких компенсується вільними електронами, що знаходяться в металі у вигляді своєрідного газу. Ця модель задовільно працює в інженерних розрахунках, і саме її ми будемо використовувати при розгляді провідників. Металевий характер зв'язку має місце у провідниках та магнетиках.

Водневий зв'язок ґрунтується на тому, що іон водню є елементарною частиною – протоном, що має розміри в 10^5 раз менші, ніж будь-який інший іон, а тому може виконувати, подібно до електрона, функції зв'язку між молекулами в органічних речовинах. Через більші розміри протона він значно інертніший, ніж електрон, а тому водневий зв'язок значно слабкіший за електронний, і має місце, в основному, в органічних діелектриках.

При утворенні конденсованої речовини може мати також молекулярний зв'язок. Молекулярний зв'язок має місце при утворенні речовин з молекул, що не втратили своєї індивідуальності. Міжмолекулярна взаємодія може носити орієнтаційний (дві полярні молекули, розташовані лінійно чи паралельно), поляризаційний (поля-

рна і неполярна молекули) та дисперсійний (дві неполярні молекули, що взаємодіють як миттєві диполі) характер. На відміну від електронної взаємодії, коли сила взаємодії обернено пропорційна квадрату відстані між частинками, міжмолекулярна взаємодія відноситься до слабких і її сила обернено пропорційна шостій степені відстані між молекулами. Молекулярні кристали відносяться, як правило, до діелектриків.

Наявність періодичної структури у вигляді одного з 230 кристалічних класів, що відносяться до однієї з 7 кристалічних сингоній, чи її відсутність (аморфний стан речовини) на властивості, а відповідно і на класифікацію електротехнічних матеріалів (рис. 2), впливає незначною мірою, а тому далі цей фактор детально не буде розглядатися. Кристалічна структура речовини важлива для активних діелектриків і напівпровідників, що відносяться до матеріалів електронної техніки, і про які буде коротко сказано у відповідних розділах.

Якщо підвести підсумки, то між агрегатним станом, будовою і належністю речовин до того чи іншого класу електротехнічних матеріалів, має місце така відповідність (рис 1.8).

1. Агрегатний стан речовини:

- газоподібний – діелектрики, магнетики¹;
- плазма – провідник;
- рідкий: чисті рідини – діелектрики, напівпровідники⁵, розчини лугів, кислот і солей та їхні розплави – провідники;
- твердий – всі класи електротехнічних матеріалів.

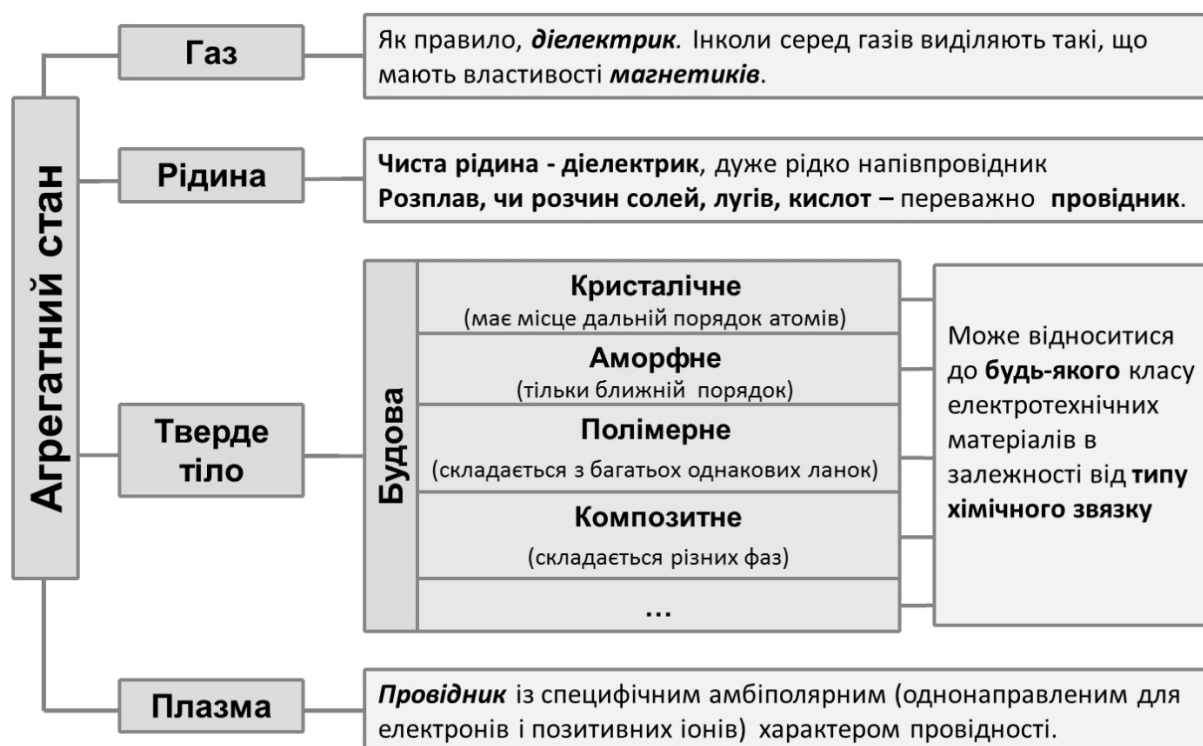


Рис.1.8. Класифікація електротехнічних матеріалів за агрегатним станом.

2. Будова і характер хімічного зв'язку в твердому тілі (табл. 1.1).

¹ До даного типу відноситься незначна кількість речовин

Таблиця 1.1. Вплив будови і типу хімічного зв'язку на властивості ЕТМ

Будова	Хімічний зв'язок	Клас ЕТМ
<i>іонна</i>	іонний	діелектрики, магнетики, оксидні і складні напівпровідники
<i>атомна</i>	ковалентний неполярний та полярний	діелектрики, прості напівпровідники, рідко провідники
	донорно-акцепторний	напівпровідникові хімічні сполуки типу A^nB^m , діелектрики ($n+m=8$)
<i>металева</i>	металевий	провідники, магнетики
<i>молекулярна</i>	водневий	Діелектрики
	молекулярний	Діелектрики

Наявність періодичної структури у вигляді одного з 230 кристалічних класів, що відносяться до однієї з 7 кристалічних сингоній, чи її відсутність (**аморфний** стан речовини) на властивості, а відповідно і на класифікацію **електротехнічних матеріалів**, впливає незначною мірою, а тому далі цей фактор детально не буде розглядатися. Кристалічна структура речовини важлива для активних діелектриків і напівпровідників, що відносяться до **матеріалів електронної техніки**, і про які буде коротко сказано у відповідних розділах.

1.3 Класифікація ЕТМ в рамках зонної теорії

Для класифікації електротехнічних матеріалів, особливо напівпровідників, і аналізу їх електрофізичних властивостей часто використовують **квантово-механічну зонну теорію електронної енергетичної структури речовини** або коротко – **зонну теорію твердого тіла**. Розглянемо досить спрощено витоки і основні положення цієї теорії.

При формулюванні зонної теорії використані фундаментальні **квантово-механічні уявлення про будову речовини**:

1. В загальному випадку **квантово-механічний стан** електрона характеризується **чотирма квантовими числами**:

- **головним** $n = 1 \dots \infty$, що визначає енергію електрона в атомі;
- **орбітальним** $l = 0 \dots (n-1)$, яке пропорційне моменту кількості руху;
- **магнітним** $m_l = 0 \dots \pm l$, пропорційним проекції моменту кількості руху на довільний просторовий напрям;
- **спіновим** $m_s = \pm 1/2$, що визначає чисто квантову величину спіну – власний момент кількості руху, а в зв'язку з рухом заряду зумовлює й власний магнітний момент електрона.

2. Згідно з **першим постулатом Н. Бора** до **стаціонарних енергетичних рівнів електронів в атомах** відносяться ті, для яких момент кількості руху електрона дорівнює цілому числу сталих Планка

$$mv_n r_n = n\hbar,$$

де m – маса електрона, r_n , v_n – радіус і швидкість руху електрона на енергетичному рівні з номером n , \hbar – стала Планка.

3. **Принцип тотожності** встановлює абсолютну тотожність і неможливість відрізнити з допомогою не тільки реальних, але і уявних експериментів дві однакові мікрочастинки, що знаходяться в одному квантовому стані в даній системі.

4. **Принцип Паулі (принцип заборони)** випливає з принципу тотожності і зумовлений непарністю хвильової функції. Згідно з ним, в атомі на будь-якій атомній орбіталі може знаходитися не більше двох електронів з різними спіновими числами (протилежним напрямком моментів кількості руху).

5. **Принцип мінімуму енергії** визначає порядок заселення атомних орбіталей, що мають різні енергії. Згідно з принципом мінімуму енергії, електрони в основному стані займають підрівні, що мають найменшу енергію, тобто в такому порядку: $1s$; $2s$; $2p$; $3s$; $3p$; $4s$; $3d$; $4p$; $5s$; $4d$; $5p$; $6s$; $4f \approx 5d$; $6p$; $5f \approx 6d$...

6. **Правило Хунда** визначає, що заповнення орбіталей, що відносяться до одного і того ж енергетичного підрівня відбувається так, щоб **сумарний спін усіх електронів в атомі був максимальним**, а тому починається поодинокими електронами з паралельними (однаковими по знаку) спінами, і лише після того, як поодинокі електрони займуть усі орбіталі даного підрівня, почнеться заповнення орбіталей електронами з протилежними спінами. Саме елементи з найбільшою кількістю неспарених електронів, що відносяться до перехідних, мають найбільш виражені магнітні властивості, пов'язані з індивідуальними магнітними моментами неспарених електронів.

Якщо взяти до уваги принцип тотожності і принцип Паулі, то **при утворенні молекул і конденсації речовини виникає проблема в заповненні електронами енергетичних підрівнів**. Згідно з принципом тотожності всі атоми даного хімічного елемента мають однакові енергетичні рівні, в тім числі і заповнені, а тому при утворенні двохатомної молекули на кожному з заповнених підрівнів потенційно буде знаходитися по чотири електрони, що не відповідає принципу Паулі. Це протиріччя знімається тим, що **у результаті міжатомної (міжйонної, міжмолекулярної) взаємодії відбувається розщеплення атомних електронних енергетичних рівнів** на близько розташовані підрівні, внаслідок чого замість синглетних (одиничних) підрівнів при об'єднанні двох атомів утворюються дублетні (подвійні) підрівні, трьох – триплетні (потрійні) і т.д., а при конденсації речовини – мультиплетні, що складаються з підрівнів з кратністю $\approx 10^{21} - 10^{22}$ для 1 г речовини (рис 3), і **замість одиничного рівня в речовині утворюється практично неперервна енергетична зона** з відстанню між рівнями енергії $10^{-19} - 10^{-22}$ еВ.

При розгляді електрофізичних характеристик ЕТМ і їх класифікації використовуються три зони (рис.1.9.):

- валентна зона;
- заборонена зона;
- зона провідності.

Найнижча з них, **валентна зона**, утворюється з рівня, що відповідає валентному (найбільш віддаленому від ядра) електрону (електронам).

Якщо на валентному рівні знаходиться непарна кількість електронів, то **валентна зона заповнена не повністю**, що забезпечує наявність в валентній зоні вільних енергетичних рівнів, на які можуть переходити електрони при мінімальних енергетичних витратах. Така речовина характеризується високою електронною провідністю і відноситься до провідників.

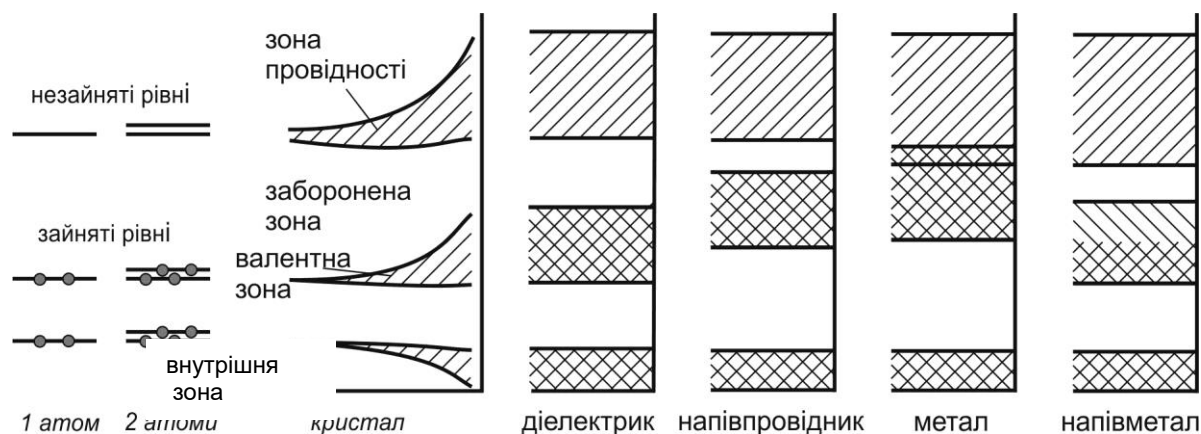


Рис. 1.9. Утворення енергетичних зон. Зліва направо: розщеплення рівнів при зближенні атомів і утворенні енергетичних зон в речовині, діелектрик, напівпровідник, метал, напівметал

Електронна провідність по заповненій валентній зоні відсутня, бо у заповненій валентній зоні електрони локалізовані згідно принципу Паулі внаслідок відсутності вільних енергетичних рівнів, на які вони могли б переходити внаслідок збільшення енергії при прискоренні в електричному полі.

Зона, утворена з першого незаповненого енергетичного рівня в атомі, називається **зоною провідності**. Ця назва пов'язана з тим, що **в зоні провідності всі енергетичні рівні вільні**, внаслідок чого електрони при попаданні у зону провідності отримують можливість для переходів на вищі енергетичні рівні при набуванні енергії від поля і можуть вільно переміщуватися на відміну від електронів заповненої валентної зони, забезпечуючи **електронну провідність по зоні провідності**.

Звідси ясно, що якщо **валентна зона перекривається із зоною провідності**, то речовина є **добрим електронним провідником**, що характерно для металів, а також деяких карбідів і нітридів перехідних металів, що також відносяться до провідників.

У ряді речовин розмивання енергетичних рівнів недостатнє для перекривання діапазону нестационарних рівнів між валентним і першим незаповненим рівнями, а тому валентна зона й зона провідності розділені недоступною для електронів в стаціонарному стані **забороненою зоною**. Такі речовини відносяться до напівпровідників при ширині забороненої зони до 3 еВ або до діелектриків при більшій її ширині.

У цьому випадку, щоб електрони змогли взяти участь в електропровідності, їм потрібно **за рахунок зовнішніх джерел або флуктуацій теплової енергії** частинок у самому матеріалі **надати енергію, що перевищує ширину забороненої зони**, тим

самим, перекинувши їх із валентної зони в зону провідності. За рахунок такого перекидання у *зоні провідності виникає електронний струм*, зумовлений упорядкованим рухом перекинутих електронів.

При перекиданні електронів з валентної зони в зону провідності у валентній зоні з'являються вільні енергетичні рівні, на які можуть, отримавши необхідну енергію від поля, переходити електрони валентної зони з меншою енергією, звільняючи при цьому свої енергетичні рівні, що стають доступними для інших електронів. Внаслідок такого «естафетного» руху електронів валентної зони кожна енергетична вакансія, що утворилася при переході електрона в зону провідності, рухається в напрямку, протилежному напрямку руху електронів. Оскільки *описувати рух одиначної вакансії значно легше, ніж рух багатьох електронів*, викликаний виникненням вакансії, то для спрощення розгляду електропровідності рух вакансії по валентній зоні асоціювали з рухом формального об'єкта – квазічастинки, яку називали «діркою». Таким чином, *носієм заряду в процесі електропровідності по валентній зоні є дірка, відповідно і струм називається дірковим*. Враховуючи напрям руху дірки в електричному полі, їй приписали позитивний заряд, рівний за величиною заряду електрона, а також ефективну масу, яка визначається як друга похідна по швидкості від кінетичної енергії.

Таким чином, кількісні критерії класифікації твердих тіл на **провідники, діелектрики і напівпровідники при нормальних умовах**, згідно зонної теорії, мають такі значення:

- ширина забороненої зони менша за 0,017 еВ – провідники;
- ширина забороненої зони більша за 0,017 еВ, але менша за 3 еВ – напівпровідники;
- ширина забороненої зони більша за 3 еВ – діелектрики.

Слід звернути увагу на те, що *у рамках зонної моделі напівпровідники й діелектрики якісно не відрізняються*. Розходження між ними носить кількісний характер у відповідності з шириною забороненої зони.

Ширина забороненої зони пов'язана з електропровідністю електротехнічних матеріалів. Наближена їх кваліфікація за питомим опором наведена на рис. 1.10.

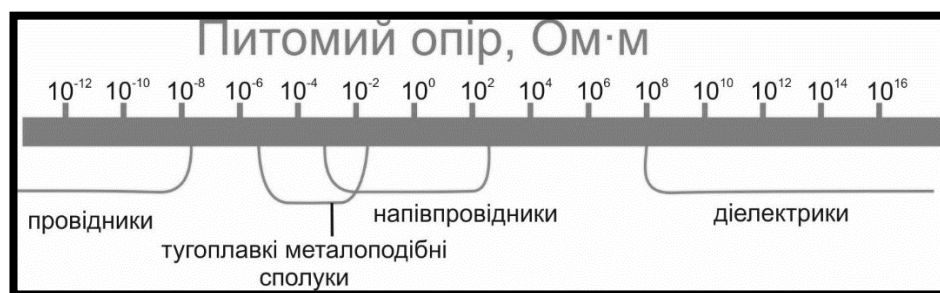


Рис. 1.10. Класифікація електротехнічних матеріалів за питомим опором

ЛЕКЦІЯ 2.

2.1 ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ

2.1.1 Загальні вимоги до діелектриків.

Діелектричні матеріали є основним видом електротехнічних матеріалів, з якими доведеться зустрітися на практиці майбутнім інженерам-електрикам.

Діелектрик¹ – це електротехнічний матеріал, основною властивістю якого є здатність поляризуватися в електричному полі.

Діелектрик² – речовина, що погано проводить електричний струм і питомий опір якої становить $10^8 - 10^{17}$ Ом·м

Всі діелектрики поділяються на пасивні та активні.

Пасивні діелектричні матеріали (рис.2.1) в електротехніці використовуються як ізоляція струмопровідних чи екранних частин електроустановки для запобігання перетіканню електричних зарядів між елементами конструкції з різним електричним потенціалом та для накопичення заряду в конденсаторах.



Рис. 2.1. Класифікація пасивних діелектриків

¹ ДСТУ 2815-94 "Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни і визначення".

² ДСТУ 2843-94 "Електротехніка. Основні поняття. Терміни і визначення"; таке визначення вимагає уточнення "при нормальних умовах".

Для електричної ізоляції використовують такі різноманітні типи діелектриків з питомим опором понад 10^8 Ом·м: повітря в лініях електропередач і електроапаратах; нафтові і штучні масла в трансформаторах, кабелях, вимикачах і вводах; тверді діелектрики в кабелях, трансформаторах, електричних машинах, ізоляторах повітряних ліній, вводах, установлювальних виробках і корпусах апаратів і т. п.

В конденсаторах використовують або діелектрики з підвищеною відносною діелектричною проникністю (в основному титанатну кераміку), або полімерні діелектрики, з яких можна виготовляти тонкі плівки з великою площею поверхні. Для термостабільних герметизованих *еталонних* конденсаторів невеликої ємності як діелектрик використовують вакуум чи азот, відносна діелектрична проникність яких не залежить або дуже слабо залежить від температури.

Активні діелектрики використовують в електроніці для генерування, модуляції та перетворення сигналів, а також для керування ними за допомогою зовнішніх факторів, таких як електричне або магнітне поле, теплота, механічне навантаження та ін.

При конструюванні навіть простих виробів, призначених для роботи в електричному полі, тобто при використанні ЕТМ, **необхідно чітко уявляти**, які процеси відбуваються в матеріалі, **як впливає** той, або інший *матеріал на розташовані поряд з ним матеріали і на роботу інших частин пристрою*, у тому числі за рахунок перерозподілу електричного поля, термомеханічних напружень, фізичної чи хімічної взаємодії між різними матеріалами тощо.

При конструюванні навіть простих виробів, призначених для роботи в електричному полі, тобто при використанні ЕТМ, **необхідно чітко уявляти**, які процеси відбуваються в матеріалі, **як впливає** той, або інший *матеріал на розташовані поряд з ним матеріали і на роботу інших частин пристрою*, у тому числі за рахунок перерозподілу електричного поля, термомеханічних напружень, фізичної чи хімічної взаємодії між різними матеріалами тощо.

Саме фізичні умови, в яких повинна знаходитися і функціонувати ізоляція, накладають певні вимоги на теплофізичні, механічні та фізико-хімічні параметри матеріалу, обмежуючи можливі типи використовуваних ЕТМ. Через це необхідно враховувати **не тільки електрофізичні характеристики ЕТМ**, такі як **діелектрична проникність, електропровідність, діелектричні втрати, електрична міцність, трекінгостійкість**, тощо, але й інші різнопланові характеристики діелектричних матеріалів:

- **механічні**: щільність і вага матеріалу, міцність на стискування, розривання або згинання і інші види деформації, в'язкість і т.д.,
- **теплофізичні** характеристики: теплопровідність, теплоємність, нагрівостійкість, теплостійкість, горючість і т.д.,
- **фізико-хімічні характеристики**: хімічна стійкість, вологостійкість, вологопроникність, розчинність тощо.

Часто усім вимогам одночасно в даній конструкції неможливо задовольнити, тому потрібне ясне розуміння усього комплексу процесів, що відбуваються при функціонуванні пристроїв, щоб оцінити значущість кожної з вимог і зрозуміти, які з них, у кожному конкретному випадку, є головними, а які – другорядними і ними можна знехтувати.

2.2. ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ

2.2.1 Фізична суть поляризації

Електрична поляризація – стан речовини, який характеризується тим, що сумарний електричний момент для даного об'єму цієї речовини має значення, відмінне від нуля.

Встановлюється електрична поляризація внаслідок обмеженого зміщення зв'язаних зарядів в даному тілі або орієнтації його полярних молекул (диполів) під дією електричного поля.

Слід відрізнити *поляризацію* як процес установаження поляризованого стану в процесі зміщення зв'язаних частинок чи орієнтації полярних молекул, і як досягнутий при цьому *стан речовини* з відмінним від нуля електричним моментом. Взагалі, електричний момент може бути дипольним, квадрупольним і т. д., але при поляризації основну роль відіграє саме дипольний момент, що *дорівнює добутку заряду на плече диполя*, і в подальшому саме він буде матися на увазі.

В процесі поляризації діелектрика внаслідок зміщення зв'язаних заряджених частинок діелектрика, він набуває направленої проти прикладеного поля електричного моменту

$$M = N \cdot \alpha \cdot E = N \cdot q \cdot \delta$$

де N – число зв'язаних частинок в діелектрику, α – поляризованість частинок речовини під дією поля напруженістю E , δ – відстань між центрами зміщених під дією поля зарядів протилежного знаку з абсолютною величиною q , не обов'язково кратною заряду електрона.

Електричний момент одиниці об'єму речовини

$$P = M/V = N \cdot q \cdot \delta / S \cdot d = n \cdot q \cdot \delta$$

де n – концентрація частинок, що приймають участь у поляризації (кількість частинок в одиниці об'єму).

Якщо враховувати тільки заряд на відповідних поверхнях об'єму, то $d = \delta$, і

$$P = q/S = \sigma_{нд},$$

тобто електричний момент одиниці об'єму речовини дорівнює поверхневій густині поляризаційного заряду $\sigma_{нд}$.

Саме цей заряд визначає значення відносної діелектричної проникності ϵ_r , яка в свою чергу входить в коефіцієнт пропорційності між напруженістю електричного поля E та електричною індукцією D (яка дорівнює сумі густини заряду на електродах для вакууму σ_n і поляризаційної густини заряду $\sigma_{нд}$, зумовленого поляризацією діелектрика).

В вакуумі для конденсатора з однорідним полем:

$$D_e = \sigma_n = \epsilon_0 E.$$

Якщо заповнити конденсатор діелектриком, то:

$$D = \sigma_n + \sigma_{nd} = \epsilon_0 E + n \alpha E = \epsilon_0 (1 + n \alpha / \epsilon_0) E = \epsilon_0 (1 + \chi) E = \epsilon_0 \epsilon_r E = \epsilon_{ad} E,$$

де $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ф/м – електрична стала (абсолютна діелектрична проникність вакууму), χ – діелектрична сприйнятливість, ϵ_{ad} – абсолютна діелектрична проникність діелектрика.

Таким чином, для відносної діелектричної проникності маємо $\epsilon_r = \epsilon_{ad} / \epsilon_0$ або через поляризованість $\epsilon_r = 1 + \chi$. Звідси можна бачити, що завжди $\epsilon_r > 1$ і тільки для вакууму $\epsilon_r = 1$.

За визначенням:

Абсолютна діелектрична проникність ϵ_{ad} – коефіцієнт пропорційності між напруженістю електричного поля та електричною індукцією.

$$D = \epsilon_{ad} E.$$

Відносна діелектрична проникність ϵ_r – відношення абсолютної діелектричної проникності речовини до абсолютної діелектричної проникності вакууму: $\epsilon_r = \epsilon_{ad} / \epsilon_0$

Відносна діелектрична проникність використовується як основна характеристика поляризаційної здатності діелектрика.

Розглянемо процес поляризації з енергетичної точки зору.

При подачі напруги U на електроди, що знаходяться у вакуумі, джерело напруги розміщує на електродах заряд q_0 і створює між електродами поле напруженістю $E=U/d$, d – відстань між електродами, що необхідна для виконання роботи $A=Uq$ при переміщенні заряду q між електродами (рис. 2.2, а).

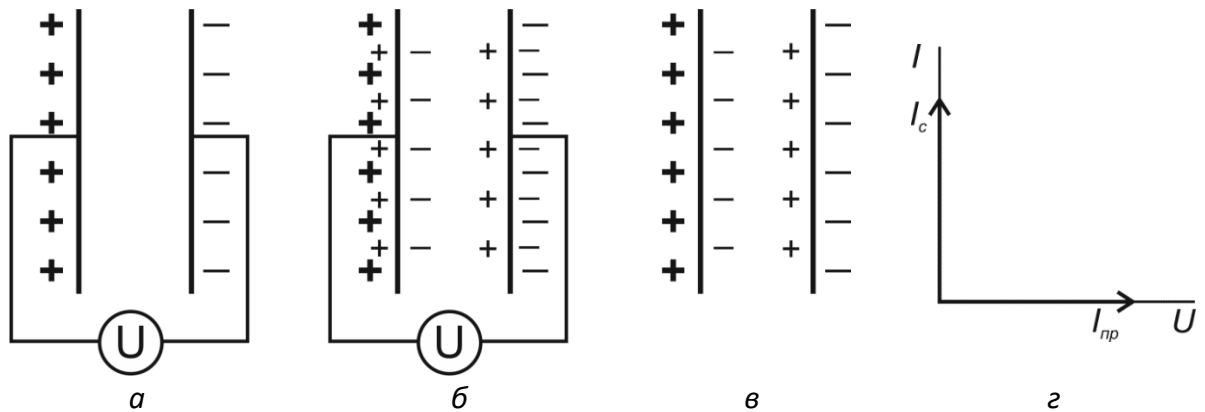


Рис. 2.2. Реакція джерела напруги на поляризацію діелектрика:

а – вакуумний конденсатор, б – конденсатор з діелектриком, що поляризується, в – діелектрик в електричному полі без контакту з електродами, г – взаємне розташування ємнісного і омичного струмів на фазовій діаграмі

Якщо тепер вставити між електродами діелектрик, то внаслідок поляризації діелектрика в його приелектродній області з'являються зв'язані заряди q_d , що екранують вільні заряди q_0 на електродах і зменшують напруженість поля в діелектрику, внаслідок чого робота з переміщення зарядів в діелектрику перестає відповідати напрузі джерела. Для компенсації зв'язаних зарядів електрорушійна сила джерела напруги збільшує поверхневу густину вільних зарядів на електродах і відновлює попередню величину напруженості поля $E=U/d$, що була у вакуумі (рис. 2.2, б).

Тому твердження, яке часто можна зустріти в навчальних посібниках, що напруженість електричного поля в діелектрику в ϵ_r раз менша, ніж у вакуумі, справедливе тільки для випадку ізольованого діелектрика в електричному полі фіксованих зарядів (рис. 2.2, в). У випадку, коли діелектричний матеріал підключений до джерела напруги (який частіше має місце в електротехнічних пристроях) напруженість поля в діелектрику така ж, як і у вакуумі, і не залежить від ϵ_r діелектрика.

Якщо діелектрик з нанесеними електродами розглядати як конденсатор, то заряд на електродах дорівнює:

$$Q = q_0 + q_d = CU,$$

де q_0 – заряд конденсатора при умові, що його обкладки розділяє вакуум; q_d – заряд, що зумовлений поляризацією діелектрика; C – ємність конденсатора.

Звідси випливає, що *поляризація супроводжується збільшенням ємності конденсаторів та діелектричних конструкцій C по відношенню до ємності вакуумних конденсаторів та конструкцій відповідної конфігурації C_0 в ϵ_r раз:*

$$\frac{C}{C_0} = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{C_d}{C_0} = 1 + \chi = \epsilon_r,$$

де C_d – ємність, що зумовлена тільки поляризацією діелектрика.

Що стосується протікання самого процесу поляризації, то потрібно звернути увагу на те, що *поляризація є упорядкованим зміщенням зв'язаних зарядів, тобто струмом*. На відміну від струму провідності, при якому вільні заряджені частинки рухаються наскрізно від електрода до електрода, у випадку поляризації ми маємо *випадок обмеженого в просторі, а значить і в часі, зміщення зв'язаних заряджених частинок*.

Поляризаційний струм є основним при заряді конденсаторів. Він спадає, як правило, експоненціально. При змінній напрузі на конденсаторі *поляризаційний струм протікає через конденсатор неперервно, бо не встигає повністю затухати, якщо період струму T менший постійної часу затухання, і називається ємнісним струмом*.

З самого визначення ємнісного струму впливає його перпендикулярність до напруги. Дійсно, якщо $i_c = C \, dU/dt$, то при $U = U_0 \sin(\omega t)$, враховуючи, що похідна від $\sin(\omega t)$ дорівнює $\omega \cdot \cos(\omega t)$, маємо $i_c = C \cdot \omega \cdot U_0 \cos(\omega t)$ або, згідно з формулою приведення, $i_c = C \cdot \omega \cdot E_0 \cdot d \sin(\omega t + \pi/2)$, тобто ємнісний струм в ідеальному конденсаторі, в якому немає струму електропровідності, за визначенням ємнісного струму випереджає напругу по фазі на $\pi/2$, а тому втрати потужності електричного поля в ідеальному діелектрику дорівнюють нулю. В той же час струм провідності співпадає по фазі з прикладеною напругою (рис. 2.2, г), бо дорівнює $i_r = U \sin(\omega t)/R$.

У випадку *електричної ізоляції* поляризація діелектриків може використовуватися *для оцінки її технічного стану* і відслідковування наслідків таких неелектричних видів старіння діелектриків, як окиснення, яке приводить до зростання ємності ізоляції, чи механічного руйнування, наприклад розшарування ізоляції, що супроводжується зменшенням її ємності.

2.2.2. Класифікація видів поляризації

Для класифікації видів поляризації використовують такі критерії як:

- тип зв'язаних частинок, що приймають участь в поляризації (рис. 2.3),
- характер їх зміщення (рис. 2.3),
- фактори, що зумовлюють поляризацію (рис. 2.4).

В залежності від типу зв'язаних зарядів у речовині поляризацію можна класифікувати на електронну, дипольну та іонну і, відповідно до цього, діелектрики на неполярні, полярні та іонні (рис. 2.5).

При класифікації за характером зміщення виділяють пружну та непружну (релаксаційну) поляризацію. Вказівку на пружний характер зазвичай опускають, а тому терміни електронна, іонна та дипольна відносяться до пружних видів поляризації, хоч дипольну поляризацію часто опускають, бо розділити її на практиці з електронною важко, а дипольно-релаксаційна, іонно-релаксаційна і електронно-релаксаційна види поляризації – до непружних.

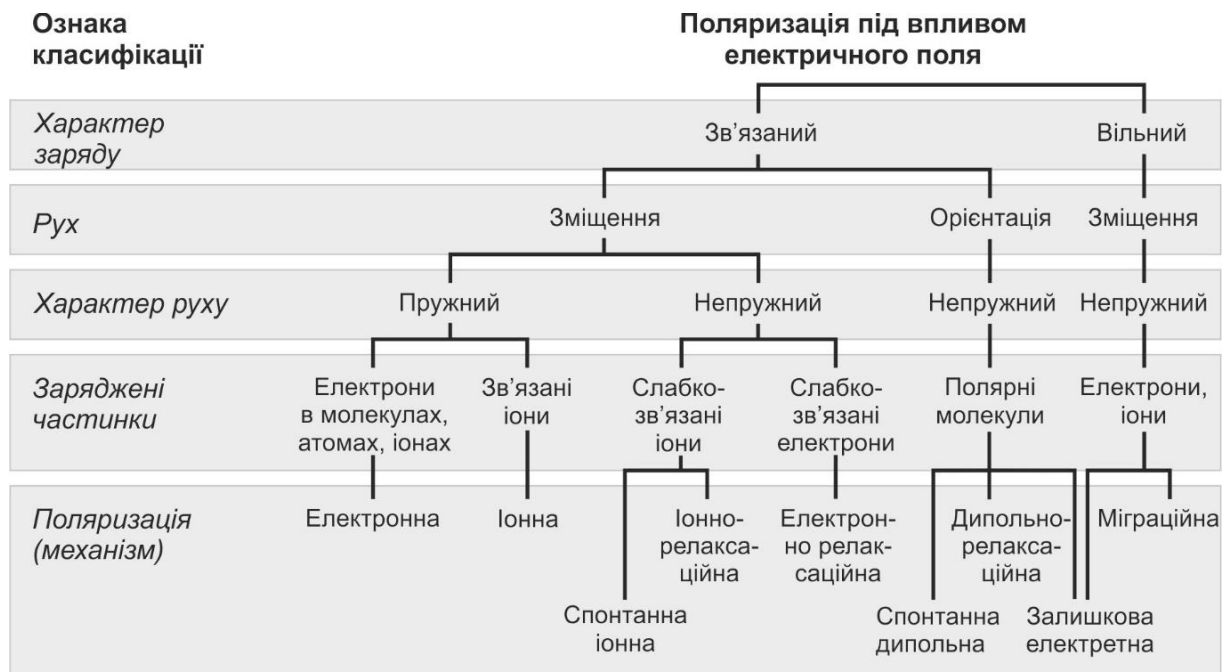


Рис. 2.3. Класифікація електричних видів поляризації



Рис. 2.4. Класифікація видів поляризації в залежності від чинника

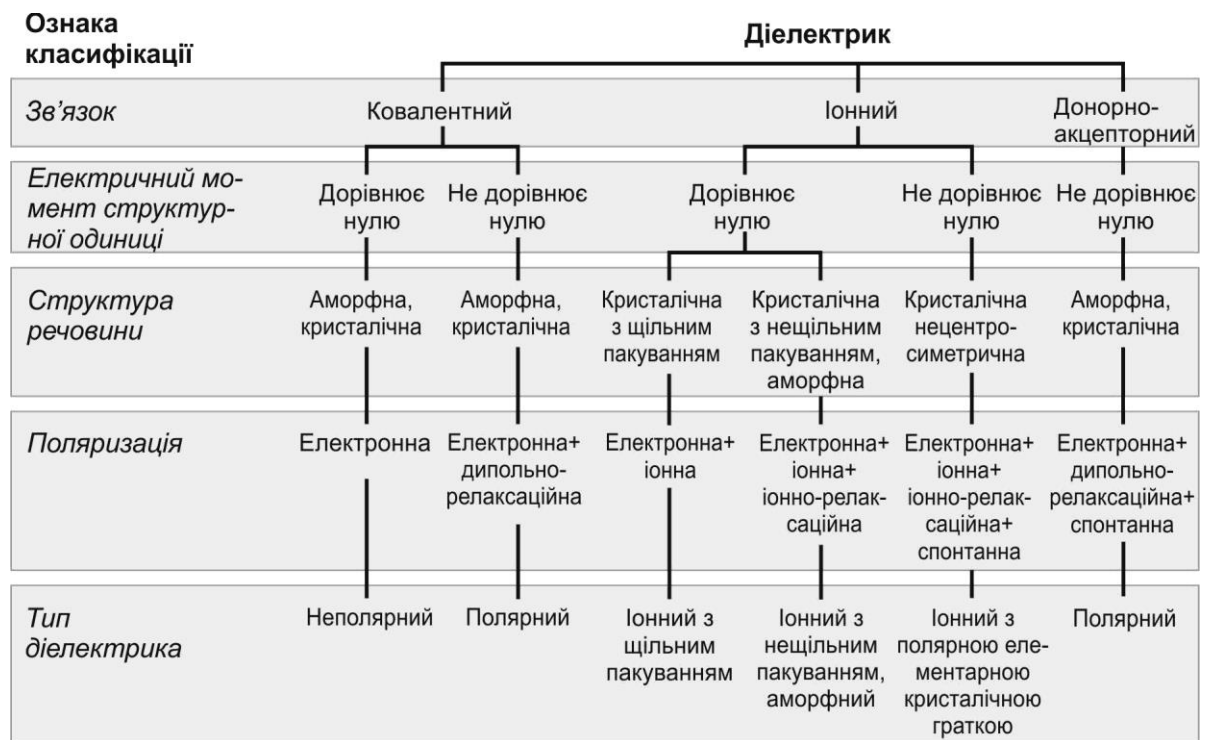


Рис. 2.5. Схема, що пояснює зв'язок між типом діелектриків і видом поляризації.

Крім перерахованих основних видів поляризації в діелектриках можливі *такі специфічні види поляризації як спонтанна*, що встановлюється за рахунок взаємодії частинок речовини (іонів чи диполів), *міграційна*, що виникає за рахунок накопичення вільних заряджених частинок на межах областей з різними значеннями ϵ, ρ в неоднорідних діелектриках, а також *електретна* або *заморожена* поляризація, що перетворює діелектрик в аналог постійного магніту.

В загальному випадку поляризація може встановлюватися при дії не тільки електричного поля, а і інших чинників, таких як механічна деформація в п'єзоелектриках, градієнт температури в піроелектриках, освітленість – при фотополяризації.

2.2.3 Пружна поляризація

При пружному зміщенні заряджених частинок під дією електричного поля виникає повертаюча сила, яка пропорційна відхиленню від положення рівноваги:

$$F = -kx,$$

де k – коефіцієнт, який характеризує жорсткість зв'язку частинки (по аналогії з механічною пружиною); x – зміщення частинки від положення рівноваги. Цій силі відповідає потенційна енергія

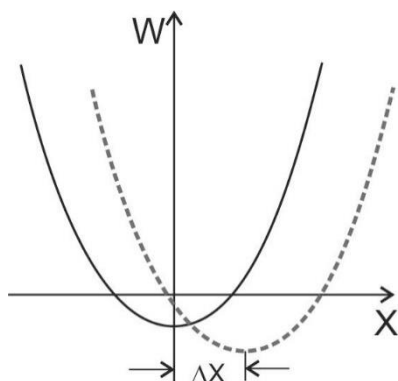
$$W = kx^2/2,$$

тобто у відсутності поля вона має вигляд параболи (рис. 2.6). Прикладене поле дає свій вклад в потенціальну енергію

$$W = -q \cdot E \cdot x,$$

де q – заряд частинки; E – напруженість електричного поля.

Це приводить до деформації параболи і зміщення мінімуму енергії в нове положення рівноваги, що і зумовлює поляризацію. Величина зміщення знаходиться прирівнюванням похідної від сумарної потенціальної енергії по x нулю. Вона дорівнює



$$\Delta x_m = \frac{qE}{k}$$

і, таким чином, залежить від напруженості прикладеного до діелектрика поля. Індукований (наведений) дипольний момент при цьому дорівнює

$$P=qx_m=q^2 E/k,$$

а поляризованість при електронній поляризації

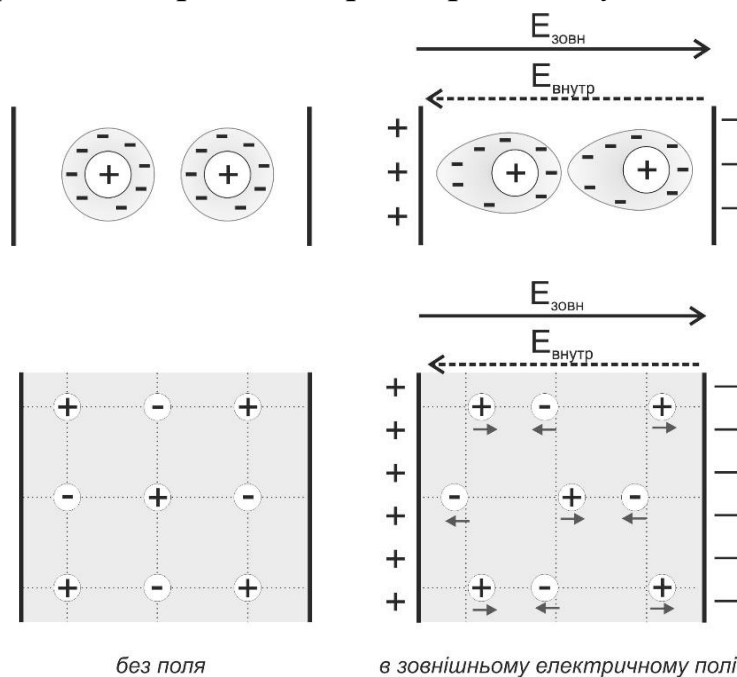
$$\alpha_e = q^2/k.$$

Рис. 2.6. Потенційна енергія зарядженої частинки при безінерційній пружній поляризації

При вимкненні джерела напруги відбувається практично *миттєве* відновлення параболи і повернення до попереднього стану без втрат енергії в області низьких частот прикладеної напруги. Тільки в області оптичних частот ($10^{12} - 10^{15}$ Гц) при пружних іонній та електронній поляризаціях будуть спостерігатися резонансні втрати енергії.

Електронна поляризація. Якщо частинки речовини неполярні (атоми, іони, молекули з симетричною будовою) і у відсутності електричного поля їхній електричний момент дорівнює нулю, то поляризація зведеться до **деформації частинок** внаслідок **взаємного зміщення позитивно заряджених ядер і негативно заряджених електронних оболонок** в електричному полі і буде мати місце електронна поляризація (рис. 2.7, а).

Електронна поляризація характерна для будь-якого діелектрика.



а

б

Рис.2.7. Схематичне зображення електронної (а) та іонної (б) поляризації.

Відносна діелектрична проникність при електронній поляризації дорівнює

$$\epsilon_r = 1 + n \alpha / \epsilon_0.$$

Для газоподібних діелектриків при нормальних умовах

$$\epsilon_r = 1 + 3,03 \cdot 10^{36} \alpha,$$

де $\alpha = 4\pi\epsilon_0 R^3$ – поляризованість частинок.

В фізиці діелектриків іноді користуються геометричною поляризованістю $\beta = \alpha/\epsilon_0$, яка для неполярних частинок складає $4\pi R^3$ ($10^{-30} \text{ м}^3 - 10^{-29} \text{ м}^3$), що в 3 рази більше об'єму електронної оболонки, тобто поляризованість речовини у газоподібному стані може бути використана для оцінки розмірів атомів і молекул.

Для діелектриків з електронною поляризацією має місце *наближена рівність відносної діелектричної проникності квадрату коефіцієнта заломлення світла* $\epsilon_r \approx n^2$, яку можна використовувати для оцінки ступеня полярності речовини.

Неполярні діелектрики, для яких характерна тільки електронна поляризація (наприклад, поліетилен, фторопласт-4, полістирол, парафін, сірка та ін.) мають при нормальних умовах типові значення $\epsilon_r = 1,9... 2,7$.

Іонна поляризація, що зумовлена *пружним зміщенням різнойменно заряджених іонів відносно рівноважного положення* (рис. 2.7, б), має місце, разом з електронною, в іонних діелектриках з щільною упаковкою іонів, а також частково в іонних діелектриках з нещільним пакуванням іонів в кристалічній ґратці

Іонні діелектрики з щільною упаковкою іонів (наприклад, кварц, корунд, слюда та ін.), в яких є *електронна та іонна поляризація*, мають типові значення $\epsilon_r = 4...10$, а кристали, що містять іони титану можуть мати ϵ_r навіть *більше 100*.

Крім того порушується відповідність $\epsilon_r = n^2$, так, наприклад, для NaCl $\epsilon_r = 5,85$, а $n^2 = 2,37$, для CaCO₃ відповідно 6,1 і 2,78, для TiO₂ – 114 і 7,3.

Для іонних діелектриків з нещільною упаковкою ϵ_r знаходиться в тому ж діапазоні, але в них можлива також релаксаційна поляризація, що збільшує значення ϵ_r .

Дипольна поляризація в чистому вигляді в твердих діелектриках спостерігається рідко. Здебільшого профіль залежності потенціальної енергії від кута повороту диполя не відповідає параболі, а тому дипольна поляризація в загальному випадку носить непружний характер.

2.2.4 Релаксаційна поляризація

Основна модель, що використовується для розгляду особливостей релаксаційної поляризації, включає наявність *двох рівноцінних з енергетичної точки зору і розділених потенціальним бар'єром положень рівноваги* у відсутності зовнішнього поля для частинок, що приймають участь у цій поляризації (рис. 2.8) і *термоактиваційний характер переходів* з одного положення рівноваги в інше, що здійснюються за рахунок енергії теплових коливань. Змоделювати релаксаційну поляризацію можна, якщо силу взаємодії задати у вигляді

$$F = -cx^3 + kx,$$

де c і k – константи. Відповідна потенційна енергія має вигляд кривої з двома розділеними максимумом потенціальними ямами

$$W = cx^4/4 - kx^2/2.$$

В зовнішньому електричному полі на симетричну криву залежності потенціальної енергії від координати x накладається потенціальна енергія зарядженої частинки, що дорівнює $W_e = -qEx$, внаслідок чого симетричність кривої порушується і одна з потенціальних ям стає глибшою. Час перебування частинки у тому чи іншому положенні рівноваги визначається згідно з експонентою Больцмана висотою потенціального бар'єру і дорівнює

$$\tau = \tau_{i0} \exp(W_i/k_0T), \tau_{i0} = v/2,$$

де v – частота власних коливань частинки; k_0 – стала Больцмана. Він стає в електричному полі неоднаковим, що сприймається як зміщення середнього положення частинки, тобто поляризація.

Таким чином має місце термоактиваційний характер переходів на відміну від пружної поляризації, при якій зміщення частинок здійснюється безпосередньо під дією електричного поля, і тільки переважний напрям цих переходів визначається полем.

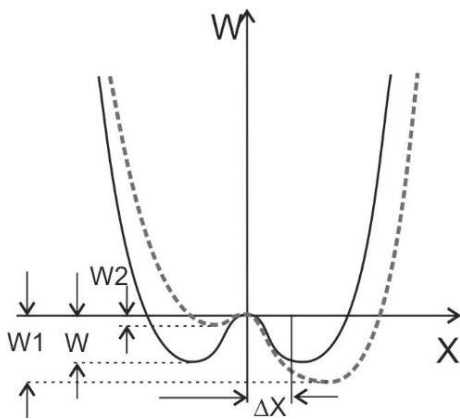


Рис.2.8 Потенційна енергія зарядженої частинки при релаксаційній поляризації

Тому при вимкненні зовнішнього поля зміщення частинок не зможе зникнути зразу, як при пружній поляризації, і надлишок енергії, що створився при релаксаційній поляризації, буде розсіюватися в діелектрику у вигляді діелектричних втрат, приводячи до нагрівання діелектрика. В змінному електричному полі внаслідок запізнення релаксаційної поляризації відносно фази напруги також будуть мати місце діелектричні втрати, закономірності яких будуть розглянуті нижче.

Електронно-релаксаційна поляризація пов'язана з непружним зміщенням слабо зв'язаних електронів або дірок, а в деяких іонних діелектриках – певного виду структурних дефектів – "центрів фарбування", що пов'язані з розташуванням електронів замість негативних іонів у вузлах кристалічної ґратки.

Іонно-релаксаційна поляризація спостерігається в іонних діелектриках з нещільною упаковкою іонів та *аморфних іонних діелектриках* і пов'язана з непружним переміщенням слабо зв'язаних чи домішкових іонів між двома локальними дефектами, а також орієнтацією квазідиполів, що утворені іоном в міжвузлі і вакансією.

Типові значення ϵ_r для *іонних діелектриків з нещільною упаковкою* іонів та *аморфних іонних діелектриків*, для яких характерні механізми *електронної, іонної, іонно-релаксаційної та електронно-релаксаційної поляризації* (наприклад, ситали, скло та деякі види кераміки), від 5... 15 до 30... 40.

Дипольно-релаксаційна поляризація. *Полярні молекули* можна вважати диполями з відмінним від нуля електричним моментом. В електричному полі, крім деформації просторової зарядової структури, молекули будуть піддаватися орієнтаційній дії пари сил, що діють на протилежно заряджені частини диполя, внаслідок чого молекула буде *розвертатися в електричному полі*, долаючи бар'єр, зумовлений взаємодією з сусідніми молекулами чи групами, і приводячи, в середньому, до поляризації (рис. 2.9).

Дипольно-релаксаційна поляризація характерна для діелектриків з полярним ковалентним зв'язком. У випадку *полімерних діелектриків* дипольно-релаксаційна поляризація проявляється в орієнтації в електричному полі сегментів аморфної молекули при температурах, вищих за температуру склування T_c – *дипольно-сегментальна поляризація*, або полярних груп і бічних відгалужень молекул, що можуть спостерігатися і при нижчих T_c температурах, – *дипольно-групова поляризація*. До полярних груп, що зумовлюють дипольно-релаксаційну поляризацію, відносяться атоми або групи атомів: -Cl, -F, -OH, =CO, -CON, COOH, -NH₂, -NO₂, -O-O-, -CH₃ та інші, що мають постійний дипольний момент.

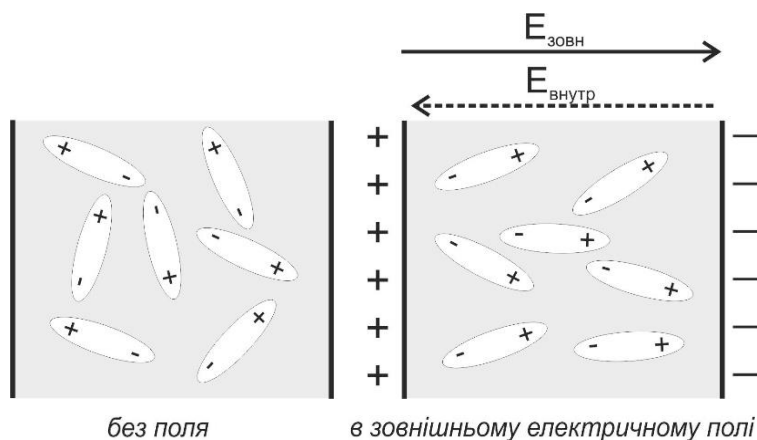


Рис.2.9. Схематичне зображення дипольно-релаксаційної поляризації.

Полярні діелектрики, для яких характерні *електронна та дипольно-релаксаційна* поляризації (наприклад, поліаміди, феноло-формальдегідні смоли, полівінілхлорид, епоксидні смоли та ін.) мають типові значення $\epsilon_r = 3...7$, хоча окремі речовини, наприклад, вода, мають $\epsilon_r \approx 80$.

2.2.5 Специфічні види поляризації

Крім наведених видів поляризації в речовині можуть мати місце *спонтанна*, *міграційна* та *електретна* поляризації

Спонтанна поляризація. Більшість діелектриків (за винятком п'єзо- і сегнетоелектриків) характеризуються лінійною залежністю зміщення від напруженості електричного поля в діелектрику. В нелінійних діелектриках (сегнетоелектрики, п'єзоелектрики, піроелектрики) при температурах, нижче температури Кюрі, крім наведених видів поляризації спостерігається *спонтанна (самодовільна)* поляризація, яка виникає внаслідок міжчастинкової (міжйонної, міждипольної) взаємодії при відсутності електричного поля. Наявність її – наслідок особливої нецентросиметричної мікροструктури цих діелектриків.

При спонтанній поляризації в діелектрику виникають окремі макроскопічні поляризовані в певному напрямку області, що називаються доменами. Домени у відсутності поля орієнтовані під 90° або 180° один відносно одного, але результуючий електричний момент діелектрика дорівнює нулю. При прикладенні поля домени за рахунок перебудови орієнтуються за полем і діелектрик поляризується (рис. 2.10, а).

Для *нелінійних діелектриків із спонтанною поляризацією*, діелектрична проникність може досягати значень $10^2 \dots 10^3$, а в температурних максимумах по порядку величини навіть $\approx 10^5$.

Міграційна поляризація (рис. 2.10, б) зумовлена на відміну від всіх розглянутих раніше випадків не зв'язаними, а вільними носіями заряду. Вона виникає при умові, що в діелектрику є області з різною сталою часу діелектрика ($\tau = \epsilon_0 \epsilon_r \rho_v$), або на електродах є перешкоди для нейтралізації іонів. В першому випадку на границях областей накопичуються вільні заряди, змінюючи розподіл напруженості поля від розподілу по ϵ_r до розподілу по ρ_v (*об'ємна міграційна поляризація*). При наявності перешкод для нейтралізації іонів поблизу електрода накопичуються вільні іони і виникає *приелектродна поляризація*. Струм, що протікає при встановленні міграційної поляризації, називається абсорбційним струмом і буде розглянутий у відповідному розділі.

Як на межах областей з різними властивостями, так і в приелектродних областях рівновага досягається тоді, коли дифузійний струм, зумовлений градієнтом концентрації і направлений проти струму електропровідності, що ініціюється прикладеною напругою, зрівнюється з ним.

Електретна поляризація. Шляхом поляризації електричним полем без його вимкнення за одночасної зростаючої, а потім спадаючої дії інших факторів (температури, опромінювання, часткових розрядів тощо) можна створити *заморожену релаксаційну чи міграційну поляризацію*, яка називається *електретною* (рис. 2.10, в) і для якої характерна поява навколо діелектрика постійного електричного поля, що зберігається при вимкненні зовнішнього поля після закінчення поляризації. Цей електричний аналог постійного магніту називають **електретом**.

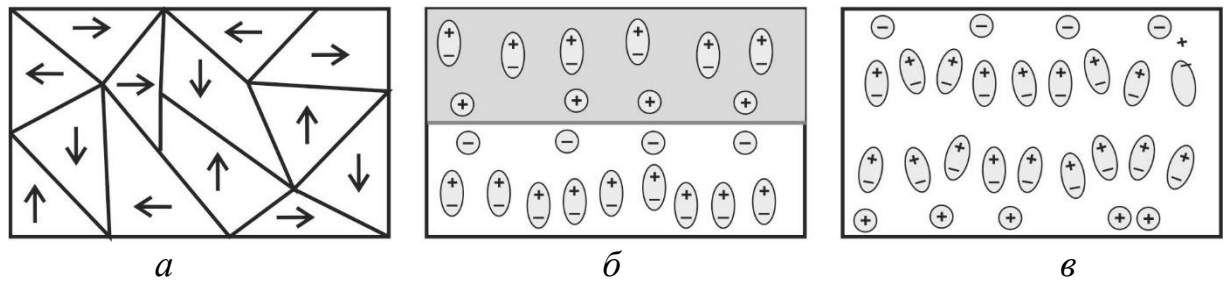


Рис. 2.10 Схематичне зображення поляризацій: а – спонтанної; б – міграційної в двошаровому полярному діелектрику; в – електричної

2.2.6 Інерційні властивості поляризації

Обмежене зміщення зв'язаних заряджених частинок у процесі поляризації потребує певного часу, а тому вклад кожного механізму в процес поляризації можливий лише до певних частот¹, при яких зв'язаний заряд встигає слідкувати за змінами зовнішнього електричного поля (рис. 2.11).

Зміна ϵ_r в залежності від частоти називається діелектричною дисперсією так само, як і частотна залежність коефіцієнта заломлення, з яким пов'язана відносна діелектрична проникливість (для неполярних діелектриків $\epsilon_r = v^2$). Тому при *пружній* поляризації має місце *резонансна діелектрична дисперсія*, при якій ϵ_r спочатку зростає, досягає максимуму, потім спадає, проходить через мінімум, і, нарешті, знову зростає, прямуючи до нового сталого значення, що відповідає *аномальній дисперсії показника заломлення*. Час встановлення *електронної поляризації* дуже малий – близько 10^{-15} с. Тому вона проявляється на всіх частотах, аж до $10^{14} \dots 10^{15}$ Гц.

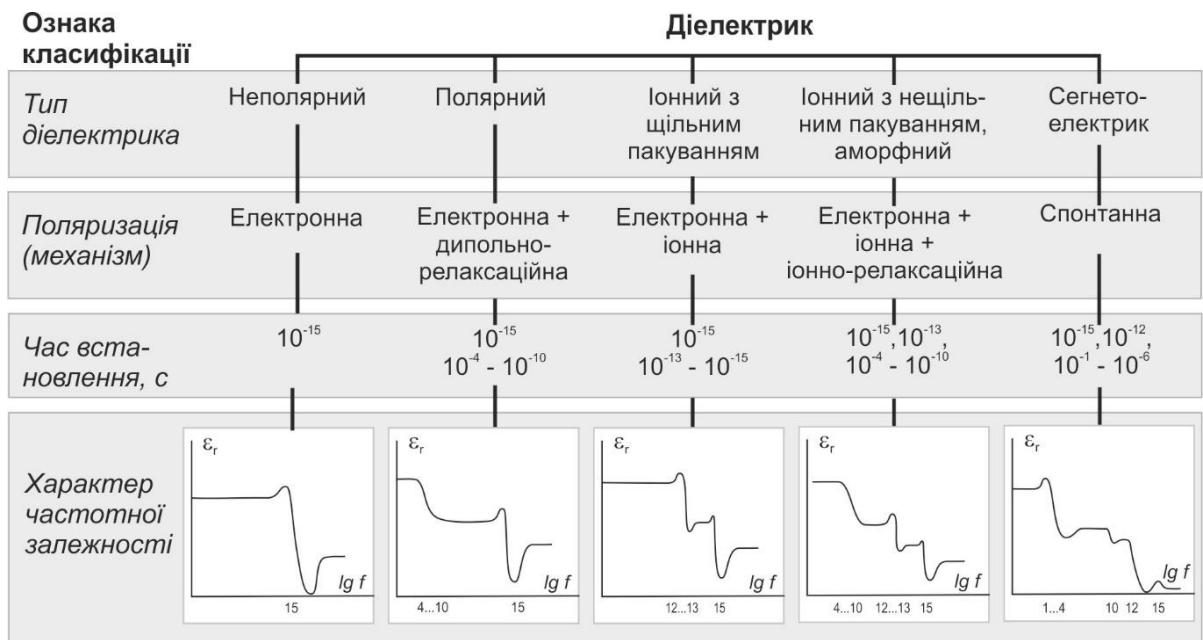


Рис. 2.11. Схематичне зображення частотних залежностей ϵ_r для різних видів діелектриків.

¹ Між часовою і частотною характеристиками процесу існує однозначна відповідність, що відображається, наприклад, прямим і зворотним перетворенням Фур'є.

Аналогічно для *іонного механізму поляризації*, що характерний для діелектриків з іонною будовою, час встановлення поляризації по порядку величини складає 10^{-13} с, частотний діапазон – до 10^{13} Гц.

При релаксаційній поляризації поляризованість діелектрика P_d зменшується з часом, як завжди при релаксації, за експоненціальним законом

$$P_d = P_{d0} \exp(-t/\tau),$$

де τ – стала часу діелектрика. Це приводить до відповідної монотонного спаду ϵ_r зі збільшенням частоти до нового стабільного значення, аналогічно *нормальній дисперсії показника заломлення*. Області нормальної дисперсії ϵ_r відповідає частота поля з півперіодом, що дорівнює постійній часу релаксаційної поляризації $\tau = \tau_0 \exp(W/kT)$. Тому область нормальної дисперсії зміщується в область вищих частот при підвищенні температури.

Електронно-релаксаційна поляризація встановлюється за час $10^{-2} \dots 10^{-7}$ с, частотний діапазон існування до 10^7 Гц.

Іонно-релаксаційна поляризація при нормальних температурах має час встановлення в залежності від температури та структури діелектрика $10^{-4} \dots 10^{-10}$ с, проявляється вона в частотному діапазоні до $10^4 - 10^{10}$ Гц.

Час встановлення *дипольно-релаксаційної* поляризації для полярних діелектриків знаходиться у межах $10^{-4} \dots 10^{-8}$ с, частотний діапазон – $10^4 - 10^8$ Гц. У випадку полімерів при підвищенні температури (частоти) максимумами дипольно-сегментальної і дипольно-групової поляризацій зближуються і в області високих температур (частот) зливаються.

Спонтанна поляризація проявляється приблизно в тому ж частотному діапазоні, що й іонно-релаксаційна або дипольно-релаксаційна поляризації. Але область дисперсії (частотного спаду) ϵ_r не зміщується зі зміною температури, а температурний максимум ϵ_r – зі зміною частоти, що і використовують для визначення механізму поляризації – спонтанна чи релаксаційна.

Міграційна поляризація протікає дуже повільно зі сталою часу діелектрика $\tau = \epsilon_r \epsilon_0 \rho$, що може складати десятки секунд і сильно залежить від частоти в області низьких (нижче 100 Гц) частот. Час встановлення міграційної поляризації для різних діелектриків знаходиться у діапазоні $10^{-4} \dots 10^2$ с. Спад діелектричної проникності для міграційної поляризації спостерігається у відповідній низькочастотній області ($10^4 \dots 10^{-2}$ Гц).

Досить помітний вклад в міграційну поляризацію дає зволоження, а тому, якщо відношення ємностей, визначених на частотах 2 і 50 Гц, $C_2/C_{50} > 1,2 - 1,3$, то робиться висновок про необхідність сушіння ізоляції. Аналогічно використовують відношення ємностей на частоті 50 Гц при температурах 70°C і 20°C , яке для сухої ізоляції повинно бути меншим за 1,1.

2.2.7 Вплив температури на поляризацію діелектриків

Температура навколишнього середовища сильно впливає на процес поляризації в діелектриках (рис. 2.12). *Реакцію діелектрика на зміну температури прийнято характеризувати температурним коефіцієнтом діелектричної проникності $TK\epsilon_r$* – котрий при даній температурі T дорівнює

$$TK\epsilon_r = \frac{1}{\epsilon_r(T)} \frac{d\epsilon_r(T)}{dT},$$

або, якщо $TK\epsilon_r$ визначають графічним методом по дотичній, проведеній до залежності $\epsilon_r(T)$ в точці T , і довільними значеннями $\epsilon_r(T_2)$ і $\epsilon_r(T_1)$, взятими на дотичній при температурах T_2 і T_1 , то

$$TK\epsilon_r = \frac{1}{\epsilon_r(T)} \frac{\epsilon_r(T_2) - \epsilon_r(T_1)}{T_2 - T_1}.$$

При електронній поляризації завдяки тепловому розширенню при підвищенні температури *кількість частинок*, які поляризуються *в одиниці об'єму*, *буде зменшуватись і відносна діелектрична проникність ϵ_r з ростом температури буде знижуватись приблизно за лінійним законом*.

У випадку *іонної поляризації зміщення* пружно зв'язаних протилежно заряджених іонів в кристалічній ґратці *зростають в результаті розширення нагрітого тіла та посилення коливань іонів у вузлах кристалічної ґратки*. Цей ефект виявляється більш значним, ніж зменшення концентрації частинок у результаті теплового розширення і *відносна діелектрична проникність ϵ_r з ростом температури збільшується. Температурний коефіцієнт ϵ_r у цьому випадку позитивний* та також постійний у широкому діапазоні температур.

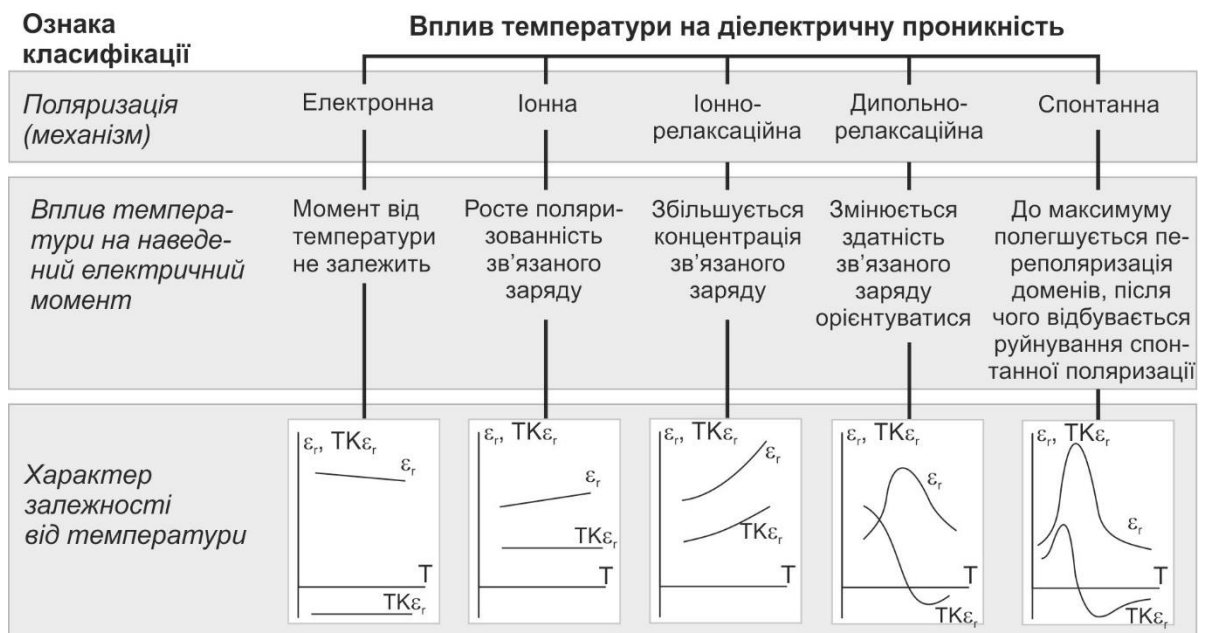


Рис. 2.12. Схематичне зображення температурних залежностей ϵ_r для різних видів поляризації

При розгляді *дипольно-релаксаційної поляризації*, зумовленої орієнтацією полярних молекул в електричному полі, потрібно враховувати, що *електричний момент зв'язаних в молекулі зарядів практично не залежить від температури*, а тому електричний момент речовини визначається в основному *орієнтацією зв'язаних зарядів за напрямом зовнішнього поля*.

При низьких температурах енергія полярних молекул недостатня для подолання потенціальних бар'єрів і молекули, орієнтуючись пружно, роблять незначний внесок в поляризацію. Із зростанням температури сили зв'язку молекул послаблюються, що сприяє поляризації речовини: відносна діелектрична проникність речовини збільшується. Однак при подальшому підвищенні температури енергія теплового (хаотичного) руху молекул послаблює орієнтуючу дію електричного поля, в результаті чого відносна діелектрична проникність, що визначається ступенем орієнтації полярних молекул в речовині, зменшується. Таким чином, в залежності від температури, *відносна діелектрична проникність* при дипольно-релаксаційній поляризації *проходить через максимум*.

Подібний характер мають і температурні залежності при *іонно- та електронно-релаксаційній поляризаціях*, хоча часто *іонні кристали з нещільним пакуванням плавляться* при температурах, нижчих температури максимуму ϵ_r , а тому для ϵ_r спостерігається тільки *надлінійно зростаюча крива*.

Спонтанна поляризація спостерігається в обмеженому діапазоні температур. *При переході через верхню межу* цього діапазону спостерігається *швидке гіперболічне зниження ϵ_r* , викликане *руйнуванням спонтанної поляризації та переходом її до іонно- чи дипольно-релаксаційної*, залежно від типу сегнетоелектрика. Сегнетоелектрик при цьому переходить в параелектричний стан, характерним для якого є саме гіперболічний спад ϵ_r від температури згідно з *законом Кюрі-Вейса* $\epsilon_r = C/(T-T_K)$, де C – стала Кюрі-Вейса, T_K – температура Кюрі.

2.2.8 Формули для розрахунків діелектричної проникності

Часто на практиці виникає необхідність *розробки матеріалів з заданими значеннями відносної діелектричної проникності ϵ_r* , для чого використовують суміші діелектриків. Відносна діелектрична проникність ϵ_r у цьому випадку розраховується *за узагальненою формулою Ліхтенеккера*

$$\epsilon_{rc}^k = c_1 \cdot \epsilon_{r1}^k + c_2 \cdot \epsilon_{r2}^k,$$

де c_1 і c_2 – концентрації компонентів; ϵ_{r1} і ϵ_{r2} – відносні діелектричні проникності компонентів; k – коефіцієнт, значення якого залежить від структурних особливостей композиційних матеріалів.

Можна виділити окремі випадки для шаруватого діелектрика з паралельним ($k = +1$) і послідовним ($k = -1$) поєднанням шарів, а також для дрібно – дисперсних сумішей $k = 0$, коли рівняння приймає логарифмічний вигляд

$$\ln \epsilon_{rc} = c_1 \ln \epsilon_{r1} + c_2 \ln \epsilon_{r2}.$$

Існує багато інших формул для розрахунків ϵ_r для діелектриків з різною формою частинок, але всі вони дають значення ϵ_r , що знаходиться між максимальним значенням, яке дає формула Ліхтенеккера при $k = 1$:

$$\epsilon_{rc} = c_1 \cdot \epsilon_{r1} + c_2 \cdot \epsilon_{r2},$$

і найменшим, що відповідає $k = -1$:

$$1/\epsilon_{rc} = c_1 \cdot 1/\epsilon_{r1} + c_2 \cdot 1/\epsilon_{r2}.$$

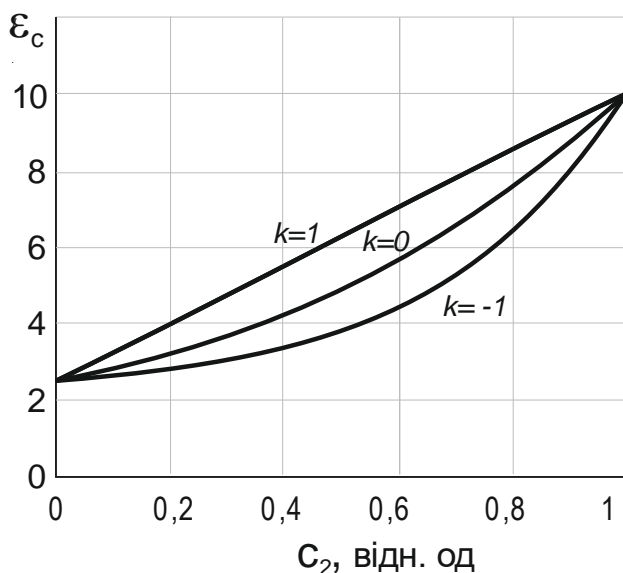


Рис. 2.13. Розрахункова залежність $\epsilon_r(c_2)$ за формулою Ліхтенеккера для різних значень k

2.2.9 Практичне визначення відносної діелектричної проникності

Відносна діелектрична проникність ϵ_r може бути визначена як *відношення* ємності C_x конденсатора, в якому простір між електродами повністю заповнений діелектричним матеріалом, що випробовується, до ємності такого ж конденсатора, але з вакуумом між електродами C_v :

$$\epsilon_r = C_x / C_v.$$

При визначенні ϵ_r за наведеною формулою можна замінити міжелектродну ємність в вакуумі C_v на міжелектродну ємність у повітрі C_n з врахуванням, що $\epsilon_{гп}=1.00053$.

При ємнісних вимірюваннях необхідно враховувати можливість систематичної похибки за рахунок паразитних ємностей електродної системи і ємності під'єднуючих проводів, що можуть дати суттєвий вклад у вимірювану величину при малих ємностях. Для її усунення розрахунковим шляхом використовують подвійне вимірювання: перший раз вимірюють ємність конденсатора з діелектричним матеріалом, другий раз – з повітряним проміжком такої ж товщини. (рис.2.14).

Фактичні вимірювання з врахуванням додаткової ємності електродного пристрою $C_{пр}$, що включена паралельно ємності діелектрика, дадуть

$$C_1 = C_x + C_{np} \text{ та } C_2 = C_n + C_{np}.$$

Ємність електродного пристрою можна виключити, визначаючи

$$\Delta C = C_1 - C_2 = C_x - C_n.$$

Далі потрібно обчислити ємність повітряного конденсатора

$$C_{II} = \varepsilon_{rB} \varepsilon_0 S / h$$

де $\varepsilon_{rB} \approx 1$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; при вимірюванні з дисковими електродами $S = \pi d^2 / 4$ – площа вимірювального електрода; d – діаметр електрода; h – товщина зразка матеріалу.

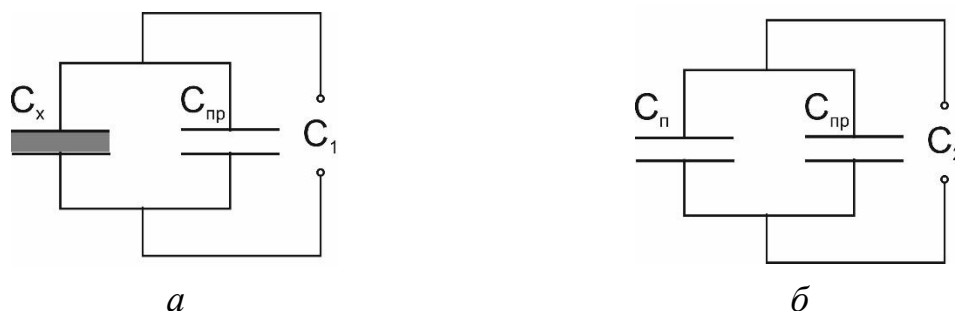


Рис.2.14. До практичного визначення ε_r : C_1 – ємність конденсатора з діелектриком і паразитна ємність (а); C_2 – ємність повітряного проміжку і паразитна ємність (б)

Якщо зразок має форму циліндра довжиною l з нанесеними на внутрішню діаметром d_1 і зовнішню діаметром d_2 поверхні електродами, то

$$C_n = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l / \ln(d_2 / d_1)$$

Тепер значення відносної діелектричної проникності можна визначити за формулою

$$\varepsilon_r = C_x / C_n = 1 + \Delta C / C_n.$$

Що стосується методів вимірювання (рис. 2.15), то слід знати, що вони відрізняються для постійної і змінної напруги різних частот. В області промислових частот найбільш поширеним методом є мостовий.

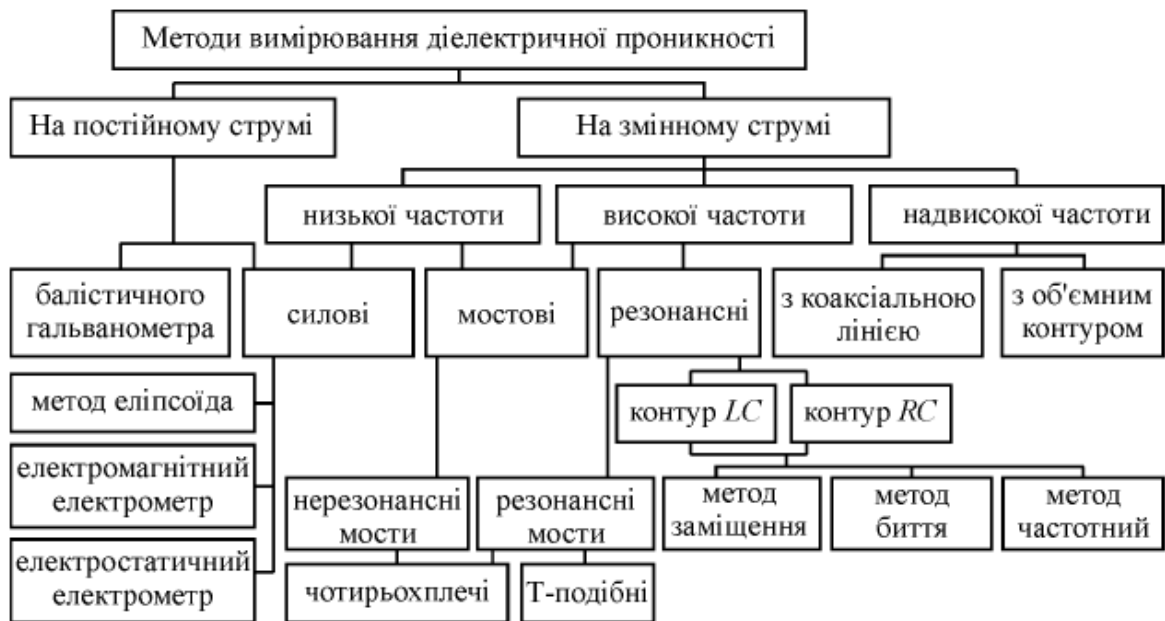


Рис. 2.15. Класифікація методів вимірювання діелектричної проникності

Можливі і інші, крім використання відношення ємності конденсатора з діелектриком до ємності конденсатора з вакуумним проміжком, варіанти визначення ϵ_r . Наприклад, якщо зарядити конденсатор з діелектриком, а потім, відключивши його від джерела напруги без розряджання, вийняти з конденсатора діелектрик, то напруга на конденсаторі зросте в ϵ_r раз, що також можна використати для визначення ϵ_r .

Можна навести також спосіб визначення ϵ_r , який важко реалізувати на практиці, що пов'язаний з влаштуванням прорізів в діелектрику вздовж поля, в якому можна визначити E , і поперек поля – для визначення D , щоб потім знайти ϵ_{ad} , а через нього і ϵ_r .

2.2.10 Поляризація активних діелектриків

Останнім часом у техніці все ширше застосування знаходять діелектрики, здатні генерувати, перетворювати або посилювати електричні сигнали в електричному колі. Ці діелектрики називаються активними.

Властивості активних діелектриків надзвичайно різноманітні. Основна відмінність активних діелектриків від пасивних полягає в тому, що поляризація в них можлива і у відсутності зовнішнього електричного поля і зумовлена неелектричними факторами (окрім сегнетоелектриків, в яких поляризація зумовлена внутрішнім електричним полем, а в пасивних – зовнішнім). Активні діелектрики реагують на електричні, магнітні, механічні, теплові та світлові впливи (табл. 2.1), при цьому в більшості випадків має місце і пряма і зворотна реакція.

У найбільш вживаних діелектриках з нецентросиметричною кристалічною ґраткою поляризація, поряд з поляризацією, яка має місце у зовнішньому електрич-

ному полі (індукована), може виникати і змінюватися при дії таких внутрішніх факторів як інтенсивна взаємодія між іонами чи диполями у відсутності зовнішнього електричного поля (сегнетоелектрики), та таких зовнішніх факторів, як деформація (п'єзоелектрики) та градієнт температури (піроелектрики).

Параметри активних діелектриків та їхня класифікація (табл. 2.2) визначаються у першу чергу зовнішнім фактором, який є причиною виникнення або зміни поляризації, тобто керівним.

Властивості цього ряду активних діелектриків визначаються:

- зміною поляризації нецентросиметричних кристалів при зовнішньому впливі, зв'язаної з анізотропністю деформації елементарної кристалічної ґратки;
- зміною дипольного моменту елементарної кристалічної ґратки й електричного моменту кристала в цілому;
- порушенням рівноваги між поверхневим поляризаційним зарядом та компенсуючими його зарядами, захопленими з зовнішнього середовища й адсорбованими на поверхні.

Таблиця 2.1. Основні ефекти в активних діелектриках

Вплив	Відгук				
	Електричний	Магнітний	Механічний	Тепловий	Зміна оптичних властивостей
Електричне поле	Поляризація, електричний струм	Електромагнітний ефект	Обернений п'єзоэффект	Електрокалоричний ефект	Електрооптичний ефект
Магнітне поле	Магнітоелектричний ефект	Намагнічування	Магнітострикція	Магнітокалоричний ефект	Магнітооптичний ефект
Механічна напруга	Прямий п'єзоэффект	П'єзомагнітний ефект	Деформація	Пружно-тепловий ефект	Фотопружний ефект
Теплота	Піроелектричний ефект	Термомагнітний ефект	Термічне розширення	Теплоємність	Термооптичний ефект
Світло	Фотовольтаїчний ефект	Фотомагнітний ефект	Фотострикція	Поглинання світла	Заломлення і відбиття

Сегнетоелектрики. Поляризація *сегнетоелектриків* у зовнішньому полі розвивається на фоні *спонтанної поляризації*, взаємно скомпенсованої в об'ємі речовини внаслідок скоординованої орієнтації доменів. Вона полягає у *перебудові доменної структури*, збільшенні розмірів тих доменів, що виявились більш орієнтованими за полем (кут між сусідніми доменами становить звичайно 90° або 180°) за рахунок сусідніх.

Таблиця 2.2 – Класифікація активних діелектриків

Тип діелектрика	Керуючий вплив	Реакція
<i>Піроелектрик</i>	Зміна температури в часі	Генерація електричної напруги
<i>П'єзоелектрик</i>	Механічна напруга	Генерація електричної напруги /прямий п'єзо ефект/
	Електрична напруга	Деформація /зворотний п'єзо ефект/
<i>Сегнетоелектрик</i>	Електрична напруга	Зміна діелектричної проникності
<i>Електрет</i>	Механічне зміщення	Зміна електричного поля
<i>Рідкі кристали</i>	Електричне та магнітне поле	Зміна коефіцієнта прозорості та заломлення /оптичних властивостей/
<i>Оптично активні діелектрики /люмінофори, активні елементи лазерів/</i>	Світло, електричне поле, потік частинок	Генерація світлового випромінювання

Зростом напруженості поля процес переорієнтації доменів посилюється, при цьому стає можливою переорієнтація цілих доменів, яка супроводжується клацанням Баркгаузена, а коли майже всі домени зорієнтовані за полем, **настає насичення**.

Високе значення ϵ_r сегнетоелектриків дає можливість використовувати їх як пасивні діелектрики і виготовляти з них низькочастотні керамічні конденсатори з великою питомою ємністю, що використовуються як в електротехніці, так і в електронній техніці. Основним ефектом, що дозволяє використовувати **сегнетоелектрики** як активні діелектрики, є **нелінійність їхньої діелектричної проникності**, тобто гістерезисна залежність $D(E)$ (рис. 2.16) і залежність $\epsilon_r=f(E)$.

Створення постійного електричного поля в сегнетоелектрику змінює стан рівноваги в бік відмінної від нуля поляризації. Визначена у цьому випадку при одночасному подаванні змінної напруги **реверсивна діелектрична проникність** виявляється меншою, ніж при відсутності постійного зміщення.

Сильна залежність реверсивної ϵ_r від напруженості змінного та постійного полів дозволяє реалізувати **вариконди (керовані конденсатори), комірки пам'яті ЕОМ, сегнетоелектричні підсилювачі, генератори, модулятори та інші електронні схеми**, що дає можливість, наприклад, керувати енергією НВЧ, виготовити повністю керамічний радіоприймач, тощо. Крім того, поляризовані сегнетоелектрики використовують як п'єзо- і піроелектрики.

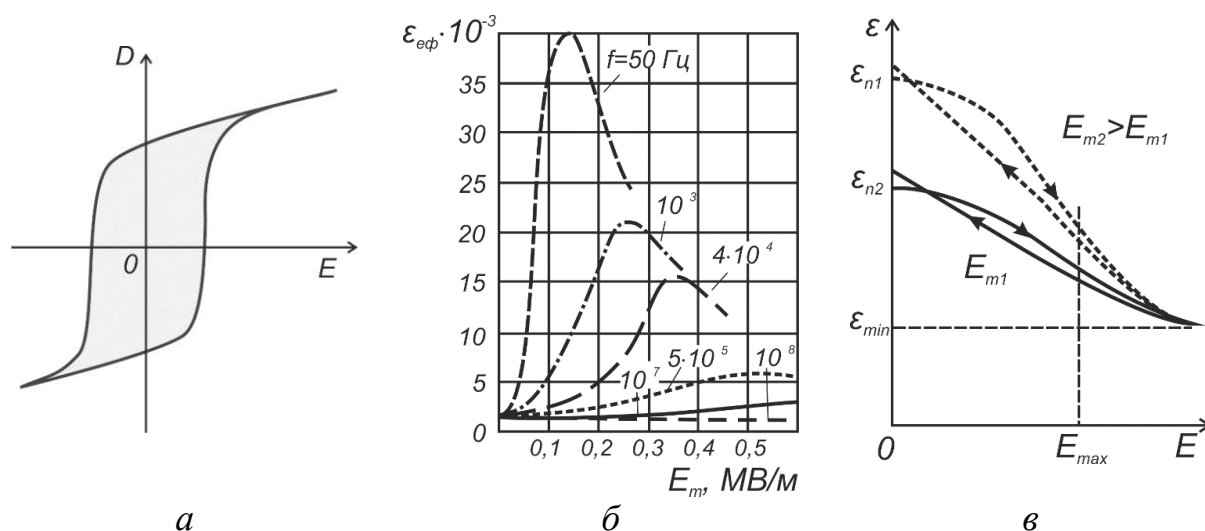


Рис.2.16. Петля гістерезису сегнетоелектрика $D(E)$ – а), залежності ефективної ϵ кераміки ВК-2 від величини напруженості змінного електричного поля при різних частотах –б) та реверсивна ϵ в залежності від напруженості постійного електричного поля при двох напруженостях змінного поля – в)

П'єзоелектрики. При дії електричного поля на п'єзоелектрики спостерігається **лінійний зворотний п'єзо ефект**: напруга, підведена до обкладинок п'єзоелемента, породжує відповідну їй деформацію. Крім зворотного п'єзо ефекту в п'єзоелектриках спостерігається також **прямий п'єзо ефект**, що має місце за **механічної дії** на п'єзоелектрик і його деформації і викликає пропорційну їй напругу. Наявність прямого і зворотного п'єзо ефектів зумовлює наявність частотного п'єзорезонансу, в процесі якого ϵ_r п'єзоелектрика може приймати навіть від'ємні значення, тобто в певному діапазоні частот діелектрик можна використовувати як індуктивність.

П'єзоелектрики застосовуються у вигляді датчиків прискорень, вібрацій і тиску, звукознімачів, мікрофонів, випромінювачів і приймачів ультразвуку, а також в п'єзотрансформаторах (рис. 2.17), п'єзорезонаторах, п'єзофільтрах, п'єзодвигунах тощо.

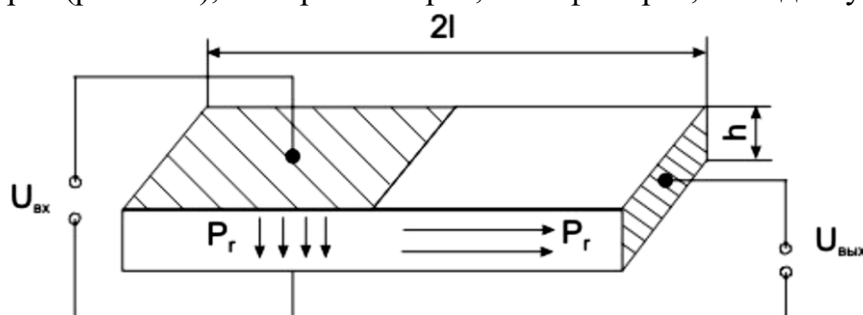


Рис. 2.17 – Умовна схема п'єзоелектричного трансформатора

Піроелектрики. У процесі нагрівання **піроелектрика** на його електродах виникає різниця потенціалів, величина якої пропорційна градієнту температури. Піроелектрики використовують як індикатори і вимірювачі випромінювань: детектори ПЧ випромінювання малої потужності; детектори форми і потужності коротких (10^{-5} – 10^{-11} с) імпульсів випромінювання; чутливі датчики в спектро- і радіометрії; пірометри.

Електрети. В деяких керамічних і полімерних діелектриках *поляризацію можна "заморозити"* і отримати електричний аналог постійного магніту, що називається *електретом*. Електрети класифікують за способом формування на такі групи:

– *термоелектрети* отримують нагріванням під напругою до температур розм'якшення чи плавлення (смоли і віск), температури склування (полімери) або до температури 150–200 °С (неорганічні діелектрики) з витримкою для встановлення дипольно-релаксаційної чи міграційної поляризації і охолодженням під напругою, що дає можливість зафіксувати набуту поляризацію у зв'язку зі значним збільшенням часу релаксації поляризації;

– *фотоелектрети*: енергія, необхідна для міграційної поляризації отримується за рахунок освітлення. Переміщені заряджені частинки "захоплюються" пастками і зумовлюють електретний ефект;

– *трибоелектрети* утворюються при терті двох діелектриків з різною роботою виходу;

– *електроелектрети* – утворюються в результаті інжекції зарядів під дією часткових розрядів в газовому проміжку між діелектриком і електродом;

– *радіоелектрети* – подібні до електроелектретів, тільки заряджені частинки інjektуються в діелектрик при опроміненні потоком заряджених частинок.

В перших двох випадках в діелектрику біля обох електродів накопичується заряд протилежного знаку по відношенню до знака електрода, який називається гетерозарядом, в двох останніх – заряд в діелектрику відповідає полярності електрода і називається гомозарядом, хоча в останньому випадку для тонких плівок і великої енергії (кеВ) заряджених частинок можливе встановлення гетерозаряду. Електрети з гомозарядом називають моноелектретами. Вони нестабільні через швидку компенсацію заряду в діелектрику зарядами з навколишнього середовища і з часом переходять в електрети з гетерозарядом.

Електретний стан нерівноважний, він релаксує, а тому, наприклад, гетероелектрет з часом може змінювати полярність (рис. 2.18). Зміна полярності відбувається набагато швидше, ніж зменшення заряду електрета. Час релаксації залишкового заряду більший для моноелектретів і, наприклад, для фторопласту-4 може сягати сотень років.

Електрети використовують в мікрофонах, електромеханічних перетворювачах, електрофотографії, фільтрах, дозиметрії, медицині тощо.

До активних діелектриків можна віднести й рідкі кристали, що є частково впорядкованими в'язкими рідинами або розчинами, що містять лінійні молекули. За структурою їх поділяють на:

– *нематичні* – з паралельним розташуванням хаотично зсунутих у поздовжньому напрямі молекул (рис. 2.19, а);

– *смектичні* – з шаруватою упорядкованістю в напрямі, перпендикулярному до осі молекул (рис. 2.19, б);

– *холестеричні* – являють собою шарові структури з нематично упорядкованими, орієнтованими паралельно осі молекул, гвинтоподібно повернутих одна відносно одної (рис. 2.19, в).

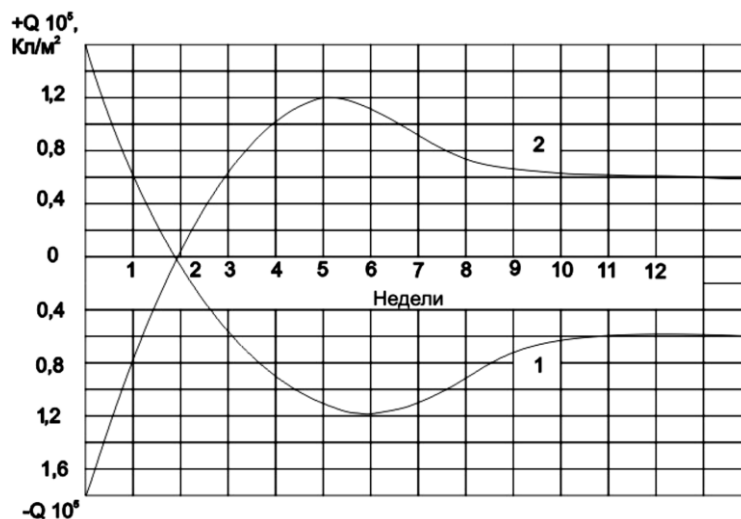


Рис. 2.18 Залежність заряду електрета від часу: 1 – сторона діелектрика, що прилягає до негативного електрода; 2 – сторона діелектрика, що прилягає до позитивного електрода

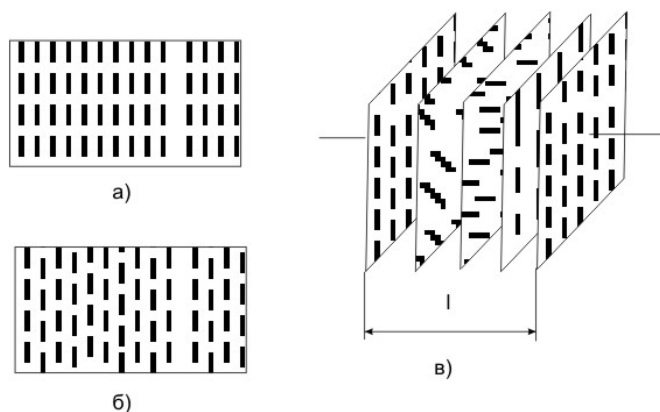


Рисунок 2.19 – Схематичне зображення будови рідких кристалів: *a* – смектичні; *b* – нематичні; *в* – холестеричні

Сильна асиметрія структури рідких кристалів є причиною значної анізотропії їхніх електричних, магнітних і оптичних властивостей. Практичний інтерес становить, перш за все, залежність оптичних характеристик рідких кристалів (прозорість, колір тощо) від дії електричного й магнітного полів, що використовують в екранах, світлових таблицях і т.п.

Люмінофори й матеріали для генерування когерентного лазерного випромінювання є найхарактернішими представниками *оптично активних діелектриків* другої групи. У люмінофорах генерується світло внаслідок рекомбінації елементарних збуджень, викликаних зовнішніми нетепловими факторами (світлом, потоком електронів, електричним полем і т.п.). Матеріали для генерування когерентного лазерного випромінювання мають метастабільні рівні енергії, на яких можливе нагромадження збуджених електронів з наступним лавиноподібним індукованим переходом їх до основного стану.

ЛЕКЦІЯ 3

3.1 ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ДІЕЛЕКТРИКІВ

3.1.1 Загальна характеристика процесу електропровідності

Електропровідність пов'язана з наскрізним рухом вільних носіїв заряду через діелектрик. За визначенням, справедливим для всіх електротехнічних матеріалів:

Електропровідність – властивість речовини проводити під дією незмінного в часі електричного поля незмінний в часі електричний струм.

В діелектриках цей струм встановлюється після закінчення *експоненційно спадаючих поляризаційного та абсорбційного струмів*, що виникають зразу ж після подачі напруги (рис.3.1). В чистому вигляді електропровідність діелектрика проявляється тільки після закінчення цих струмів, коли через діелектрик протікає незмінний в часі *наскрізний струм електропровідності*.

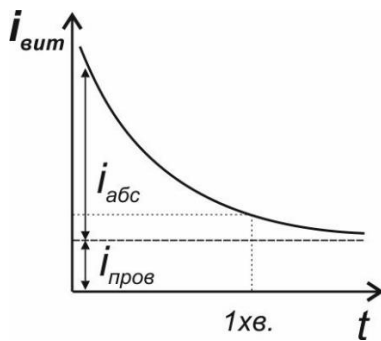


Рис.3.1. Часова залежність абсорбційного струму і струму електропровідності, що протікають через діелектрик при підключенні до постійної напруги

Поляризаційні струми при електронній і іонній поляризації не вдається зафіксувати приладами через їхню *швидкоплинність*. Враховуючи, що *релаксаційні види поляризації* встановлюються за час, що складає доли секунди, їх можна зафіксувати з допомогою, наприклад *осцилографа*.

При уповільненій міграційній поляризації *абсорбційні* струми зміщення існують протягом тривалого часу і забезпечують можливість їх реєстрації не тільки осцилографом, але і наномікроамперметрами. Саме абсорбційні струми, які визначаються мікро- і макронеоднорідністю діелектриків, використовуються для *діагностування технічного стану електрообладнання*.

З врахуванням *струму пружної і релаксаційної поляризації, абсорбційного струму та струму електропровідності щільність струму витікання* складає:

$$j_{вит} = j_{пр} + j_{релакс} + j_{абсор} + j_{епр}$$

Для уніфікації і забезпечення можливостей порівняння результатів вимірювань, що проводяться різними авторами в різних умовах, відлік наскрізного струму при вимірюваннях *опору діелектрика та опору ізоляції* проводиться через *одну хвилину після під'єднання напруги*, як показано на рис.3.1.

Носії заряду звичайно приймають участь не тільки в *дрейфовому русі, тобто русі, що викликаний дією електричного поля*, але і в *тепловому русі*. В деяких випадках швидкість теплового руху носіїв заряду, наприклад в газах, може бути на кілька порядків вищою, ніж швидкість дрейфового руху, але *середнє значення швидкості теплового руху дорівнює нулю, на відміну від середнього значення дрейфової швидкості*, що не дорівнює нулю.

У слабких полях сила струму

$$I = \frac{dQ}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} = q \cdot n \cdot S \frac{dl}{dt} = q \cdot n \cdot S \cdot v(t)$$

де ρ – густина заряду; n – концентрація заряджених частинок (носіїв заряду), q – їх заряд, v – швидкість носіїв заряду.

Якщо враховувати тільки струм електропровідності, то його густина

$$j_{enp} = I_{enp}/S = q \cdot n \cdot v = q \cdot n \cdot u \cdot E = \gamma \cdot E.$$

де $v = u \cdot E$, u – рухливість носіїв заряду, тобто середня дрейфова швидкість носіїв заряду у полі з напруженістю $E = 1 \text{ В/м}$, γ – питома електрична провідність.

Питома електрична провідність – коефіцієнт пропорційності між напруженістю поля і густиною струму.

$$\gamma = \frac{j}{E} = q \cdot n \cdot u. \quad (3.1)$$

Одиниця вимірювання – $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$ (Сименс – одиниця електропровідності, що дорівнює Ом^{-1}) або $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

На практиці для характеристики здатності діелектрика проводити електричний струм використовують поряд з питомою провідністю **питомий опір діелектрика**, що є оберненою до γ величиною

$$\rho = 1/\gamma.$$

Одиниця вимірювання – $\text{Ом} \cdot \text{м}$

Використання формули (3.1) дає можливість замінити **аналіз впливу зовнішніх факторів на питому електричну провідність**, який можна визначити експериментально, **аналізом їх впливу на** внутрішні мікроскопічні характеристики – **рухливість і концентрацію носіїв заряду**, і навпаки.

Рухливість носіїв заряду пов'язана з їх **коефіцієнтом дифузії**¹ співвідношенням $u = qD/kT$, що дозволяє визначати одну фізичну величину через іншу незалежно від особливостей електропровідності, хоча на практиці цей зв'язок використовується, як правило, в основному при розгляді нерівномірного розподілу зарядів, коли дифузійний струм врівноважує дрейфовий.

Ключове питання при вивченні електропровідності в діелектриках – утворення і природа вільних носіїв заряду. Вона визначається фазовим станом, складом та будовою діелектрика.

В загальному випадку можна виділити такі **механізми утворення вільних носіїв заряду в діелектриках**:

– **іонізація діелектриків частинками високих енергій**, зокрема радіацією Землі, космічним промінням, ультрафіолетом, тощо, в результаті якої утворюються нерівноважні позитивні іони, електрони і негативні іони, а в конденсованій речовині крім того заряджені дефекти;

¹ Дифузія – рух частинок, зумовлений градієнтом їх концентрації (наприклад, поширення запаху в закритому приміщенні)

– термічна генерація – найбільш загальний процес генерації термічно **рівноважних¹ вільних іонів чи електронів (дірок)**, зумовлений концентрацією на даній частинці теплової енергії внаслідок її флуктуацій згідно з експонентою Больцмана, у даному випадку в сторону збільшення, в результаті чого іон покидає рівноважне положення і переходить в слабкозв'язаний стан, або нейтральна частинка зазнає дисоціації на іони чи іон і електрон, або електрон перекидається з валентної зони в зону провідності, стаючи носієм заряду;

– електролітична дисоціація – розпад молекул (особливо молекул домішок в рідинах) на іони внаслідок сумісної дії полярних молекул, електричного поля і температури з утворенням **рівноважних** іонів;

– ударна іонізація відбувається при непружному зіткненні розігнаних полем електронів з іонами, атомами чи молекулами в сильних (передпробивних) електричних полях, при якому утворюються вільні **нерівноважні** електрони та іони, що зумовлюють сильну нелінійність електропровідності;

– фотогенерація нерівноважних носіїв заряду внаслідок поглинання енергії фотонів з достатньою енергією іонами, атомами чи молекулами та їх іонізації в результаті цього процесу;

– інжекція нерівноважних електронів (дірок) з металевих електродів або іонів з електролітичних електродів в діелектрик в сильних електричних полях;

– тунелювання, зумовлене квантово–механічним просочуванням електронів через нахилену електричним полем заборонену зону без підвищення енергії, що може мати місце в тонких діелектричних плівках в сильних полях.

Необхідно звернути увагу на те, що деякі з названих процесів є найхарактернішими для певного агрегатного стану речовини: іонізація під дією радіоактивного або ультрафіолетового випромінювання – для газофазного, електролітична дисоціація – для рідкого, термогенерація – для твердого тощо.

В залежності від типу та особливостей генерування вільних чи слабко зв'язаних частинок в діелектрику розрізняють такі *види електропровідності*:

– іонна – основний для діелектриків вид електропровідності в області нормальних температур, зумовлений рухом власних чи домішкових позитивно заряджених катіонів, негативно заряджених аніонів чи протилежно до заряду іонів зарядженими іонними вакансіями з врахуванням того, що ширина забороненої зони для них перевищує 3 eV, що еквівалентно 34800 K, і для перекидання електронів з валентної зони в зону провідності потрібна температура значно вища, ніж нормальна;

– моліонна – має місце у рідких діелектриках і зумовлена перенесенням електричним полем позитивних (катафорез) чи негативних (анафорез) молекулярних іонів, заряджених груп молекул чи заряджених макроскопічних частинок;

¹ Рівноважними, або термодинамічно рівноважними, називаються частинки, які перебувають в тепловій рівновазі з речовиною, тобто мають ту ж температуру згідно з розподілом Больцмана, що і частинки речовини. Нерівноважні частинки мають відхилення значень енергії, наприклад, за рахунок отримання додаткової енергії від електричного поля, від значень, що характерні для теплової енергії даної речовини.

– електронна – зумовлена рухом електронів або їх вакансій (дірок), що при нормальних умовах має місце в діелектриках при інжекції носіїв заряду з електродів або при ударній іонізації у полях високої напруженості, а також для деяких діелектриків, що мають електронну провідність (титанати, нітриди тощо);

– поляронна – це електронна чи діркова провідність, що ускладнена сильною взаємодією цих частинок з речовиною, внаслідок чого вони рухаються разом зі збуренням області діелектрика і тому їх рухливість аномально низька.

На електропровідність впливає також **механізм перенесення заряду в діелектрику**, в залежності від якого можна виділити такі види електропровідності:

– дрейфова, основний тип електропровідності в газах і рідинах, при якій носій заряду має швидкість значно меншу теплової, при цьому більшу частину часу витрачає на рух, а меншу на зіткнення з наступним захопленням чи розсіюванням;

– стрибкова, термоактивована електропровідність, що здійснюється внаслідок переплигувань носіїв заряду через бар'єри, що відділяють мінімуми потенціальної енергії в вузлах, міжвузлях, вакансіях, локалізованих електронних станах в забороненій зоні за рахунок флуктуацій теплової енергії частинок діелектрика. Вона може мати місце як для іонної, так і для поляронної електропровідностей у твердих діелектриках. При стрибковій провідності носій заряду основний час перебуває у локалізованому стані і тільки невелику частину часу витрачає на перескоки між положеннями з мінімумами потенціальної енергії;

– Пула-Френкеля – нелінійна електропровідність в сильних електричних полях, що відбувається за рахунок зниження потенціальних бар'єрів для переходів носіїв заряду в сильному електричному полі;

– дифузійна, що пов'язана з вирівнюванням концентрації носіїв заряду, коли з областей з більшою концентрацією за рахунок хаотичного теплового руху вони переходять в області з меншою концентрацією носіїв заряду, часто проти електричного поля.

Концентрація носіїв заряду і значення електропровідності залежать від механізмів генерації і перенесення, а тому будуть розглядатися для кожного агрегатного стану окремо.

3.1.2 Електропровідність газоподібних діелектриків

Електропровідність газоподібних діелектриків зумовлюється в основному процесами **іонізації** газу в результаті:

– дії зовнішніх іонізуючих факторів (космічні, рентгенівські та ультрафіолетові промені, радіоактивне випромінювання природного чи штучного походження);

– теплової дії (для повітря температури вище 4000...6000 К);

– дії електричного поля (область сильних полів).

В результаті цих процесів в газі утворюються **позитивні іони, електрони, а в електронегативних газах і негативні іони**.

У повітрі при нормальних умовах утворюється в секунду $N = (4-8) \cdot 10^6$ пар заряджених частинок в 1 м^3 . Якщо врахувати, що **поряд з іонізацією** відбувається й зворотний процес – **рекомбінація** (процес нейтралізації позитивних іонів електронами чи негативними іонами), то зростання кількості іонів обмежується і з часом установлюється деяка рівноважна концентрація носіїв заряду.

Для повітря при атмосферному тиску **рівноважна концентрація** носіїв заряду становить $10^9 - 2 \cdot 10^9 \text{ пар іонів/м}^3$. Ці носії заряду приводять до незначної електричної провідності в газах, що складає приблизно $10^{-14} - 10^{-13} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$.

При оцінці вкладу іонів і електронів у електропровідність потрібно враховувати, що **рухливість електронів в газах приблизно в $10^2 - 10^3$ раз більша за іонну**, а тому навіть незначна кількість електронів буде сильно впливати на значення питомого опору.

Якщо між двома електродами, до яких прикладена напруга, знаходиться газоподібний діелектрик, то його вольт-амперна характеристика має в загальному випадку такий вигляд (рис. 3.2.) і може бути розбита на три ділянки:

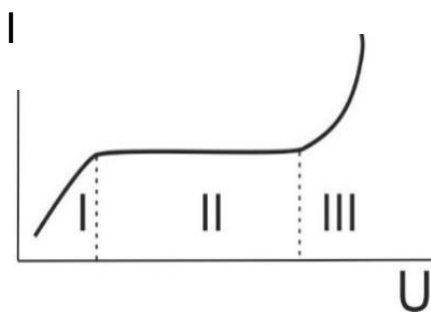


Рис.3.2. Вольт-амперна характеристика газоподібного діелектрика

I – на цій ділянці **виконується закон Ома**, струм пропорційний напрузі. Інтенсивність перенесення заряджених частинок на електроди дуже низька і не впливає на їхню концентрацію в проміжку. Ця ділянка дуже вузька і триває до напруженості електричного поля близько $0,5 - 1 \text{ В/м}$.

II – **всі заряджені частинки**, які утворюються внаслідок дії зовнішніх іонізуючих факторів, **переносяться на електроди за час, менший інтервалу між актами іонізації**, іонізація стає обмежуючим фактором, **струм залежить тільки від інтенсивності іонізації, але не від напруги (явище насичення)**. Питома провідність газів на цій ділянці знижується з підвищенням напруги (напруженості поля).

Струм насичення $I = N \cdot q \cdot h$ залежить від відстані між електродами. Для повітряного проміжку в 1 см він буде дорівнювати приблизно $6 \cdot 10^{-15} \text{ А/м}^2$ при напруженості електричного поля $0,6 \text{ В/м}$. Така електрична провідність асоціюється з **несамостійним розрядом** в газах.

III – **виникнення ударної іонізації електронами, різке зростання струму** (на практиці при $E > 10^6 \text{ В/м}$). В газах під дією сильного електричного поля електрони набувають на довжині вільного іонізаційного пробігу енергію достатню для іонізації нейтральних частинок (ударна іонізація), електропровідність експоненційно зростає з напруженістю поля і **при певних умовах розряд може стати самостійним, що супроводжується пробоем газу**, який буде розглянутий нижче.

3.1.3 Електропровідність рідких діелектриків

Електропровідність рідких діелектриків визначається їх складом і пов'язана з будовою молекул рідини. Як і в газах, велику роль в утворенні вільних носіїв заряду відіграють іонізуючі випромінювання. Шляхом екранування листовим свинцем, можна, наприклад, підвищити питомий опір ретельно очищеного ізооктана до $3 \cdot 10^{-20} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ (саме тому визначення діелектриків через високий питомий опір не прийнятне в тій редакції, в якій воно наводиться в ДСТУ 2843-94 "Електротехніка. Основні поняття. Терміни і визначення". Додатковим і досить суттєвим механізмом утворення вільних носіїв заряду, що зумовлюють електропровідність рідких діелектриків, є електролітична дисоціація (розпадання, розділення) молекул домішок та молекул самого діелектрика на іони (рис. 3.3), а в сильних полях також інжекція електронів чи дірок з електродів.

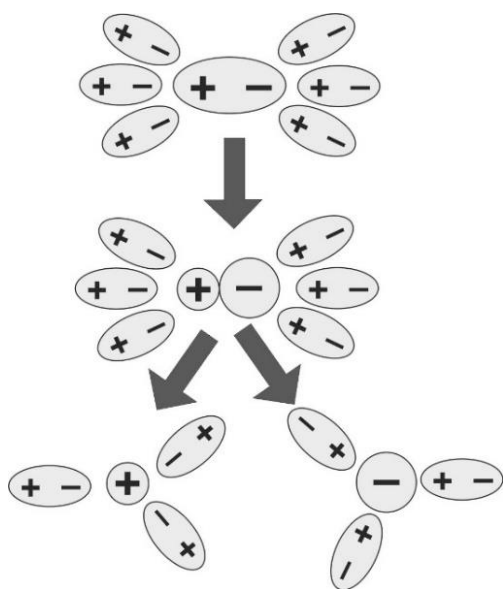


Рис.3.3. Механізм електролітичної дисоціації: полярні молекули рідини "розривають" молекулу на іони

молекул. Для іоногенної домішки в неполярних рідинах α змінюється від 0 для нерозчинних речовин до 1 при повній дисоціації.

Ступінь дисоціації є термоактивованою величиною і експоненціально зростає з підвищенням температури

$$\alpha = \frac{n}{n_0} = \exp(-W / kT),$$

а тому питома провідність та питомий опір рідких діелектриків

$$\gamma = \gamma_{\infty} \exp\left(-\frac{W}{kT}\right), \quad \rho = \rho_{\infty} \exp\left(\frac{W}{kT}\right)$$

де W – енергія дисоціації, γ_{∞} і ρ_{∞} – *питомі провідність і опір при абсолютній температурі, що прямує до нескінченості* (зверніть на це увагу!).

Залежність струму від напруженості поля в рідких діелектриках до певної величини ($\sim 0,1 \text{ МВ/м}$) **відповідає закону Ома**. В рідких діелектриках з високим ступенем очищення може спостерігатися невелика горизонтальна ділянка насичення, аналогічна тій, що має місце у газах, але при значно вищих напруженостях поля.

Далі спостерігається різке зростання струму за рахунок підвищення рухливості іонів, а при ще більшій напруженості поля – ударної іонізації електронами (рис.3.4).

Кількісною характеристикою здатності речовини дисоціювати на іони, є ступінь електролітичної дисоціації α , що дорівнює відношенню числа молекул, що дисоціювали на іони, до загального числа

Якщо електропровідність рідини зумовлена домішковими і власними іонами, то залежність її від температури визначається сумарною питомою електропровідністю

$$\gamma = \gamma_{\infty 1} \exp\left(-\frac{W_1}{kT}\right) + \gamma_{\infty 2} \exp\left(-\frac{W_2}{kT}\right)$$

Ця залежність відображена в функціональних координатах $\lg \gamma = f(1/T)$ на рис.3.5.

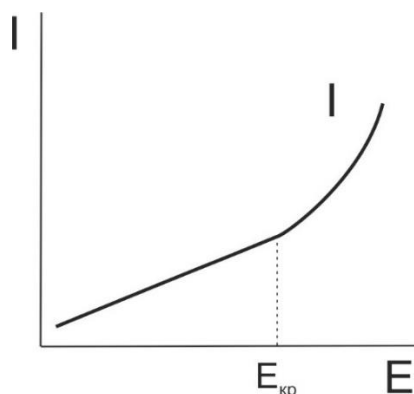


Рис. 3.4. Вольт амперна характеристика рідких діелектриків

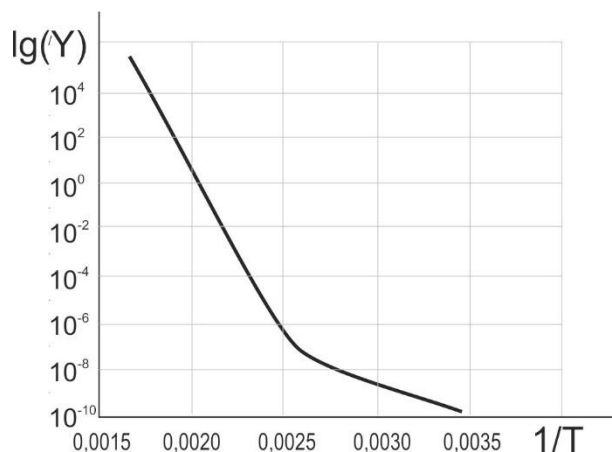


Рис. 3.5. Залежність $\lg \gamma$ від оберненої абсолютної температури при двох значеннях енергії активації 0,5 еВ для домішкових іонів і 2,7 еВ для власних іонів.

У вузькому інтервалі температур електропровідність рідких діелектриків можна описати такою експоненціальною залежністю від температури

$$\gamma = \gamma_0 \exp(\alpha t^0),$$

де γ_0 – провідність рідкого діелектрика при 0 °С (на відміну від наведених вище формул, де передекспоненційний множник відповідав γ_{∞} і ρ_{∞}); α – постійна величина для даного рідкого діелектрика; t^0 – температура.

Ступінь дисоціації молекул рідкого діелектрика зростає з полярністю основної рідини і домішки, що дисоціює, а також з температурою, що приводить до відповідного падіння питомого опору при підвищенні температури. При цьому, електропровідність рідкого діелектрика залежать також від напруженості електричного поля в діелектрику, зростаючи при її збільшенні в результаті підвищення ефективності дисоціації.

В неполярних рідинах, що складаються з частинок, в яких центри однакових за величиною позитивних і негативних зарядів за відсутності електричного поля співпадають, **дисоціюють лише домішкові молекули. Тому електропровідність таких рідин залежить в основному від концентрації полярних домішок, в т.ч. вологи.**

При тривалій експлуатації поряд з дисоціацією іоногенних домішок у рідких неполярних діелектриках відбувається **електролітична дисоціація вільних**

органічних кислот і води, що утворилися в результаті термоокислювальної деструкції самої речовини, що приводить до зниження питомого опору діелектрика.

Рафіновані (старанно очищені від домішок) неполярні рідини мають дуже низьку провідність (до 10^{-17} См·м⁻¹), **для технічних неполярних** рідких діелектриків, питома електропровідність значно нижча і знаходиться в межах 10^{-10} – 10^{-14} См·м⁻¹.

В полярних рідинах (центри позитивних і негативних зарядів частинок за відсутності електричного поля не співпадають і знаходяться на відстані один від одного, утворюючи диполь) – електропровідність визначається не тільки дисоціацією молекул домішок, але й **термічною та електролітичною дисоціацією** молекул самої рідини на іони. Ступінь дисоціації **полярних рідин зростає зі збільшенням електричного моменту молекул рідини**. Внаслідок дисоціації власних молекул полярні рідини мають більшу провідність ніж неполярні.

Як правило, органічні кислоти, феноли, аміни, деякі неорганічні кислоти, основи і солі є слабкими електролітами з низьким ступенем дисоціації. Вода при кімнатній температурі теж має низький ступінь електролітичної дисоціації $\alpha = 2 \cdot 10^{-9}$, але при нагріванні до 100 °С він зростає на два порядки, що робить **воду практично відповідальною за електропровідність неполярних діелектриків**.

Концентрація вільних іонів навіть в ретельно очищених полярних рідинах набагато більша, ніж в неполярних, тому полярні рідкі діелектрики використовують в електроізоляційній техніці **тільки як конденсаторні матеріали**, коли необхідна електрична ізоляція з підвищеною діелектричною проникністю (силові та імпульсні конденсатори та ін.).

Для технічних полярних рідких діелектриків питомий опір складає 10^8 – 10^{11} Ом·м, що значно **менше ніж для технічних неполярних** рідких діелектриків.

Наслідком домішкової іонної провідності рідких діелектриків є їх **очищення від домішок** при тривалому пропусканні постійного електричного струму (електричне очищення) за рахунок переносу вільних іонів до електродів і їх нейтралізації, що приводить до підвищення опору. Тому у **процесі протікання струму при постійній напрузі** може спостерігатися процес установаження струму в часі.

Експериментальні результати свідчать, що тільки **в порівняно слабких полях** ($E < 100$ кВ/см) в рідких діелектриках переважає **іонна провідність**. При посиленні **поля** на перший план виступає **електронна емісія з катода**, на яку дуже сильно впливають поверхневі шари на електроді. Так, наприклад, **струм у толуолі** при платино-іридієвих електродах **може змінюватися на п'ять порядків залежно від того, адсорбовані на електроді іони кисню чи водню** (кисень підвищує роботу виходу, водень – знижує) (рис. 3.6).

В колоїдних¹ рідинах поряд з іонною електропровідністю може існувати *моліонна* електропровідність, яка пов'язана з переміщенням заряджених макрочастинок *дисперсної* фази (крапель, зерен, пилинок і т.п.), що має значення ϵ_r відмінне від значення цієї величини для *дисперсійного* середовища. Саме *наявністю заряду у дисперсних частинок, які називаються моліонами*, і *пояснюється стабільність суспензій* (дисперсна фаза – тверда речовина) і *емульсій* (дисперсна фаза – рідина, що нерозчинна в дисперсійній рідині). Якщо ϵ_r макрочастинки менша, ніж рідини, то вона заряджається негативно, в протилежному випадку – позитивно.

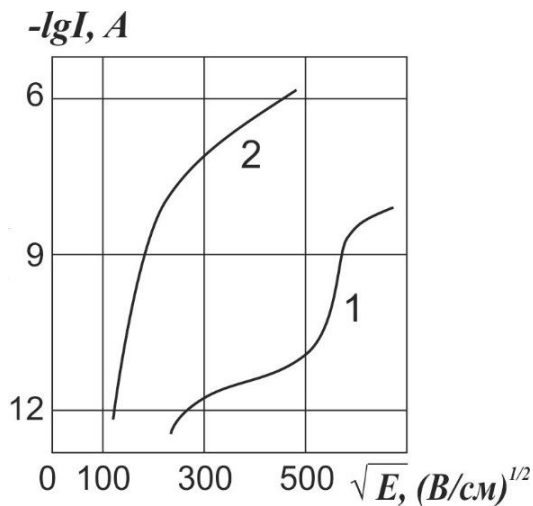


Рис. 3.6. Вольт-амперна характеристика толуолу при платино-іридієвих електродах, на яких адсорбований кисень (1) і водень (2).

В електричному полі моліони рухаються у відповідності з діючими на них зі сторони електричного поля силами, приводячи до перенесення дисперсної фази на електроди, яке супроводжується зміною відносної концентрації цієї фази в об'ємі. Таке *явище одночасного перенесення завислої речовини і заряду* називається *електрофорезом*. *На відміну від електролізу електрофорез не супроводжується утворенням нових речовин і змінами хімічного складу основного діелектрика*.

В найбільш поширеній моделі електропровідності рідких діелектриків для пояснення опору приймається, що іони або моліони рухаються в рідині з тертям. Згідно із законом Стокса сила тертя дорівнює

$$F = 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta \cdot v,$$

де η – динамічна в'язкість рідини; r – радіус частинки; v – швидкість її руху.

Тоді, враховуючи, що $F = qE$, $j = \gamma E = env$, маємо

$$\gamma = q \cdot n \cdot q / (6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta),$$

тобто рухливість

$$u = q / (6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta).$$

З рівняння для γ випливає, що *між електропровідністю і в'язкістю в рідких діелектриках може існувати зв'язок $\gamma \cdot \eta = \text{const}$* (правило Писаржевського – Вальдена), який дійсно має місце в певних температурних інтервалах.

Моліонна провідність властива рідким лакам і компаундам, зволженим оліям та іншим рідинам.

¹ Колоїдна речовина містить в собі домішки у вигляді окремих вкраплень твердої (суспензії) або рідкої (емульсії) фази.

Електрофорез використовують для покриття металів каучуком і смолами з їх суспензій, зневоднення різних матеріалів в електричному полі тощо.

Слід зазначити, що наведені закономірності електропровідності в рідинах є далеко не вичерпними. Експериментальні дані різних авторів суперечать одні іншим, і завершена картина електропровідності в рідинах відсутня.

3.1.3 Електропровідність твердих діелектриків

В *твердих діелектриках* при нормальних умовах електропровідність носить здебільшого *іонний характер*, який забезпечується домішковими іонами в неполярних діелектриках та домішковими і власними іонами – в полярних і іонних. Слід пам'ятати, що *власна іонна провідність при постійній напрузі супроводжується перенесенням матеріалу згідно законів Фарадея і зумовлює руйнування діелектрика*, а тому діелектрики з помітною власною іонною електропровідністю на постійному струмі не використовують.

Причиною появи вільних носіїв в твердих діелектриках, у відповідності з наведеним у вступній частині лекції переліком, можуть бути такі процеси:

– *іонізація* внаслідок дії часток високої енергії, наприклад космічного випромінювання та радіаційного фону Землі;

– *дисоціація* – процес розпаду молекул на іони при теплових зіткненнях, фізичній чи хімічній взаємодії;

– *термогенерація* – термодисоціація домішкових молекул на іони чи утворення слабо зв'язаних власних іонів внаслідок переходу їх в міжвузловини;

– *інжекція* – входження електронів (дірок) з електродів в діелектрик. У випадку електролітних електродів може мати місце також *інжекція іонів* з електродів.

В твердих діелектриках при нормальних умовах носії заряду, як правило, пов'язані з дефектами структури матеріалу. Основним типом дефектів в діелектриках при нормальних умовах є іонні дефекти, які рекомендується класифікувати за трьома групами.

Перша група:

– дефекти – іони, що утворились внаслідок повної іонізації домішки, концентрація яких не залежить ні від температури, ні від складу навколишнього середовища. Вони можуть бути дефектами впровадження і заміщення (рис. 3.7, а,б). При цьому має місце слабка залежність електропровідності від температури;

Друга група:

– **дефекти за Френкелем** (рис. 3.7, в), коли іон з вузла виходить у міжвузля і утворюється пара іон в міжвузлі і вакансія у вузлі кристалічної ґратки, що також можуть рухатися в електричному полі;

– **власні дефекти ґратки по Шотткі** (рис. 3.7, г), коли іон виходить на поверхню кристала і там вбудовується в кристалічну ґратку, а в об'ємі залишається протилежно заряджена вакансія, що може приймати участь в електропровідності;

– дефекти, що виникають при переході “порядок – хаос” та інші, концентрація яких визначається структурою діелектрика та температурою, але майже не залежить від складу навколишнього середовища.

Для цієї групи характерні експоненційна залежність електропровідності від температури і лінійна – від електричного поля;

Третя група:

– дефекти, концентрація яких дуже залежить від температури діелектрика та температури і складу навколишнього середовища, зокрема дефекти, обумовлені нестехіометричністю (відхиленням від формульного складу) діелектрика, дифузійними та інжекційними процесами, що зумовлюють значну нелінійність вольт-амперних характеристик діелектрика.

Електропровідність неполярних та іонних діелектриків з щільним пакуванням при помірних температурах зумовлюється, в основному, термоактивованим рухом домішкових іонів по міжвузлях.

Електропровідність полярних і іонних діелектриків з нещільним пакуванням (сюди слід віднести і аморфні іонні діелектрики) – домішковими та власними іонами, зокрема іонних діелектриків – позитивними катіонами (Ag^+ для AgCl , AgBr), негативними аніонами (Cl^- , Br^- для BaCl_2 , Ba_2), катіонами і аніонами (Pb^+ , I^- для PbI_2).

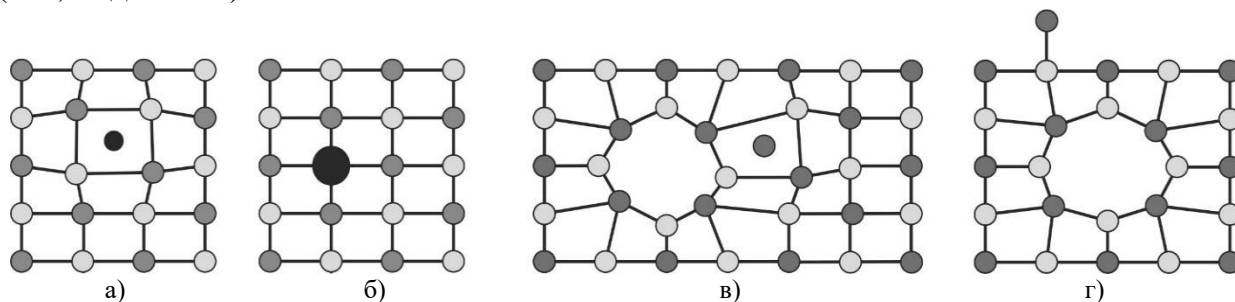


Рис. 3.7. Типи дефектів в іонних кристалах: а) – впровадження, б) – заміщення, в) – по Френкелю, г) – по Шотткі.

Електронна електропровідність поряд з іонною може мати місце в **керамічних діелектриках із змінною валентністю катіонів, а чисто електронна** – у випадку **діелектриків типу нітридів бора та кремнію і оксидів металів з великою валентністю, наприклад двоокису титану**. Крім того, електронна (діркова) електропровідність при звичайних умовах характерна для деяких сегнетоелектричних матеріалів на основі титанатів барію, кальцію, стронцію. Часто як носії заряду в таких речовинах виступають електрони не основної речовини, а електрони домішок і дефектів, зумовлених нестехіометричністю діелектрика. Наприклад, у титановмісних сегнетоелектриках такими дефектами є кисневі вакансії, що виступають як джерело дірок.

Іноді в **неорганічних ковалентних діелектриках** можлива поява вільних електронів **внаслідок переходу домішкових електронів** з донорних рівнів, які розташовані поблизу дна зони провідності, в зону провідності за рахунок флуктуацій теплової енергії.

При *високих температурах електронна (діркова)* електропровідність твердих діелектриків може бути зумовлена *термогенерацією*, тобто переходом до власної електронної провідності внаслідок підвищення температури і перекидання електронів з валентної зони до зони провідності за рахунок флуктуацій теплової енергії.

В *сильних електричних полях* електронна провідність в твердих діелектриках виникає внаслідок *ударної іонізації* при зіткненнях електронів з молекулами, атомами, чи іонами діелектрика і переходу електронів з валентної зони до зони провідності при умові, що отримана від електричного поля енергія електрона при зіткненні більша за ширину забороненої зони.

3.1.4 Контактні явища на границі діелектрик-метал

Враховуючи, що *умовою рівноваги електронів у контактуючих тілах є однакове значення їхніх рівнів хімічного потенціалу¹ (рівнів Фермі)*, можна чекати, що в наступні моменти після приведення металу і діелектрика в контакт почнеться перерозподіл зарядів між ними. Характер цього перерозподілу залежить від *різниці робіт виходу* електронів з металу ($\phi_m = 2 \dots 6$ еВ) й діелектрика ($\phi_d = 2 \dots 8$ еВ).

Якщо *робота виходу електронів з металу ϕ_m більша роботи виходу з діелектрика ϕ_d* , то електрони з діелектрика переходять у метал доти, доки не утвориться *контактна різниця потенціалів, яка дорівнює різниці робіт виходу і компенсує її*. У приелектродному шарі в діелектрику утвориться *збіднений електронами шар* (рис. 3.8 а). В сильних полях діелектрик, як правило, має власну електронну провідність (*n* – тип). Тому збіднений шар має підвищений опір і називається *запірним*. Інжекція (емісія) неосновних носіїв – дірок, що має місце в цьому випадку, не може компенсувати ріст опору внаслідок відходу електронів від площини контакту у зв'язку з тим, що *рухливість дірок у діелектриках нижча, ніж рухливість електронів*. У цьому випадку інжекція електронів може мати місце, якщо поле має відповідний напрям і достатнє, щоб забезпечити зниження бар'єру на межі електрод–діелектрик і можливість переходу електронів з електрода до діелектрика чи настільки нахилити енергетичні рівні, щоб зумовити тунелювання електронів з електрода в діелектрик.

Якщо *робота виходу електронів з металу менша, ніж з діелектрика*, то спостерігається інжекція електронів у діелектрик (рис. 3.8 б). Приелектродний шар збагачується основними носіями, і його опір знижується. Такий шар називається *антизапірним*. Електропровідність діелектрика у цьому випадку зростає за рахунок виникнення інжекційного струму.

При *інжекційному* характері провідності вольт-амперна характеристика діелектрика стає нелінійною: *квадратичною при однополярній інжекції* носіїв заряду, а також такою, що включає крім квадратичної і *кубічну залежність струму від напруги при двополярній інжекції*.

¹ Термодинамічний хімічний потенціал дорівнює зміні внутрішньої енергії термодинамічної системи при зміні числа частинок у ній на одну. У випадку металу він дорівнює максимальній енергії електронів при абсолютному нулі температури, а для діелектрика – енергії, що відповідає середині забороненої зони.

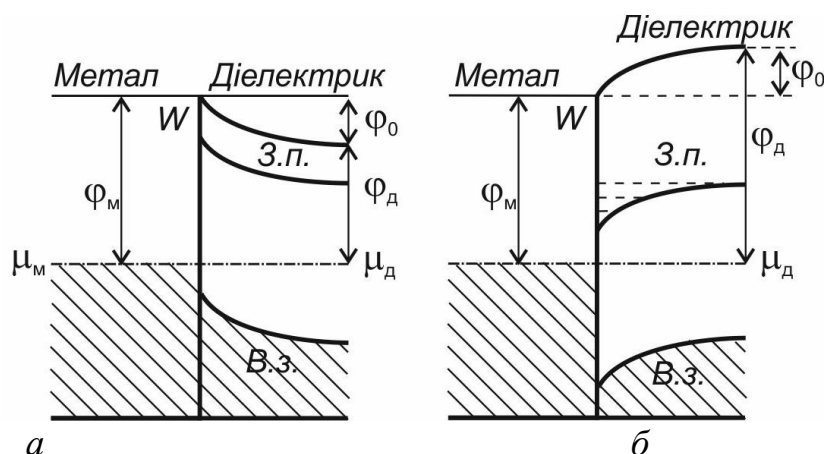


Рис. 3.8. Схематичне зображення розподілу енергії електронів на контакті метал–діелектрик:
а – $\varphi_M < \varphi_D$, б – $\varphi_M > \varphi_D$.

Однак, враховуючи невелику контактну різницю потенціалів і значні напруги, при яких працюють діелектрики, що виконують роль електричної ізоляції, вплив контактних явищ на реальні характеристики діелектричних конструкцій незначний. Вони актуальні для використання діелектриків в електронній техніці.

3.1.5 Питомий поверхневий та питомий об'ємний опори діелектрика

За нормальних умов питомий опір діелектрика має значення понад 10^8 Ом·м. Для твердих діелектриків він включає дві складові – питомий об'ємний ρ_v та питомий поверхневий ρ_s опори.

Питомий поверхневий опір матеріалу, Ом, по значенню дорівнює поверхневому опору плоскої ділянки поверхні твердого діелектрика в формі квадрата довільного розміру при протіканні наскрізного струму між двома протилежними сторонами цього квадрату:

$$\rho_s = R_s,$$

де R_s – поверхневий опір зразка матеріалу. Якщо зразок має форму прямокутника зі сторонами a (паралельна напрямку струму) і b , то

$$R_s = \rho_s \frac{b}{a}.$$

Питомий об'ємний опір матеріалу, Ом·м, за значенням дорівнює об'ємному опору куба з твердого діелектрика з ребром 1 м при протіканні наскрізного струму (постійна складова) між двома протилежними гранями цього куба. При цьому струм, що проходить по поверхні матеріалу не враховується:

$$\rho_v = \frac{R_v S}{h},$$

де R_v – об'ємний опір зразка матеріалу постійному струму, Ом; S – площа електродів, що знаходяться в контакті із зразком, м²; h – товщина зразка, м.

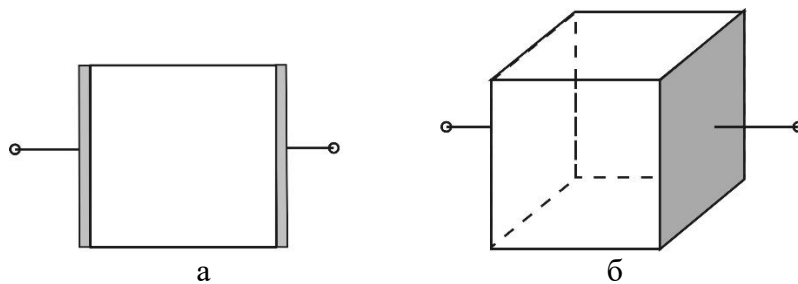


Рис. 3.9. Розташування електродів при вимірюванні поверхневого – а) і об'ємного опорів – б).

Повний опір ізоляції дорівнює

$$R_{is} = \frac{R_V \cdot R_S}{R_V + R_S},$$

і на практиці для оцінки опору ізоляції часто використовують саме це значення, відраховане на 60-й секунді після прикладання напруги.

Слід відзначити, що об'ємний і поверхневий опори вимірюються в омах, але питомий об'ємний і питомий поверхневий опори мають різну розмірність: Ом·м і Ом відповідно. Тому не можна обчислювати ефективний питомий опір за тією ж формулою, що і повний опір. Коли мова взагалі йде про питомий опір діелектрика, то, як правило, мають на увазі питомий об'ємний опір, розрахований за загальним опором діелектрика.

Необхідність введення питомого поверхневого опору зумовлена тим, що поверхня діелектрика може розглядатися як суцільний дефект – обрив кристалічної ґратки, крім того, на практиці на **поверхні діелектрика завжди є адсорбовані іони**, що утворилися в навколишньому середовищі під дією іонізуючого випромінювання, молекули води та інших забруднень, що зменшують поверхневу провідність у порівнянні з об'ємною. Особливо значна **відмінність поверхневої та об'ємної електропровідності** має місце для скляної та керамічної зовнішньої **ізоляції повітряних ліній електропередач** при прямому зволоженні її поверхні дощем, коли поверхнева провідність зменшується на порядки, а об'ємна практично не змінюється, бо скло і глазурована кераміка практично не поглинають вологу.

І хоча саме зволоження і забруднення визначають поверхневу електропровідність, враховуючи їх залежність від гідрофільності і забруднюваності діелектрика, поверхневу електропровідність вважають його характеристикою.

Для **підвищення питомого поверхневого опору** електроізоляційних конструкцій залежно від виду діелектрика **покривають його поверхню вологостійкими лаками, глазур'ю або парафіном, полірують поверхню, промивають киплячою дистильованою водою, прогрівають при досить високій температурі тощо.**

3.1.6 Вплив зовнішніх факторів на електропровідність діелектриків

Як було сказано вище, електропровідність діелектриків характеризується такими фізичними характеристиками, як **питома електрична провідність γ** , що дорівнює відношенню густини наскрізного струму до напруженості електричного поля, **чи питомий електричний опір ρ** , величина обернена питомій електричній провідності, що **є основним технічним параметром діелектричних матеріалів,**

який характеризує здатність діелектрика проводити електричний струм. Тому вплив зовнішніх факторів на електропровідність діелектриків будемо розглядати з точки зору їхнього впливу на концентрацію вільних носіїв заряду та рухливість останніх у діелектрику.

Вплив температури на електропровідність діелектриків

Найбільш *значимі фактори зовнішнього середовища*, що впливають на питому провідність твердих діелектриків – *температура T* та *вологість H* . Вони змінюють як *концентрацію* вільних носіїв заряду в діелектрикові n , так і їхню *рухливість u* , внаслідок чого

$$\gamma = e \cdot n(T, H) \cdot u(T, H) = \gamma(T, H).$$

Розглянемо більш детально вплив температури і зволоження на електропровідність діелектриків.

Збільшення температури приводить до експоненціального збільшення концентрації вільних носіїв заряду внаслідок зростання інтенсивності їх термогенерації чи ступеня дисоціації згідно з розподілом Больцмана

$$n(T) \sim \exp(-W_g / kT),$$

де W_g – енергія активації процесу *утворення* вільного носія заряду, і до зростання їх рухливості

$$u(T) \sim \exp(-W_t / kT),$$

де W_t – енергія активації процесу *переносу* носія з одного положення рівноваги в інше в рідких і твердих діелектриках.

Враховуючи це, температурна залежність питомої електропровідності діелектрика з одним типом вільних носіїв заряду описується рівнянням

$$\gamma = \gamma_\infty \exp[-(W_g + W_t) / kT] = \gamma_\infty \exp[-(W_a / kT)],$$

де W_a – енергія активації процесу електропровідності (електропереносу).

Температурна залежність провідності твердого діелектрика, що містить k типів носіїв, описується формулою:

$$\gamma(T) = \sum_{i=1}^k \gamma_{\infty i} \exp(-W_{ai} / kT),$$

де $W_{ai} = W_{gi} + W_{ti}$ – енергія активації електропровідності за рахунок i -того типу іонів.

За низьких температур електропровідність матеріалу зв'язана з *домішковими іонами*, для яких $W_g = 0$ і тому $W_a = W_t$, або дисоціацією молекул, що мають низьку енергію зв'язку, наприклад молекул домішок, а тому енергія активації електропровідності нижча. *При підвищенні температури* створюються умови для термогенерації власних іонів чи дисоціації власних молекул і електропровідність діелектрика переходить у *власну іонну електропровідність*.

Залежність електричної провідності від температури часто будують у напівлогарифмічних координатах $\ln\gamma=f(1/T)$, що дає можливість при сталій енергії активації відобразити її у вигляді прямої лінії¹.

За нахилом прямої можна визначити енергію активації електропровідності. Як правило, графік $\ln\gamma=f(1/T)$ має дві області з різною енергією активації, одну з меншим значенням W в області низьких температур, що відповідає домішковій провідності, і другу, з більшим значенням W , що відповідає власній електропровідності, в області високих температур (рис.3.9). Високотемпературна частина графіка більш стабільно відтворюється, в той час, як на хід низькотемпературної частини впливають природа і концентрація домішки. Найбільше знижують питомий опір одновалентні іони лужних металів, особливо натрій.

В електроізоляційній техніці іноді для невеликого інтервалу температур, як і для рідких діелектриків, використовують для питомої електричної провідності формулу

$$\gamma = \gamma_0 \exp(a(t^\circ - t_0^\circ)),$$

де γ_0 – питома електрична провідність при $t^\circ = t_0^\circ$ (ще раз зверніть увагу на відмінність передекспоненційного множника у даній формулі від попередньої, що базується на експоненті Больцмана), a – її температурний коефіцієнт.

Питомий опір іонних діелектриків залежить від їх структури. Для іонних діелектриків з щільним упакуванням ґратки (наприклад, кварцове скло, корундова кераміка, слюда) він дорівнює $10^{15} - 10^{17}$ Ом·м, для аморфних і кристалічних іонних діелектриків з нещільним пакуванням питомий опір набагато нижчий і складає тільки $10^8 - 10^{10}$ Ом·м.

Для *стрибкового* механізму електронної провідності діелектриків при змінній довжині стрибка по локальним рівням, розташованими поблизу рівня Фермі, зберігається термоактиваційний характер, але температурна залежність провідності дещо змінюється і описується формулою Мотта:

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-\frac{A}{T}\right)^{1/4}.$$

В сильному електричному полі ймовірність переходу через бар'єр для носіїв заряду, що утворилися внаслідок теплової генерації збільшується, й згідно Френкелю струм в діелектрику стає рівним

$$I = A \exp\left(-B \frac{W}{kT}\right) \exp\left(C \frac{\sqrt{E}}{kT}\right),$$

де A, B, C – константи.

¹ Слід зауважити, що подібний прийом застосовують, коли намагаються підібрати формулу для відображення експериментальних даних: при цьому будують графік у так званих функціональних масштабах: напівлогарифмічному, подвійному логарифмічному ($y=ax^n$, $\ln y = \ln a + n \ln x$), оберненому ($y=x/(ax+c)$, $1/y = a+c/x$) і т.п.), поки не підберуть функціональний 'масштаб, в якому експериментальна залежність спрямляється. відповідна вихідна формула і описує експериментальні дані.

Інколи більш точні значення струму в діелектрику в залежності від напруженості електричного поля дає формула Пула $I \sim I_0 \exp(AE)$.

Вплив вологи на електропровідність діелектриків

Другим суттєвим фактором, що впливає на електропровідність діелектриків, є його зволоження, яке залежить від структури і густини матеріалу, а також характеру взаємодії матеріалу з полярними молекулами води.

Вплив вологи навколишнього середовища на електропровідність діелектрика зумовлюється **сорбцією** (поглинанням) вологи поверхнею та об'ємом твердого тіла. **Поверхнева сорбція вологи (адсорбція)** і, особливо, утворення на поверхні матеріалу молекулярної плівки води і дисоціація її молекул, приводять до збільшення **поверхневої провідності** матеріалу, а **об'ємна сорбція (абсорбція)** збільшує і його **об'ємну провідність**. Зростання провідності відбувається внаслідок як **дисоціації** молекул води на іони H^+ та OH^- , так і **розчинення домішок та матеріалу** діелектрика в воді при значному зволоженні.

Неполярні діелектрики не змочуються водою, тому підвищення вологості навколишнього середовища майже **не відбивається на їхній поверхневій та об'ємній провідностях**.

Полярні діелектрики змочуються водою, і тому їхня **поверхнева і об'ємна провідність в значній мірі залежать від вологості** та від поверхневих забруднень.

Найбільш чутливі до вологи діелектрики з відкритою пористістю, пори яких не тільки звожуються поверхнево, а й можуть поглинати велику кількість води завдяки **капілярному ефекту**, бо діаметр молекули води (0,276 нм) менший, ніж найдрібніші пори в діелектрику (табл. 1.5).

При використанні таких гідрофільних пористих твердих, а також гідрофільних рідких електротехнічних матеріалів необхідно забезпечити їх **захист від зволоження шляхом, наприклад, просочення, герметизації або з допомогою вологонепроникного і вологостійкого покриття**.

Іонні діелектрики змочуються водою та можуть частково розчинятися в ній, тому їх **електропровідність досить чутлива до вологості навколишнього середовища**. Саме волога є основною причиною неможливості використання водорозчинних іонних діелектриків в електроустаткуванні.

Таблиця 1.5 Розмір пор у діелектриках

Матеріал	Розмір пор, нм
Пори в кераміці	$10^2 - 10^5$
Капіляри у волокнах целюлози	100
Пори в стінках волокна	1 – 10
Міжмолекулярна пористість різних матеріалів	1 – 5
Внутрішньомолекулярні пори	до 1

Вплив температури на зволожений діелектрик при її підвищенні ускладнюється наявністю **двох конкуруючих процесів: зниження опору внаслідок термогенерації носіїв заряду і підвищення опору внаслідок підсушування**. Як правило, поєднання цих двох

процесів приводить до наявності екстремумів в температурній залежності опору при нагріванні і гістерезису при зворотному ході температури (охолодженні), коли опір у порівнянні з прямим ходом значно збільшується.

3.1.7 Визначення питомих опорів діелектриків і діагностування ізоляції

На практиці визначити питомий об'ємний чи питомий поверхневий опори діелектрика можна, якщо відомі значення *об'ємного та поверхневого наскрізних струмів*. Разом з тим, при вимірюваннях не слід забувати про те, що у діелектриках окрім наскрізного струму, який не змінюється в часі, можуть протікати згасаючі з часом струми, зумовлені рухом зв'язаних зарядів: *струми зміщення та абсорбційні струми*. Якщо у технічних умовах на матеріал немає вказівок про час витримки зразка матеріалу під напругою при вимірюванні, то відлік значення струму, як вже говорилося, слід робити на 60-й секунді після прикладання напруги.

Для виокремлення в наскрізному струмі *об'ємної та поверхневої складових* при визначенні питомих опорів рекомендується використовувати *трьохелектродний вимірювальний пристрій*, що дозволяє на одному і тому ж зразку визначати питомий об'ємний та питомий поверхневий опори. Найчастіше ці параметри визначають на плоских зразках (рис. 3.10), що мають форму круга.

Якщо охоронний електрод відсутній, то при поданні електричної напруги на зразок 1 через заземлюючий електрод 2 буде протікати загальний струм I_0 , який складається з об'ємного I_V та поверхневого I_S струмів. Ці струми легко розділити і виміряти нарізно за допомогою вимірювального електроду 3 та кільцевого охоронного електроду 4, заземлюючи їх поодиноці або разом через вимірювальні прилади (гальванометри, тераомметри тощо).

Якщо відомі значення об'ємного I_V та поверхневого I_S струмів, чи відповідно об'ємного R_V та поверхневого R_S опорів, то питомий об'ємний опір для описаного випадку дорівнює

$$\rho_V = \frac{U}{I_V} \frac{\pi d_1^2}{4h} = R_V \frac{\pi d_1^2}{4h},$$

де U – прикладена напруга, а питомий поверхневий опір

$$\rho_S = \frac{U}{I_S} \frac{\pi(d_2 + d_1)}{2(d_2 - d_1)} = R_S \frac{\pi(d_2 + d_1)}{2(d_2 - d_1)}.$$

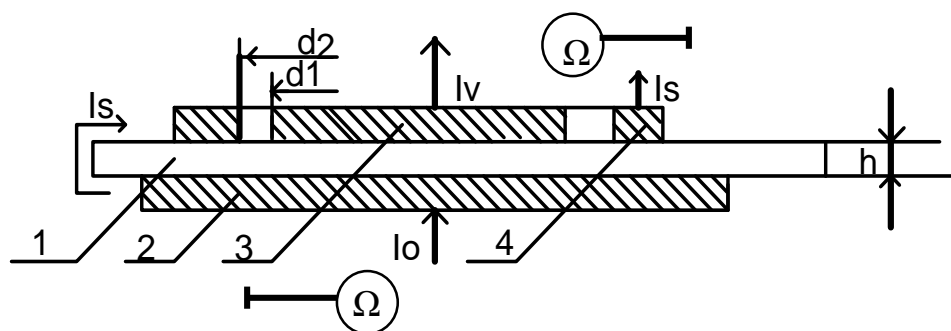


Рис.3.10. Електроди для вимірювання об'ємного I_V та поверхневого I_S струмів: 1 – зразок діелектрика; 2 – заземлюючий; 3 – вимірювальний; 4 – охоронний електроди; I_0 – повний, I_V – об'ємний, I_S – поверхневий струми, d_1 – діаметр вимірювального електроду; d_2 – діаметр охоронного електроду; h – товщина зразка діелектрика.

Незважаючи на чутливість до різних дефектів структури, *абсолютна величина опору* з метою діагностування технічного стану обладнання *використовується рідко*, бо опір є інтегральною характеристикою, що *нечутлива до локальних змін його значення, які найчастіше приводять до такої катастрофічної відмови, як пробій*.

В той же час, розподілені дефекти, наприклад, загальне зниження опору через зволоження чи обвуглювання, також можуть мати місце в ізоляції, приводячи до нагрівання і прискореного теплового старіння, а часом навіть до теплового пробою. Тому, наприклад, для обертових електричних машин вводяться мінімально можливі значення опору, залежні від потужності і робочої напруги машин. Для електричних машин потужністю до 10 МВт опір ізоляції статорної обмотки повинен бути не меншим 0,5 МОм/кВ, для більш потужних – 1 МОм/кВ.

Набагато інформативнішим є вимірювання відносних характеристик опору, серед яких найчастіше використовують омічний коефіцієнт абсорбції $k_a = R_{60}/R_{15}$, що дорівнює відношенню опору, виміряного на 60-й секунді, до опору, що вимірювався на 15-й секунді. Для силових трансформаторів потужністю менше 10 МВА і напругою нижче 35 кВ, що вводяться в експлуатацію, k_a повинен бути більшим 1,3, для більш потужних і високовольтних – не менше 1,5 – 2.

На основі досвіду роботи з твердою електричною ізоляцією прийшли до висновку, що обладнання обов'язково повинно бути виведеним з експлуатації і ізоляція піддана висушуванню, якщо k_a менше 1,2.

При використанні коефіцієнта абсорбції як діагностичного параметра слід мати на увазі, що k_a має екстремальний характер і прямує до 1 і у випадку дуже зволоженої, дефектної ізоляції, і у випадку ідеальної ізоляції. Тому, в загальному випадку, для прийняття рішення про виведення обладнання з експлуатації потрібно впевнитися в тому, що рівень електричного опору ізоляції низький, бо, в принципі, ідеальна (однорідна і бездефектна) ізоляція буде мати омічний коефіцієнт абсорбції, рівний 1, тобто менше наведеного критичного значення 1,2, але високий опір, і ніяке втручання в її роботу не буде потрібним.

Для розрахунку ефективної електропровідності механічної суміші двох діелектриків, що мають незначну відмінність в питомій об'ємній чи поверхневій електропровідності, можна використовувати формули Ліхтенекера, що наводилися для відносної діелектричної проникності, замінивши проникність на об'ємну чи поверхневу електропровідність.

ЛЕКЦІЯ 4

4.1. ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ

4.1.1 Загальна характеристика діелектричних втрат

Як говорилося вище, *кут зсуву фаз між напругою і струмом в ідеальному діелектрикові дорівнює $\pi/2$* , що відповідає чисто реактивній потужності без втрат.

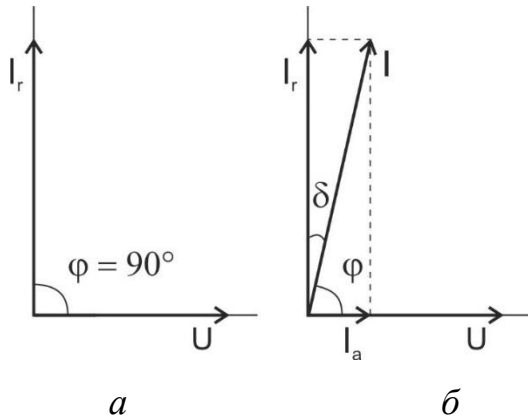


Рис. 4.1. Фазова діаграма діелектрика: а – ідеального; б – з втратами; φ – кут зсуву фаз між повним струмом і напругою, δ – кут діелектричних втрат.

Поява електропровідності в реальному діелектрикові, що відповідає складовій струму, яка співпадає за напрямом з напругою, приводить до необхідності будувати повний струм, як діагональ прямокутного паралелепіпеда, сторонами якого є реактивна (ємнісна) складова струму (ордината) і активна складова – струм електропровідності (абсциса). Внаслідок появи струму електропровідності, синфазного з напругою, *в діелектрику виникають втрати потужності, що називаються діелектричними втратами*, а між вектором

повного струму і ємнісним струмом з'являється *кут*, що називається *кутом діелектричних втрат δ* . (рис 4.1.) Таким чином,

Кут діелектричних втрат δ – кут, що доповнює до $\pi/2$ кут зсуву фаз між повним струмом і напругою

Діелектричні втрати – активна електрична потужність, що виділяється у вигляді тепла в діелектрику при дії на нього електричного поля.

До діелектричних втрат зараховують як чисто **активну потужність**, що виникає в діелектрику внаслідок **електропровідності**, так і **активну складову релаксаційних видів поляризації**, що відповідає запізненню руху зв'язаних заряджених частинок через бар'єр між рівноправними у відсутності поля положеннями рівноваги, рівноправність яких порушується полем, по відношенню до напруги.

Активну потужність в діелектрику можна записати через $\text{tg}\delta$, що дорівнює відношенню активної (резистивної) складової повного струму до реактивної (ємнісної)

$$P_a = UI_a = UI \cos \varphi = UI \text{tg} \delta = U^2 \omega C \text{tg} \delta = P_d.$$

Записана в такому вигляді, вона називається повними діелектричними втратами і характеризує втрати в електричній ізоляції електрообладнання.

Очевидно, що $\text{tg}\delta$ дорівнює відношенню активної складової будь-якої комплексної характеристики діелектрика, в першу чергу потужності, а також

струму, напруги, опору, провідності тощо до реактивної. Найпростіші вирази для $\text{tg}\delta$ дає розрахунок за адитивним (що додається при утворенні однієї системи з двох підсистем) параметром.

Для характеристики властивостей діелектрика можна використати питомі діелектричні втрати

$$p_d = P_d/V = U^2 \cdot w \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \cdot S/d) \cdot \text{tg}\delta / (S \cdot d) = E^2 w \epsilon_0 \epsilon_r \text{tg}\delta.$$

В цій формулі напруженість E і частота ω електричного поля є зовнішніми факторами, а ϵ_r і $\text{tg}\delta$ – характеристики самого діелектрика. Множник $\epsilon_r \text{tg}\delta$ повністю характеризує діелектричні втрати в даному матеріалі і називається **фактором втрат**.

Однак, враховуючи, що в лінійних діелектриках на ϵ_r , а відповідно і на $\text{tg}\delta$ для повних діелектричних втрат, слабо впливають зовнішні фактори, змінюючи їх на одиниці – десятки відсотків, в той час, як $\text{tg}\delta$ може змінюватися в десятки – сотні разів, величину $\text{tg}\delta$ часто використовують для якісної оцінки втрат електричної потужності як у діелектрику, так і в обладнанні, і для характеристики залежності інтенсивності цього процесу від температури, частоти та інших факторів. (Єдиний виняток – це частотна залежність діелектричних втрат на електропровідність, яка буде розглянута пізніше. У цьому випадку $\text{tg}\delta$ є гіперболічно спадаючою функцією від частоти, а діелектричні втрати – не залежать від неї).

В фізиці діелектриків для будь-якого типу поляризації вводиться поняття комплексної діелектричної проникності $\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon''$, де ϵ' відповідає чисто пружній поляризації з $\varphi = \pi/2$, а ϵ'' відображає активну складову поляризації з $\varphi = 0$. Тоді $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$, тобто дорівнює відношенню активної складової ϵ'' до реактивної.

Слід відзначити, що в радіотехніці замість $\text{tg}\delta$ часто використовують добротність Q для характеристики втрат в ізоляції, конденсаторах, котушках індуктивності тощо, яка зв'язана з $\text{tg}\delta$ оберненою залежністю $Q = 1/\text{tg}\delta$.

При вивченні діелектричних втрат перш за все слід звернути увагу на те, що вони відносяться до активної потужності, і що завжди супроводжуються нагріванням діелектрика. Залежно від їх характеру розрізняють такі **основні види діелектричних втрат**:

– на електропровідність – потужність електричного поля витрачається на перенесення вільних носіїв заряду, які при зіткненнях передають енергію, отриману від поля, зв'язаним частинкам діелектрика, нагріваючи його;

– релаксаційні втрати, що мають місце в області нормальної (спадаючої по експоненті) діелектричної дисперсії – потужність електричного поля витрачається на непружне зміщення зв'язаних зарядів і орієнтацію диполів, обмежене переміщення вільних носіїв заряду у процесі формування міграційної поляризації тощо, які в результаті підвищеного часу встановлення поляризації відстають від напруги і не встигають віддавати накопичену енергію в джерело напруги, а розсіюють її в діелектрику, нагріваючи його;

– резонансні втрати в області аномальної (з двома екстремумами) діелектричної дисперсії при пружній поляризації – потужність електричного поля

витрачається на надлінійне зростання амплітуди коливань частинок (спостерігаються звичайно на частотах, вищих за 10^{10} Гц,);

– втрати на переполяризацію сегнето- і п'єзоелектриків, коли втрати визначаються площею петлі гістерезису $D(E)$, що виникає в результаті не синхронної зміни D і E ;

– іонізаційні втрати – потужність електричного поля витрачається на іонізацію газу в різко неоднорідному полі або у внутрішніх газових порожнинах у діелектрику та в газових порожнинах проміжку діелектрик – електрод (спостерігаються тільки при напругах, які перевищують напругу виникнення часткових розрядів в цих газових порожнинах).

Врахування основних процесів, які відбуваються в діелектрику під час прикладення до нього електричної напруги, дозволяє визначити домінуючі види втрат у кожній групі матеріалів (рис. 4.2.).

4.1.2 Температурна залежність діелектричних втрат

Значення діелектричних втрат залежить в основному від таких зовнішніх факторів як *температура, частота і напруженість електричного поля*.

Для аналізу температурної залежності характеристик сукупності процесів, що супроводжуються втратами енергії у реальному діелектрику, можна використовувати принцип суперпозиції діелектричних втрат. На рис. 4.2 зображено температурні залежності $tg \delta$ для основних класів діелектриків з врахуванням типу процесів, що викликають діелектричні втрати.

Діелектричні втрати на електропровідність зумовлені витратами енергії на переміщення вільних носіїв заряду, тому температурні залежності діелектричних втрат і електропровідності в цьому випадку описуються однаковими законами. У широкому діапазоні температур

$$tg \delta = B \exp[-(W_a/kT)],$$

де W_a – енергія активації електропровідності.

Температурна залежність релаксаційних втрат визначається видом зв'язаних зарядів, що беруть участь у непружному зміщенні. У випадку *іонно-релаксаційної поляризації* підвищення температури приводить до експоненціального зростання концентрації зв'язаних зарядів, що беруть участь у процесі поляризації, тому іонно-релаксаційні втрати часто також *експоненціально зростають* у широкому діапазоні температур.

У випадку *дипольно-релаксаційної поляризації* діелектричні втрати пов'язані з втратами електричної енергії на орієнтацію полярних молекул. За низьких температур, коли молекули не можуть непружно орієнтуватись в електричному полі через нестачу енергії, діелектричні втрати малі. З підвищенням теплової енергії внаслідок термоактиваційного характеру процесу зростає ймовірність переходу молекул над потенціальним бар'єром між положеннями рівноваги, а з підвищенням здатності молекул орієнтуватися зростають і діелектричні втрати. Але, коли теплова енергія сягає рівня, що відповідає мінімальній енергії у менш глибокій потенціальній

ямі, то послаблюється фіксуєчий вплив бар'єра. Тоді ймовірності переходу з одного положення рівноваги в інше різко зростають і починають зрівнюватися, що приводить до зменшення часу запізнення поляризації та зменшення діелектричних втрат.

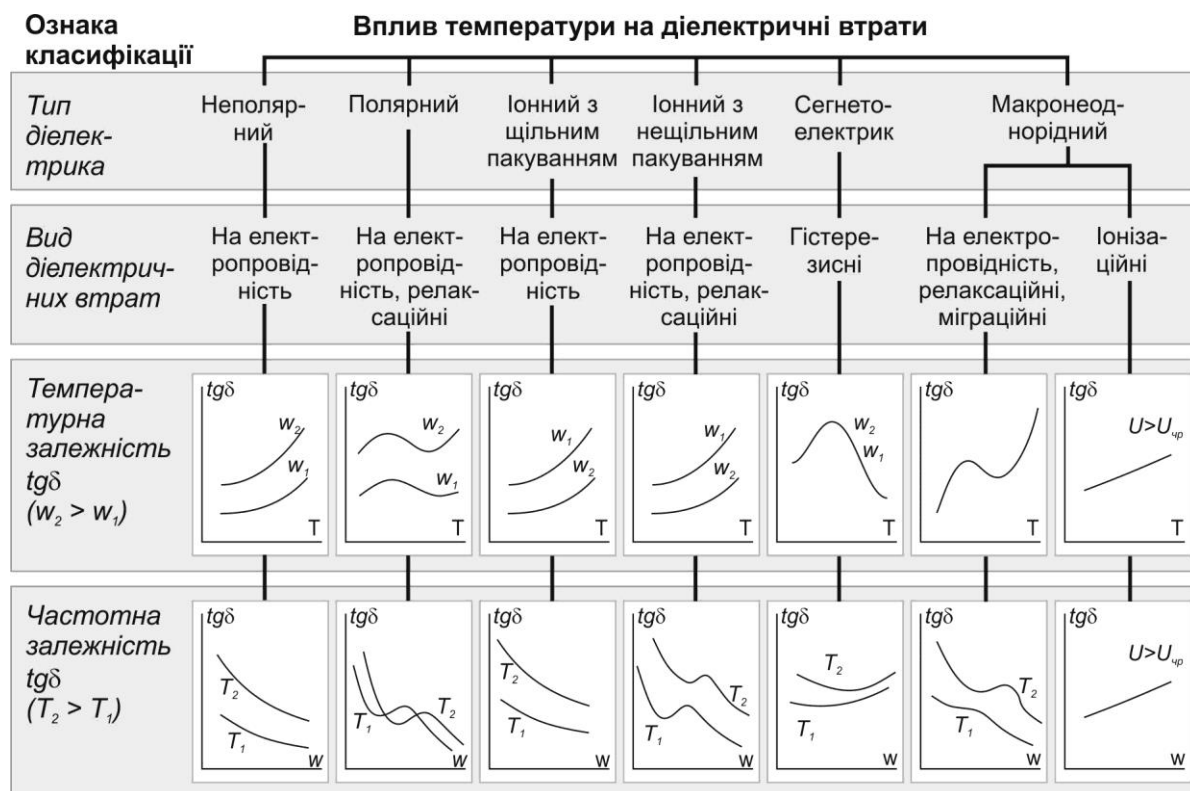


Рис.4.2. Класифікація діелектричних втрат в діелектриках

Таким чином на температурній залежності $tg\delta$ у випадку дипольно-релаксаційної поляризації повинен спостерігатися **релаксаційний максимум**, температурне положення якого визначається періодом власних коливань τ_0 , висотою бар'єра W і частотою змінного струму ω відповідно до формули

$$T_m = W / (k \ln(\omega \tau_0)).$$

При **спонтанній поляризації** найбільший вклад у діелектричні втрати вносять процеси переполіаризації доменів у силу їх гістерезисного характеру. Ці втрати, як і дипольно-релаксаційні, у залежності від температури мають максимум, положення якого, однак, не залежить від частоти прикладеної напруги.

Температурна залежність **іонізаційних втрат**, що виникають при напрузі, вищій за напругу виникнення часткових розрядів ($U > U_{кр}$), зумовлена **температурними залежностями ϵ_2 твердого діелектрика та пробивної напруги газу в порах**. У відкритих, сполучених із зовнішнім середовищем порах спостерігається **зростання іонізаційних втрат**, пов'язане зі зниженням пробивної напруги з підвищенням температури. У закритих порах, якщо відносна діелектрична проникність діелектрика не залежить від температури, іонізаційні втрати **практично не змінюються з температурою** через незалежність пробивної напруги газу від тиску в герметичному об'ємі, **або ж змінюються у протилежному до зміни ϵ_2 напрямі** при значних змінах ϵ_2 діелектрика з температурою.

4.1.3 Частотна залежність діелектричних втрат

Частотна залежність діелектричних втрат визначається інерційністю тих процесів у діелектрику, які спричиняють їх виникнення.

Відправним пунктом міркування про частотну залежність діелектричних втрат є вираз для питомих діелектричних втрат у матеріалі:

$$P_n = E^2 \varepsilon_r \varepsilon_0 \omega \operatorname{tg} \delta.$$

У випадку втрат тільки на електропровідність можна вважати, що зміна частоти електричного поля не приведе до зміни концентрації вільних носіїв заряду в матеріалі. Тому питомі діелектричні втрати $P_n = \gamma E^2$ від частоти не залежать. Тоді, прирівнюючи праві частини виразів для питомих втрат, знаходимо, що тангенс кута діелектричних втрат на електропровідність з ростом частоти повинен зменшуватись за гіперболічним законом:

$$\operatorname{tg} \delta = \gamma / (\varepsilon_r \varepsilon_0 \omega),$$

Звертаємо ще раз вашу увагу на те, що, питома потужність втрат на електропровідність, яка пропорційна добутку $\omega \operatorname{tg} \delta$, не залежить від частоти, що і відзначалося вище.

Вплив частоти на діелектричні втрати на електропровідність у матеріалі можна оцінювати, використовуючи різні підходи. Часто це питання вирішується **за допомогою паралельної або послідовної еквівалентної схеми заміщення** реального матеріалу (рис. 4.3).

Паралельну схему заміщення (рис. 4.3, а,б) можна розглядати як модель діелектрика, в якій процес пружної поляризації моделюється ємністю C_{np} , а процес електропровідності – резистивним опором R . Враховуючи, що струми пружної поляризації і електропровідності протікають паралельно, ємність і конденсатор також ввімкнені паралельно. Для обчислення $\operatorname{tg} \delta$ у даному випадку використовуємо адитивну електричну провідність. Відношення активної провідності резистора $1/R$ до реактивної конденсатора ωC_{np} дає

$$\operatorname{tg} \delta = 1/\omega C_{np} R = 1/\varepsilon_{mp} \varepsilon_0 \omega \rho = 1,8 \cdot 10^{10} / (f \varepsilon_r \rho),$$

тобто гіперболічну залежність від частоти, що дійсно співпадає з відповідною залежністю для втрат на електропровідність.

Послідовна схема заміщення діелектрика з втратами могла б моделювати міграційну поляризацію, але в ній тільки частково враховуються інерційні властивості міграційної поляризації і практично вона є формальною схемою, що може використовуватися на початковій ділянці резонансної дисперсії ε_r . Для послідовної схеми заміщення діелектрика з втратами адитивною величиною є опір, а тому $\operatorname{tg} \delta$ для неї дорівнює відношенню резистивного опору r_{nc} до ємнісного опору $1/\omega C_{nc}$, тобто

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_{nc} r_{nc},$$

що дає лінійно зростаючий $\operatorname{tg} \delta$ з частотою. Якщо врахувати, що $\operatorname{tg} \delta$ від схеми заміщення не залежить, то для напруги даної частоти паралельна і послідовна схеми

заміщення будуть давати одну й ту ж потужність втрат при малих значеннях $\text{tg } \delta$ при умові, що $C_{\text{пр}} \approx C_{\text{нс}}$, а $R = r_{\text{нс}} / \text{tg}^2 \delta$.

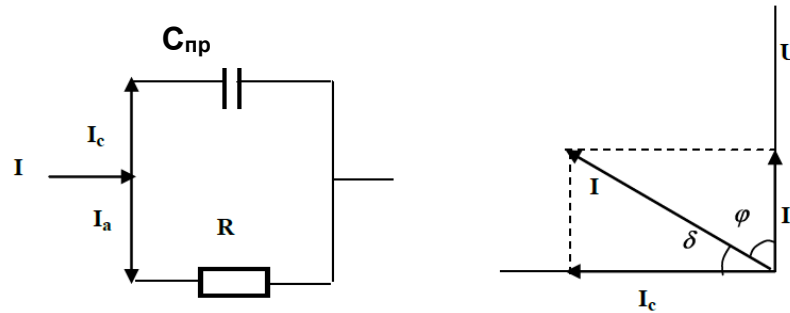


Рис. 4.3 Схема заміщення і фазова діаграма діелектрика з втратами на електропровідність.

У газоподібних діелектриках, наприклад у повітрі, $\text{tg } \delta$ для діелектричних втрат на електропровідність має значення на рівні $10^{-7} - 10^{-8}$, і не може бути вимірний сучасними приладами.

Діелектричні втрати на електропровідність характерні для діелектриків з молекулярною структурою (нафтові електроізоляційні масла, повітря, парафін тощо) і іонних діелектриків з щільним упакуванням (кварц, слюда, корунд тощо). Їх можна спостерігати при низьких частотах (до 10^3 Гц), при більших частотах $\text{tg } \delta$ стає десь по порядку величини 10^{-4} і менше. Для рідких і твердих неполярних діелектриків $\text{tg } \delta$ на промисловій частоті знаходиться в межах 10^{-4} при нормальних умовах.

Для всіх інших типів діелектричних втрат, як уже відзначалося, поведінка потужності втрат і $\text{tg } \delta$ однакова, а тому про поведінку діелектричних втрат можна судити по залежності $\text{tg } \delta$ від даного фактора.

Діелектричні втрати при релаксаційній поляризації поділяються на такі види:

- електронно-релаксаційні, що мають місце зокрема в діелектриках з іонними вакансіями, заповненими електронами;
- іонно-релаксаційні, що проявляються в іонних аморфних або кристалічних з нещільним упакуванням іонів в кристалічній ґратці діелектриках;
- дипольно-релаксаційні, що спостерігаються в полярних діелектриках молекулярної будови.
- міграційні втрати, що мають місце в неоднорідних діелектриках і проявляються в області більш низьких частот, ніж релаксаційні.

Електронно-релаксаційні втрати в електротехнічних матеріалах зустрічаються рідко, для них характерні ті ж особливості, що і для інших видів релаксаційних втрат, що розглянуті нижче.

У випадку **іонно-релаксаційних та дипольно-релаксаційних втрат на низьких частотах зв'язані заряди встигають зорієнтуватись або непружно зміститися під дією електричного поля** за час, малий порівняно з періодом його

коливань, тому діелектричні втрати низькі. Однак *при зростанні частоти* зовнішнього електричного поля до частоти релаксації зв'язаного заряду і дещо вище неї зовнішнє електричне поле витрачає все більшу частину енергії на орієнтацію або зміщення зарядів, у результаті чого *діелектричні втрати зростають* до максимуму, а за вищих частот не встигають встановлюватися і $tg\delta$ зменшується з ростом частоти. Для одного виду релаксуючих диполів при фіксованій величині бар'єра між рівноважними положеннями частотна залежність $tg\delta$ має вигляд

$$tg\delta = \omega\tau(\varepsilon - \varepsilon_\infty)/(\varepsilon + \varepsilon_\infty\omega^2\tau^2),$$

де $\tau = \tau_0 \exp(W_0/kT)$ – час релаксації.

Ця залежність має максимум при $\omega\tau = \sqrt{\varepsilon/\varepsilon_\infty}$. У разі зростання температури максимум $tg\delta$ зміщується в бік вищих частот у зв'язку із зменшенням часу релаксації при підвищенні температури.

При релаксаційних втратах $tg\delta$ суттєво вищі, ніж при втратах на електропровідність, і сягають $10^{-3} - 10^{-2}$.

В *полімерних полярних діелектриках* мають місце різновиди дипольно-релаксаційних втрат: *дипольно-групові втрати*, що зумовлені рухливістю полярних груп аморфного полімера або полімера, що кристалізується, при температурах, нижчих температури склування $T < T_c$, а також *дипольно-сегментальні втрати*, пов'язані з рухливістю сегментів молекулярних ланцюгів в аморфних областях.

В полярних діелектриках *дипольно-релаксаційні втрати* можуть спостерігатися в широкому частотному інтервалі до $10^6 - 10^{10}$ Гц. До таких самих частот спостерігаються *іонно-релаксаційні втрати*.

Часто релаксаційні діелектричні втрати накладаються на втрати на електропровідність і тоді залежність діелектричних втрат має вигляд, показаний на рис. 4.2.

Діелектричні втрати при резонансній дисперсії також мають екстремальну залежність від частоти, однак положення максимуму в цьому випадку не залежить від температури. Хоча резонансні втрати спостерігаються звичайно на частотах, вищих за 10^{10} Гц, однак ріст $tg\delta$ може розпочатися вже на частотах близько 10^7 Гц і для моделювання початкової ділянки аномальної дисперсії ε_r , як вказувалося вище, можна використати послідовну схему заміщення діелектрика з втратами.

Резонансні втрати в п'єзоелектриках, що значною мірою *пов'язані з внутрішнім тертям*, спостерігаються в області низьких частот, при цьому в деяких випадках ε_r в області резонансної дисперсії може приймати навіть від'ємні значення, тобто *п'єзоелектрик може мати індуктивний характер опору*, що дозволяє використовувати його як індуктивність.

Іонізаційні втрати, пов'язані з частковими розрядами в широкому діапазоні частот, як буде показано при розгляді іонізаційного пробою, лінійно зростають з частотою.

4.1.4 Залежність діелектричних втрат від напруженості поля

Діелектричні втрати в рідких і твердих діелектриках без порожнин в області низьких напруг не залежать від напруги, і тільки при напруженостях поля, при яких має місце ефект Пула-Френкеля, що знижує висоту бар'єра між рівноважними положеннями, і ударна іонізація, $\text{tg}\delta$ починає експоненційно зростати з напруженістю поля (рис. 4.4), як і електропровідність. Однак, діелектрики, як правило, в цій області не використовуються.

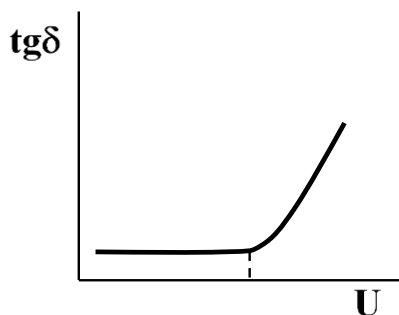


Рис. 4.4. Зростання $\text{tg}\delta$ з напругою для іонізаційних втрат функцією напруженості поля:

В той же час в різко неоднорідних полях в газах і в газових порожнинах твердих діелектриків різного розміру при певній підвищеній напруженості електричного поля, що називається напруженістю виникнення часткових розрядів $E_{вчр}$, можуть спостерігатися часткові розряди, що приводять до іонізаційних втрат. Іонізаційні втрати при напругах, більших $E_{вчр}$, можна описати лінійною функцією частоти і степеневою

$$P = Af(E - E_{вчр})^m,$$

де A – коефіцієнт, що залежить від виду матеріалу, конструктивних особливостей, геометричних розмірів і дефектності діелектрика; $E_{вчр}$ – напруженість поля, за якої стають можливими іонізаційні процеси; m – емпіричний коефіцієнт, для втрат в газах $m = 3$, для часткових розрядів у твердих діелектриках при змінній напрузі для невеликої порожнини з одиничним частковим розрядом теоретично $m = 1$, для більших і розподілених за розміром порожнин $m = 3...8$, при постійній – $m = 10...14$.

При $E > E_{вчр}$ $\text{tg}\delta \sim E^{m-2}$ тому що реактивна потужність пропорційна E^2 , а потужність, що витрачається на часткові розряди пропорційна E^m . Для порожнини з одиничним розрядом $P \sim E$ і $\text{tg}\delta \sim E^{-1}$.

Часткові розряди і іонізаційні втрати, що пов'язані з ними, приводять до руйнування діелектрика і його іонізаційного пробою і більш детально їх дія на діелектрики будуть розглянуті у відповідному розділі.

4.1.5 Використання $\text{tg}\delta$ для діагностування електричної ізоляції

Тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$ є більш чутливою характеристикою для діагностування технічного стану електричної ізоляції електрообладнання, ніж відносна діелектрична проникність ϵ_r , тому що $\text{tg}\delta$ змінюється в значно ширших межах при зміні зовнішніх факторів.

Зміна значення $\text{tg}\delta$ в процесі експлуатації дозволяє судити про висушування, зволоження і обвуглювання електричної ізоляції, втрату пластифікатора, появу полярної чи провідної домішки, утворення пухирців газу в рідких діелектриках,

тріщин чи пор в твердих тощо. Для цього використовують як абсолютну величину $\text{tg}\delta$, так і його залежність від температури, частоти і напруги.

Найбільшим недоліком використання $\text{tg}\delta$, як діагностичного параметра, є інтегральний, усереднений по всьому об'єму характер його значення, що має місце і для багатьох інших неруйнівних електрофізичних величин, які використовують для діагностування ізоляції, наприклад для ємності, опору ізоляції. Для більшої конкретизації діагностичної інформації, наприклад інформації про зростання $\text{tg}\delta$, доцільно використовувати різний характер залежностей $\text{tg}\delta$ від частоти і температури при діелектричних втратах на електропровідність і на релаксаційну поляризацію. В першому випадку $\text{tg}\delta$ буде в будь-якому разі зростати з температурою і спадати з частотою, в другому, все буде залежати від того, на підйомі чи на спаді релаксаційного максимуму знаходиться $\text{tg}\delta$. Але навіть, якщо релаксаційний $\text{tg}\delta$ має однакову поведінку з $\text{tg}\delta$ на електропровідність, кривизна залежностей $\text{tg}\delta$ для цих явищ буде різною.

Найбільш ефективним для діагностування високовольтної ізоляції в даний час є використання іонізаційних діелектричних втрат, пов'язаних з частковими розрядами. В деяких видах ізоляції, наприклад *в паперово-оливній, часткові розряди не допускаються* навіть при випробувальних напругах. В цьому випадку визначення напруги виникнення часткових розрядів і відповідний вибір робочої напруги гарантує надійну роботу обладнання. В інших видах ізоляції в процесі експлуатації можуть бути часткові розряди певної інтенсивності, і саме її зростання є ознакою руйнування ізоляції.

4.2 ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ

4.2.1 Класифікація видів пробою

Пробій – явище утворення в діелектрику провідникового каналу під дією електричного поля.

Перш за все, зауважимо, що пробій – це процес переходу від стану з низькою електропровідністю до стану з високою електропровідністю. Процес протікання стаціонарного струму в діелектрику до чи після пробою називається розрядом.

Різниця в електропровідності діелектрика до пробою і провідникового каналу, що утворився в діелектрику внаслідок пробою, може складати до 10^{15} раз, бо електропровідність діелектриків за визначенням менше 10^{-8} $\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$, а провідників близько 10^7 $\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$. Якщо врахувати, що теплова швидкість носіїв заряду при кімнатній температурі для іонів має величину порядку 10^3 м/с, для електронів – 10^5 м/с, а максимально досяжна швидкість $3\cdot 10^8$ м/с, то з формули для питомої електричної провідності $\gamma = qni$ стає зрозумілим, що забезпечити таке її зростання можна тільки за рахунок збільшення концентрації вільних носіїв заряду.

Тому, при вивченні пробою, перш за все необхідно встановити *механізм збільшення концентрації вільних носіїв заряду в діелектрику*. Залежно від

природи процесів, що зумовлюють утворення провідникового каналу, в літературі розрізняють такі **види пробою**:

- електричний;
- тепловий;
- поверхневий;
- іонізаційний;
- електрохімічний;
- електромеханічний.

Така класифікація, як буде показано нижче, не зовсім точна з фізичної точки зору, але вона зафіксована в рекомендаціях МЕК, і тому її необхідно дотримуватися в інженерній діяльності.

Пробій – це **порогове явище**: для того, щоб він відбувся, напруга повинна перевищувати певне порогове значення.

Мінімальна напруга, при якій відбувається пробій діелектрика, називається пробивною напругою, а мінімальна напруженість однорідного електричного поля при пробіі – електричною міцністю діелектрика.

Таке визначення робить електричну міцність однозначною характеристикою діелектрика, в той час як пробивна напруга характеризує електроізоляційну конструкцію. Зв'язок між ними в однорідному полі описується звичайною формулою: $E_{np} = U_{np}/d$. Мінімальну напруженість електричного поля в неоднорідному полі, що приводить до пробою, в силу її неоднозначності **краще називати пробивною напруженістю поля**.

Слід зауважити, що в техніці високих напруг **електричною міцністю ізоляції називають максимальну випробувальну напругу, що витримується цією ізоляцією**, на відміну від **електричної міцності діелектрика**, що характеризується **мінімальною пробивною напруженістю поля в однорідному полі**.

Пробій діелектриків в постійному або змінному електричному полі пов'язують із **різким нестационарним зростанням електричної провідності або**

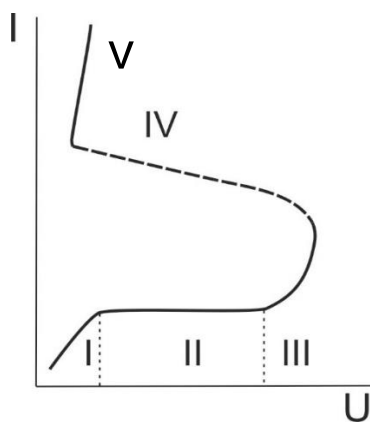


Рис. 4.5. Вольт-амперна характеристика пробою.

діелектричних втрат на електропровідність. На рис. 4.5 до пробою відносяться області вольт-амперної характеристики 4, де диференціальна провідність $\gamma = dj/dE$ від'ємна, і 5, де струм в діелектрику обмежується опором зовнішнього кола.

Причина їхнього зростання полягає в різкому збільшенні концентрації носіїв заряду внаслідок або ударної іонізації, або розігрівання діелектрика. Відповідно до механізму збільшення концентрації носіїв заряду розрізняють електричну й теплову форми пробою діелектриків. Крім того, пробій

може проходити по межі, що відділяє діелектрики в різних агрегатних станах, чи по межі між діелектриками в різних фазах, тоді він називається поверхневим. **Поверхневий пробій**, як правило, є **різновидністю електричного пробою**.

При розгляді **електричного пробою** необхідно враховувати, що він визначається **максимальною напруженістю електричного поля** і при змінному струмі відбувається при максимальних значеннях напруги, в той час як **тепловий пробій зумовлений діючою напругою**, як такою, що відповідає за нагрівання діелектрика. Розрядний струм в провідниковому каналі при пробіі обмежується тільки опором зовнішнього по відношенню до діелектрика кола.

Хоча в літературі використовують поняття про **іонізаційний і електрохімічний види пробою**, однак, як правило, у цих випадках **мова йде про старіння**, тобто підготовчі процеси, що приводять до погіршення електроізоляційних властивостей матеріалу. Сам же **пробій** в кінці процесу утворення дендриту (порожнистого чи провідникового каналу), скоріше всього, відбувається за одним із основних механізмів пробою, швидше за все **електричним**, за винятком випадку, коли в іонному діелектрику внаслідок електролізу утворюється металевий провідниковий канал, що закорочує електроди.

Дискусійним є питання про можливість **електромеханічного пробою** полімерів, пов'язаного з нестаціонарною деформацією в електричному полі. Справа в тому, що пробій це електричне явище, за визначенням пов'язане з **утворенням провідникового каналу**, а **критерієм механічного пробою є нестаціонарна деформація діелектрика і механічне руйнування**, яке супроводжується електричним пробоєм, коли товщина діелектрика зменшиться настільки, що прикладена напруга стане дорівнювати пробивній. На наш погляд, така нестаціонарна деформація полімерів, серед яких є досить жорсткі, не можлива і електромеханічний пробій при нормальних умовах не реалізується.

Можливо, як електромеханічний пробій іонних і ковалентних діелектриків можна розглядати поверхневий електричний пробій на дуже коротких імпульсах напруги, коли канал розряду заглиблюється в твердий діелектрик, що супроводжується механічним руйнуванням діелектрика внаслідок механічної дії каналу пробою при його розширенні, але це питання дискусійне.

В залежності від ступеня завершеності пробій розглядають як **повний**, коли канал пробою проходить від електрода до електрода, **неповний**, коли канал пробою не досягає іншого електрода і **частковий**, коли він обмежений областю підвищеної напруги в різко неоднорідному полі або розмірами внутрішніх порожнин у діелектрику.

При вивченні пробою діелектриків рекомендується керуватися схемою, що зображена на рис. 4.6.



Рис. 4.6. Класифікація основних видів пробою діелектриків

4.2.2 Умови, необхідні для пробою діелектрика

Слід зазначити, що уявлення про пробій як явище, пов'язане лише з різким зростанням струму (саме така умова часто висувається як критерій пробою при теоретичному розгляді процесу), є не повним. **Характерною рисою пробою є нестационарний характер струму**, його наростання при спаді напруги на ізоляції, тобто наявність негативної ділянки вольт-амперної характеристики. Тому при пробі, **крім процесу, відповідального за наростання струму, повинен існувати процес, що забезпечує дію позитивного зворотного зв'язку в пробивному проміжку**.

Як формальна модель електричного пробою може бути використаний підсилювач з додатним зворотним зв'язком (рис. 4.7), струм I на виході якого зв'язаний з вхідним струмом I_0 , коефіцієнтами підсилювання k та зворотного зв'язку γ співвідношенням

$$I = I_0 k / [1 - \gamma(k-1)].$$

Умовою необмеженого зростання струму, що на практиці обмежується опором зовнішнього кола, або переходу до режиму генерації (тобто пробою) є виконання рівності $I = \gamma k - 1$.

Із цієї аналогії випливає, що пробій можливий, якщо існують:

1) **початковий струм i_0** – ініціювальний процес, що забезпечує електропровідність діелектрика і зумовлений наявністю вільних заряджених частинок в будь-якому діелектрику, поява яких пов'язана з дією на діелектрик зовнішніх іонізуючих факторів, а також інжекцією носіїв заряду з електродів, тобто, ще раз підкреслюємо, діелектрик, що пробивається, не може не проводити електричний струм;

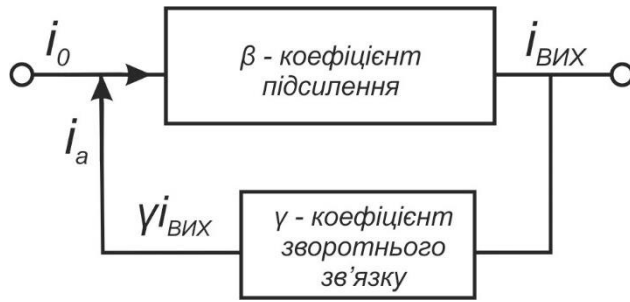


Рис. 4.7. Формальна схема явища пробую

2) *механізм зростання концентрації носіїв заряду* – первинний процес, що забезпечує підсилення струму в розрядному проміжку згідно із співвідношенням $i=i_0 k$, де k – коефіцієнт зростання струму;

3) *механізм зворотного зв'язку* – вторинний процес, що, як правило, зводиться до запізненої регенерації носіїв на зміну тим, що перенесені полем на електроди, за

рахунок процесів на катоді і в об'ємі діелектрика;

4) *певне співвідношення інтенсивності первинних і вторинних процесів*, яке виражається умовою пробую.

Наведена модель полегшує розуміння закономірностей розвитку електричного пробую та залежності пробивної напруги від тиску газу, величини міжелектродного проміжку (закон Пашена), температури, форми поля (коронний розряд).

Для надійної роботи електричної ізоляції *робоча напруга вибирається значно меншою за пробивну*, наприклад, для лінійних ізоляторів на 10 кВ пробивна напруга більша 80 кВ, *тобто коефіцієнт запасу* за електричною міцністю ізоляції, що дорівнює $U_{пр} / U_{роб}$, для ізоляторів *більший 8*.

Перш ніж вивчати окремі форми пробую доцільно розглянути всі основні процеси, які можуть відігравати роль ініціювальних, первинних і вторинних при пробую електричної ізоляції

4.1.3. Елементарні процеси при пробую діелектриків

Ініціювальні процеси

Ініціювальні процеси, що зумовлюють початкову провідність і пов'язані з дією іонізуючих випромінювань на діелектрик, були розглянуті в розділі, присвяченому електропровідності. Ще раз звертаємо вашу увагу на *неприпустимість визначення діелектрика, як речовини, що не проводить електричний струм, як це робиться в фізиці*. Якби це мало місце на практиці, то в діелектриках, що не проводять електричний струм, не міг би розвиватися ні електричний, ні тепловий пробій. В такому випадку можна було б говорити про значне зменшення розмірів електрообладнання, можливо навіть про мікроелектроенергетику. Насправді, всі діелектрики пробиваються, а значить мають початкову електропровідність. Таким чином, ще раз наголошуємо, що *в принципі немає речовин, які б не проводили електричний струм*, тому що космічне випромінювання, тепла генерація дефектів і емісія з електродів в будь-якому діелектрику призводять до утворення вільних носіїв заряду.

Залежно від форми й матеріалу електродів і характеристик газу протікання струму в газовому проміжку і його пробій можуть бути обумовлені різним сполученням елементарних процесів.

До **ініціювальних** процесів в загальному випадку можна віднести наступні:

- іонізація космічними променями і іншими іонізуючими випромінюваннями;
- вторинна іонно-електронна емісія;
- автоелектронна емісія;
- фотоемісія електронів з катода;
- термоемісія електронів;
- термічна іонізація й дисоціація молекул;
- кінетичне вибивання електронів з катода нестабільними або нейтральними частками з великою швидкістю;
- іонізація молекул позитивними іонами;
- хімічні процеси.

Зауважимо, що мова йде саме про умови виникнення пробою, а не вид розряду, який встановлюється після пробою, тому в переліку елементарних процесів при пробі найсуттєвіші фактори, які мають місце при пробі, поставлені на перші місця, і саме їх ми будемо аналізувати більш детально при розгляді пробою діелектриків в різних агрегатних станах.

Ініціювальні процеси супроводжуються генерацією носіїв заряду обох знаків, а тому включають як іонізацію, так і рекомбінацію заряджених частинок, і, при відповідних умовах, встановлення рівноважної концентрації.

Ще одне зауваження відносно ініціювальних процесів. Позитивні іони, що утворюються в газі при іонізації його іонізуючим випромінюванням, попадаючи на катод і нейтралізуючись на ньому, генерують фотоелектрони. Ці електрони, також можуть бути віднесені до ініціуючих і відповідати за пробій.

В конденсованих (рідких і твердих) діелектриках як ініціуючі процеси можуть виступати процеси електролітичної дисоціації, термогенерації іонів і електронів, емісії з електродів в сильних електричних полях, яка відбувається значно інтенсивніше, ніж в газоподібних діелектриках, внаслідок зниження роботи виходу в конденсований діелектрик в ϵ_r раз.

Первинні процеси

Первинні процеси, тобто процеси збільшення кількості носіїв заряду, цілком пов'язані з діелектриком. До них відносяться, насамперед такі:

- ударна іонізація електронами;
- просторова фотоіонізація самим розрядом;
- термічна іонізація й дисоціація молекул;
- термогенерація, що характерна, як правило, для конденсованих речовин.

Ударна іонізація електронами відбувається при зіткненні електронів, прискорених сильним електричним полем, з нейтральними частинками газу чи рідини. Для того, щоб ударна іонізація відбулася, електрон повинен отримати від

поля енергію, що дорівнює або перевищує енергію іонізації нейтральної частинки, тобто енергію зв'язку електрона в ній.

У *конденсованих середовищах* основні уявлення про *ударну іонізацію* залишаються в основному ті ж, але замість звільнення електронів мова йде про їх *перекидання з валентної зони в зону провідності*. Спочатку електрон прискорюється в електричному полі, гублячи незначну частку своєї енергії при пружних зіткненнях і віддаючи її практично повністю при непружному зіткненні, внаслідок якого в зону провідності перекидається ще один електрон.

У твердих тілах *замість позитивних іонів при іонізації утворюються дірки*, що також можуть брати участь у переносі заряду. Хоча рух дірок фактично зводиться до естафетного руху електронів, при теоретичному розгляді дірки доцільно уявляти частинками з позитивним зарядом і визначеною за прискоренням ефективною масою, як правило більшою ефективною маси електрона. Через меншу рухливість дірки набувають в електричному полі меншу кінетичну енергію в порівнянні з електронами. Однак *у сильних електричних полях ця енергія може виявитися достатньою для ударної іонізації дірками*.

Ударна іонізація в конденсованому середовищі через високу густину речовини *приводить до* утворення на шляху проходження лавини *потужного об'ємного позитивного заряду*. Тому, по-перше, через гальмуючу дію цього заряду, що втягує електрони, *лавина швидко перетворюється в стример* (див. нижче), що є практично нейтральним плазмовим каналом з високою провідністю, і, по-друге, у *голівки стримера, що має значно менший опір, ніж неіонізований газ, а тому служить своєрідним продовженням катода і сприяє спотворенню поля, виникає область підвищеної напруженості поля, що приводить до посилення первинних процесів*, а також виникнення зворотного стримера, що можна розглядати як прояв дії *вторинних процесів*.

Фотоіонізація, як первинний процес можлива, наприклад, у суміші газів при наявності у деяких атомів або молекул звичайних збуджених станів з енергією, що перевищує енергію іонізації інших окремих компонентів діелектрика. Для фотоіонізації необхідне ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі $1,234 \cdot 10^{-4} \varphi_i$ мкм, де φ_i – енергія іонізації.

Фотоіонізація, що виникає при нейтралізації позитивних іонів і електронів в лавині, виділенні фотона з енергією, що дорівнює енергії іонізації, і поглинанні цього фотона іншою нейтральною молекулою і її іонізацією тільки переносить іонізацію електроном в інше місце, замінює її на іонізацію фотоном, і може поширювати лавину, приводити до утворення дочірньої лавини і стримерного пробою. Але в результаті фотоіонізації, пов'язаної з нейтралізацією електронів і позитивних іонів в лавині, кількість утворених в процесі пробою електронів не змінюється, тому вона не може бути віднесена до первинних процесів, і основним процесом, що збільшує концентрацію носіїв заряду при електричному пробое є ударна іонізація.

Термоіонізація. У випадку *іскрового розряду чи дуги* внаслідок розігрівання газу електронами й іонами при високій густині струму, що має місце при таких розрядах, температура газу може досягати досить високих значень ($T > 6000 \text{ K}$), при яких основною стає *термоіонізація*.

Значно нижчі температури (порядку сотень – тисячі градусів Кельвіна) потрібні для *термогенерації* носіїв заряду у *конденсованих середовищах*. Тому розігрівання конденсованого діелектрика в сильному електричному полі може викликати різке збільшення концентрації носіїв заряду і привести до нестационарного зростання струму, що має місце при тепловому пробі.

Нагрівання конденсованого діелектрика відбувається внаслідок активних втрат енергії P , зумовлених у постійному електричному полі *електропровідністю*, а в змінному – *електропровідністю й релаксаційними втратами*. У випадку постійного поля

$$P = \gamma E^2,$$

де γ – питома провідність діелектрика, а для змінного

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

де ω – частота напруги; ε – відносна діелектрична проникність ізоляційного матеріалу; ε_0 – діелектрична проникність вакууму (електрична стала); $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат.

При *термоактиваційному характері електропровідності* значення електричної провідності на постійній напрузі, як було показано у розділі «Електрична провідність», *експоненціально зростає при нагріванні* діелектрика в результаті збільшення концентрації носіїв, а інколи і рухливості. Це, як буде показано нижче, при певних умовах може бути причиною *теплогового пробі*.

Якщо в діелектрику в області кімнатних температур переважають дипольно-релаксаційні втрати, то $\operatorname{tg} \delta$ проходить через максимум. Якщо максимум $\operatorname{tg} \delta$ буде незначний, то *тепловий пробі за рахунок дипольно-релаксаційних втрат буде неможливим*, доки не зростуть втрати на електропровідність настільки, що відбудеться порушення теплової рівноваги, про що детальніше мова буде пізніше. Тому, відповідно з визначенням, до *первинних процесів* варто відносити тільки випадок розігрівання діелектрика внаслідок *діелектричних втрат на електропровідність та релаксаційних втрат в іонних кристалах з нещільним упакуванням*. Орієнтуватися на $\operatorname{tg} \delta$ при виборі стійких до теплового пробі *полярних діелектриків* не варто.

Зазвичай у газових розрядах коефіцієнт термоіонізації $\alpha_T \ll 1$ і *основну роль у збільшенні концентрації носіїв заряду відіграють ударна й, значно рідше, у сумішах газів, фотоіонізація*.

Вторинні процеси

Як було вже відзначено, наявність *вторинних процесів, що компенсують відхід носіїв заряду на електроди* або, інакше кажучи, забезпечують *запізнілу*

генерацію носіїв заряду в діелектрику і їх наявність незалежно від зовнішніх іонізаторів, є необхідною умовою підтримання і стаціонарності струму пробую.

До вторинних процесів відносяться:

- вторинна іонно-електронна емісія з катода;
- фотоемісія електронів з катода;
- кінетичне вибивання електронів з катода нестабільними або нейтральними частками з великою швидкістю;
- іонізація молекул позитивними іонами;
- хімічні процеси;
- вторинне зіткнення метастабільних атомів чи молекул;
- іонізація в полі об'ємних зарядів позитивних іонів та електронів, в тім числі автоелектронна емісія з катода;
- термоавтоелектронна емісія розігрітого розрядним струмом катода під дією поля позитивного об'ємного заряду, що накопичений біля катода в процесі розряду.

Найбільш суттєвим вторинним процесом є **вторинна іонно-електронна емісія**, а тому розглянемо її більш детально.

Вторинна іонно-електронна емісія при малих кінетичних енергіях іонів зумовлена **фотоемісією** при дії на катод фотона, що утворився у процесі нейтралізації позитивного іона електроном з валентної зони металу катода, вихід якого пов'язаний з **потенційним вириванням електронів електричним полем іонів, їх нейтралізацією і наступною фотоемісією або Оже-нейтралізацією** позитивного іона на катоді. При Оже-нейтралізації електрон робить тунельний перехід на відповідний рівень іона, залишаючи у валентній зоні речовини електрода дірку. Дірка заповнюється одним з електронів з верхніх заповнених рівнів з енергією W_{gu} , у результаті чого утвориться фотон з енергією $\varepsilon = W_{gu} - \mu$. Якщо ця енергія перевищує роботу виходу електронів з катода, то при поглинанні фотона можлива емісія електронів.



Рис. 4.9. Вторинна іонно-електронна емісія

З наведеного опису випливає, що **при Оже-нейтралізації** наближену умову можливості іонно-електронної емісії можна записати у вигляді $W_{in} > 2\phi_{вих}$, тому що електронний перехід при нейтралізації дірки відбувається у зворотному напрямку, тобто в стан із більшою енергією зв'язку зі стану з енергією, близької до рівня Фермі й до роботи виходу. Враховуючи, що робота виходу з металів складає 2 – 6 еВ, а енергія іонізації повітря 13,6 еВ, можна ваважати, що і при фотоемісії, і при Оже-нейтралізації вторинна іонно-електронна емісія в газах може мати місце.

Коефіцієнт вторинної іонно-електронної емісії γ для підтримання розрядного струму на стабільному рівні **повинен відповідати умові пробую**

$$\gamma(e^{ad} - 1) = 1,$$

тобто **розряд в процесі формування каналу пробою повинен вийти на режим, коли він сам буде забезпечувати стартову концентрацію електронів без зовнішніх іонізаторів.**

При пробіі рідинних діелектриків часто основним вторинним процесом також вважається вторинна іонно-електронна емісія, хоч в деяких випадках враховується і емісія електронів з катода та дірок з анода, інтенсивність якої в порівнянні з газами зростає в сильних електричних полях внаслідок зменшення роботи виходу електронів з металу в рідину.

Питання про характер вторинних процесів при пробіі твердих діелектриків пропрацьовані значно менше, і в теоріях електричного пробою вони, як правило, не враховуються.

Процеси в діелектриках після пробою

Струм в сформованому каналі пробою обмежується фактично опором зовнішнього кола, а тому наслідком пробою може бути вимкнення напруги захисними засобами, руйнування чи загорання електротехнічної установки, руйнування мережі і т.п. Наслідки пробою залежать від того, наскільки точно були враховані правила безпечної експлуатації електроустаткування при його проектуванні.

Провідниковий канал, що утворюється **в газоподібних або рідинних діелектриках, швидко зникає** при вимкненні напруги внаслідок рекомбінації різнойменно заряджених частинок відповідно до співвідношення

$$n = \frac{n_0}{1 + n_0 \beta_p t}$$

де n_0 – початкова концентрація; β_p – коефіцієнт рекомбінації, і **електрична міцність** таких діелектриків **відновлюється** дуже швидко, за час менший 1 мкс після зняття напруги. Так, для газів при $n_0 \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ і $\beta_p = 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$, концентрація носіїв заряду в каналі пробою зменшиться вдвічі за 10^{-8} с. Таким чином, електрична міцність газоподібної або рідинної ізоляції швидко відновлюються після пробою, якщо відключити напругу.

В той же час пробіі твердого діелектрика **приводить до його руйнування**: в ньому утворюється наскрізний проплавлений канал, при цьому, як правило, **різниця у вигляді цього каналу для різних видів пробою не суттєва**, бо він формується внаслідок розряду ємності діелектрика і паразитної ємності кола через нього.

При повторній подачі напруги на твердий діелектрик канал пробою або зовсім не тримає її у випадку органічних діелектриків, коли поверхня каналу пробою покривається сажею, що утворилася внаслідок піролізу (розкладання без окиснення) матеріалу, або пробивається кожен раз вже при значно нижчій напрузі для неорганічних діелектриків, якщо поверхня каналу пробою не повністю металізувалася при пробіі. Таким чином, якщо електроізоляційні властивості газоподібних і рідинних діелектриків відновлюються при вимкненні напруги, то для твердих діелектриків пробіі є катастрофічним явищем.

ЛЕКЦІЯ 5

5.1 ЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРОБІЙ ГАЗОВИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

5.1.1 Елементарні процеси при пробіі газів

Роль основного ініціувального процесу при пробіі газоподібних діелектриків відіграє іонізація газу радіацією Землі, космічними випромінюваннями, ультрафіолетом тощо. Ці ж процеси зумовлюють електропровідність газоподібних діелектриків і були детально розглянуті у відповідному розділі.

Основним первинним процесом є ударна іонізація. Ударна іонізація пов'язана з тим, що в електричному полі (згадайте визначення поля!) електрони починають переміщуватися, набуваючи при цьому на довжині іонізаційного вільного пробігу додаткову енергію:

$$W_{\lambda} = e E \lambda,$$

де λ – довжина іонізаційного вільного пробігу, E – напруженність електричного поля, e – заряд електрона. Коли ця енергія стане рівною або вищою енергії іонізації атомів чи молекул газу чи рідини (табл.1), електрон при зіткненні з нейтральною частинкою іонізує її.

Слід розрізняти довжину *пружного, непружного і іонізаційного вільного пробігу* електронів. *При пружних зіткненнях* електрон віддає молекулі чи атому тільки $m/M < 5 \cdot 10^{-4}$ частину своєї енергії (m – маса електрона, M – маса молекули чи атома), а тому *до непружного чи іонізаційного зіткнення електрон зазнає десятки-сотні пружних зіткнень* з довжиною вільного пробігу λ_n (табл. 5.1), поступово збільшуючи енергію.

Таблиця 5.1 Константи A и B для розрахунку коефіцієнта α

Газ	Енергія іонізації W_i , еВ	A , пар іонів / м·Па	B , В/м·Па	Область застосовності E/p , В/м·Па	λ_n , 10^{-8} м 15° , 10^5 Па
H ₂	15,4	3,76	97,74	110–450	11,77
N ₂	15,5	9,02	257,14	75–450	6,28
CO ₂	13,7	15,04	350,38	375–750	4,19
Повітря	–	11,28	274,44	75–600	–
H ₂ O	12,6	9,77	218,04	110–750	4,18
HCl	–	18,8	285,71	150–750	4,44
He	24,5	2,26	25,56	15–110	18,62
Ne	21,5	3,01	75,19	75–300	13,22
Ar	15,7	10,53	135,34	75–450	6,66
Hg	10,4	15,04	278,2	150–450	–

При непружних зіткненнях енергія, набута електронем на довжині *вільного пробігу для непружних зіткнень* $W_{\lambda n}$, повністю передається атомам чи молекулам діелектрика. При цьому може відбуватися *збудження* атомів чи молекул, *при гашенні якого генеруються фотони* і саме тому пробивний канал *випромінює світло*.

При аналізі пробою слід враховувати, що теплова кінетична енергія електронів 0,025 еВ, а енергія іонізації – кілька еВ, тобто електричне поле при пробої повинно бути досить сильним. При достатній напруженості електричного поля, електрон може отримати від нього енергію, достатню для «вибивання» електрона з молекули чи атома, тобто **ударної іонізації**, в результаті якої і розвивається **пробій**.

Іони мають довжину вільного пробігу в 4 рази меншу, а при пружних зіткненнях втрачають половину своєї енергії. Тому вони при напруженості поля, що дорівнює пробивній, набирають енергію значно повільніше, ніж електрони, і **участі в ударній іонізації при електричному пробої діелектриків не приймають**.

В результаті ударної іонізації електроном з нейтральної частинки утворюються позитивний іон і електрон. Далі в електричному полі розганяються два електрони, первинний і утворений в результаті ударної іонізації, після того, як вони обидва здійснять ударну іонізацію – чотири, і так далі в геометричній прогресії, через що канал пробою, що формується, назвали електронною лавиною, формування якої показано на рис. 5.1.

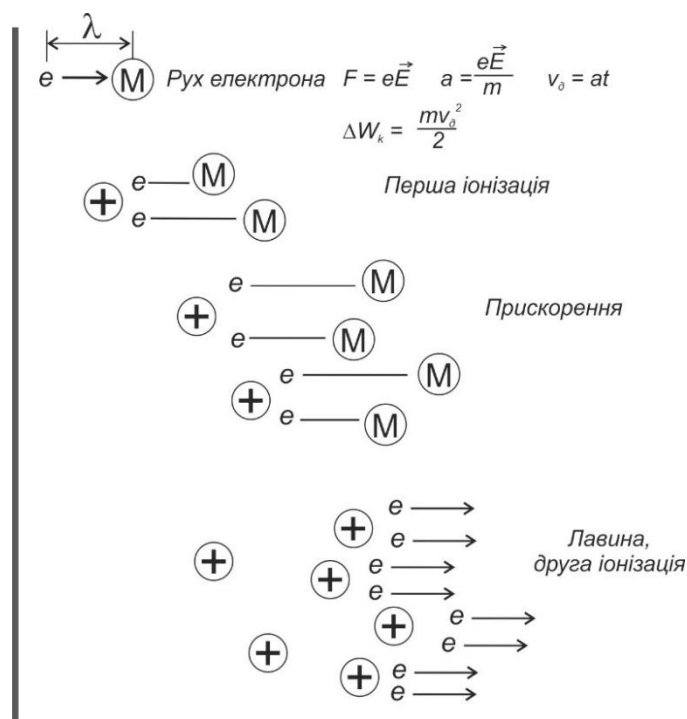


Рис. 5.1. Схематичне зображення ударної іонізації

Під дією сили, що діє на електрон з боку електричного поля і дорівнює

$$F = eE,$$

електрон рухається рівноприскорено зі швидкістю

$$v_d = e E t / m$$

де v_d – дрейфова швидкість, t – час руху, його кінетична енергія E_k зростає за рахунок виконання полем над електроном роботи $A = e \cdot E \cdot x$ і при $v_d \gg v_t$ (v_t – теплова швидкість) стає рівною

$$E_k = e^2 E^2 t^2 / (2 m).$$

Коли при $E = E_{np}$ (E_{np} – електрична міцність) для кінетичної енергії, що зростає, стане виконуватися нерівність

$$E_k = e E_{np} \lambda_i \geq W_i \quad (5.1)$$

(λ_i – довжина вільного іонізаційного пробігу, W_i – енергія іонізації), відбудеться іонізація нейтральної молекули чи атома, в результаті якої утворяться позитивний іон і ще один електрон, який також почне приймати участь в ударній іонізації і, як вже відзначалося, кількість носіїв заряду буде зростати в геометричній прогресії.

Насправді, тому що **довжина вільного іонізаційного пробігу** для даного електрона **випадкова величина**, а за постійну величину ми її приймаємо, бо користуємось середнім значенням, розсіювання якого згідно з статистикою,

набагато менші, ніж індивідуальних значень довжини вільного пробігу, **зростання струму пробою відбувається** не в геометричній прогресії, а **експоненційно**.

Кількісно **інтенсивність процесу ударної іонізації** характеризується **коефіцієнтом ударної іонізації α** , який дорівнює числу електронів, створених початковим електроном на одиницю довжини пробігу в електричному полі. У відповідності з експериментальними даними

$$\alpha = (1/\lambda) \exp(-W/eE\lambda). \quad (5.2)$$

Рівняння збільшення кількості носіїв заряду у діелектрику в результаті ударної іонізації можна записати у вигляді

$$\frac{dn}{dx} = \alpha n,$$

де n – концентрація електронів, що утворилися в результаті іонізації.

Якщо **катодом, за рахунок нейтралізації позитивних іонів**, що осідають на ньому, в тім числі і внаслідок їх руху під дією електричного поля, **внаслідок вторинної іонно-електронної емісії емітується n_0 ініціюючих електронів**, то біля анода на відстані d від катода кількість електронів у проміжку досягне величини, яку можна знайти інтегруванням попереднього рівняння по n від n_0 до n_d і по x від 0 до d

$$n_d = n_0 (e^{\alpha d} - 1). \quad (5.3)$$

Звідси випливає, що коефіцієнт розмноження електронів при електричному пробойі газів дорівнює $e^{\alpha d} - 1$.

Енергія одноразової іонізації атомів хімічних елементів лежить в широких межах від 3,86 еВ для цезію і до 24,58 еВ для гелію, молекулярних газів у вужчих – від 9,5 еВ для NO до 15,8 еВ для N₂. Для повітря розрахункова енергія іонізації складає 13,5 еВ. Оскільки повторна іонізація іонів вимагає приблизно в два рази більшої енергії, то при пробойі газоподібних діелектриків утворюються тільки однократні іони.

Аналіз експериментальних результатів, отриманих в процесі дослідження інтенсивності ударної іонізації при пробойі в газах, показує, що **відповідність між енергією іонізації й інтенсивністю ударної іонізації відсутня**, тобто коефіцієнт розмноження в тому вигляді, в якому ми його записали, не спрацьовує. Це пов'язане з істотним впливом на рух електронів у газі **явища «прилипання»**, тобто захоплення електронів молекулами з утворенням нестабільних негативних іонів.

Ефективність «прилипання» характеризується коефіцієнтом прилипання η , що дорівнює кількості захоплених електронегативними молекулами чи атомами електронів на одиницю довжини і зростає зі збільшенням спорідненості молекул газу до електрона, обмежуючи довжину вільного пробігу електрона й знижуючи інтенсивність іонізації.

Відзначимо, що методами статистичної термодинаміки можливий наближений теоретичний розрахунок коефіцієнта ударної іонізації, якщо відома функція розподілу електронів у газі за енергіями і перерізу пружних і непружних

взаємодій електронів з молекулами газу. Зростання концентрації електронів в проміжку з врахуванням «прилипання» повинно було б записуватися як

$$n_d = n_0 \left(e^{(\alpha-\eta)d} - 1 \right),$$

де α_t – теоретичне значення коефіцієнта ударної іонізації, але при використанні його емпіричних значень (табл.1) вирази для n і n_d залишають у наведеному дещо вище вигляді без явного посилання на коефіцієнт прилипання.

На практиці, через випадковий характер λ і впливу електронегативності газу на значення коефіцієнта α , про що мова буде йти трохи нижче, для його розрахунку використовують емпіричне співвідношення

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right). \quad (5.4)$$

Емпіричні параметри А і В для деяких газів наведені в табл. 1.

В залежності від виду розряду, що сформувався після пробою, як **вторинні процеси** при пробі газоподібних діелектриків можуть виступати вторинна іонно-електронна емісія (тліючий розряд), автоелектронна емісія і термоелектронна емісія з катода (дуговий розряд).

5.1.2 Вольт-амперна характеристика і види розрядів в газах

Найбільш характерним для газоподібних діелектриків є електричний пробій – тобто пробій діелектрика, що зумовлений ударною іонізацією електронами, прискореними в електричному полі.

Електричний пробій газів є найбільш описаним з явищ пробою, що вивчається з 1698 року. Проте до повної ясності в описанні газового пробою ще далеко, що пояснюється надзвичайною складністю явища й залежністю закономірностей протікання елементарних процесів у ньому від великої кількості факторів. Досить сказати, що дотепер немає єдиної класифікації розрядів у газах.

Загальне уявлення про пробій газу в проміжку при низьких тисках дає узагальнена вольт-амперна характеристика газового розряду (рис. 5.1).

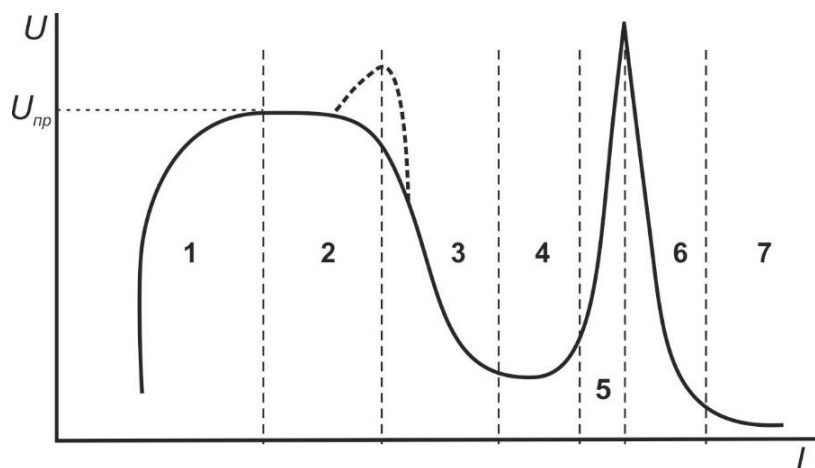


Рис. 5.1. Узагальнена вольт-амперна характеристика газового розряду: 1 – несамотійний; 2 – тихий; 3 – коронний, іскровий; 4 – тліючий; 5 – аномальний тліючий; 6,7 – дуговий.

Можна виділити наступні найбільш важливі для електроізоляційної техніки, форми розрядів у газах:

Стаціонарні:

– *тихий* (темний, таунсендівський) розряд – виникає при малих тисках газу в рівномірному електричному полі. Характеризується слабким світінням, малою величиною струму, відсутністю пульсації струму, малою щільністю об'ємних зарядів;

– *коронний* розряд в різко нерівномірному електричному полі – специфічними ознаками якого є виникнення його в місцях найбільшої напруженості поля й локалізація середнього або сильного світіння в безпосередній близькості від електродів, що формують неоднорідне поле. Для коронного розряду характерні часті імпульси струму без перекриття проміжку, більша густина об'ємних зарядів, які проте не дуже сильно додатково спотворюють існуюче нерівномірне поле в проміжку;

– *нормальний тліючий* розряд при пробіі газу при низькому тиску – з високим (сотні вольт) і майже не залежним від величини розрядного струму падінням потенціалу поблизу катода (катодне падіння), яке забезпечує вторинну іонно-електронну емісію, порівняно слабким неоднорідним по довжині проміжку світінням і стаціонарним струмом, що спочатку проходить по тонкому каналу, і зростає за рахунок розширення діаметра провідникового каналу і площі катода, охопленої розрядом, при спробах підвищення напруги, яка залишається сталою, поки розряд не покриє весь катод;

– *аномальний тліючий* розряд – характеризується стрімким зростанням напруги на проміжку після того, як розряд охопив весь катод, до величин, що інколи можуть перевищувати першу пробивну напругу, після чого відбувається другий, остаточний пробій проміжку зі звуженням каналу розряду і переходом до дуги;

– *дуговий* розряд – для якого характерні контрагування (стиснення) розрядного каналу, падаюча вольт-амперна характеристика, яскраве світіння, катодне падіння потенціалу, однак значно більш низьке, ніж у тліючому розряді, і порівнянне з потенціалом іонізації газу, авто- чи термоавтоелектронна емісія, як вторинний процес.

Відзначимо, що *на вольт-амперній характеристиці* пробією газів при низькому тиску є *дві ділянки з негативною диференціальною провідністю*: один *при переході від тихого розряду до тліючого*, інший – *від аномального тліючого до дугового*. Таким чином, при відповідному обмеженні струму, *газовий проміжок при низькому тиску може бути пробитий "двічі"*, причому остаточний пробій пов'язаний з переходом до дуги.

При підвищенні добутку відстані між електродами на тиск (цей добуток згідно закону Пашена визначає пробивну напругу газового проміжку) область тліючого розряду звужується і приблизно при $pd > 1000$ мм рт.ст.·см або $1,33 \cdot 10^5$ мм·Па зникає. У цьому випадку зразу ж після пробією у проміжку встановлюється режим дугового розряду.

Відзначимо, *що в стаціонарному розряді, що можливий лише при постійній напрузі*, не змінюється з часом розподіл поля, а також об'ємних зарядів, температури, інтенсивності елементарних процесів.

До нестаціонарних розрядів відносяться :

– *розряди при змінній напрузі низької й високої частот;*

– *імпульсний розряд при короткочасному прикладенні напруги;*

– *іскровий розряд*, що найчастіше має місце в неоднорідному полі і приводить до короткочасного перекриття розрядного проміжку провідниковим каналом, що яскраво світиться і з'являється після тихого або коронного розряду при підвищенні напруги на проміжку, а також виникає і в однорідному полі, якщо потужність джерела недостатня для підтримки режиму тліючого або дугового розряду.

– *ковзний розряд* – іскровий розряд, що розвивається *по поверхні діелектрика*, який часто виділяють в окрему форму.

Для повного пробою газового проміжку при плавному підйомі напруги розряд повинен пройти кілька стадій розвитку. В однорідному полі ці стадії проходяться в наступному порядку: *тихий розряд – лавинний розряд – [нормальний тліючий розряд – аномальний тліючий розряд] – дуга* (в дужках наведено форми розряду, що мають місце тільки при низьких тисках), а в неоднорідному: *лавинна корона – стримерна корона – іскровий розряд – дуга*.

Залежно від конфігурації поля, довжини проміжку, тиску газу й потужності джерела окремі стадії розвитку пробою можуть бути відсутніми, або умови в проміжку можуть не забезпечувати стаціонарного характеру цих форм розряду.

3.1.3 Лавинний, стримерний і лідерний пробої газів

Залежно від сполучення *ініціювальних, первинних і вторинних процесів* змінюються й закономірності пробою газових проміжків. Зараз виділяють, в основному, три форми пробою в газах: *лавинну, стримерну і лідерну*.

Лавинний пробій характерний для газів *при низьких тисках*, коли експоненціальне зростання струму забезпечується *ударною іонізацією, а вторинні процеси пов'язані з катодом* (рис. 5.2). Впливом об'ємних зарядів на протікання лавинного пробою можна знехтувати.

При більш *високих тисках* газу в каналі, що залишається після проходження лавини поблизу анода створюється *щільний позитивний об'ємний заряд*, що еквівалентно "просуванню" анода в проміжок. Це приводить до *підсилення поля між лавиною й катодом* і ослабленню його в прианодній області. При проходженні електронів через область об'ємного заряду *можлива рекомбінація позитивних іонів і електронів* з виділенням високоенергетичних *фотонів*. Через резонансний характер поглинання таких фотонів вони поглинаються поблизу хмари об'ємного заряду, іонізують газ, що супроводжується *стартом вторинних лавин і утворенням практично циліндричного каналу, що розвивається від анода до катода* зі швидкістю, що перевищує швидкість руху електронів *і називається анодним стримером* (рис. 5.3).

Якщо щільність об'ємного заряду, достатня для зниження поля між голівкою лавини й анодом до малих значень, досягається при проходженні першої

лавини в середині проміжку, то *із середини проміжку* може почати проростати *катодний стример*.

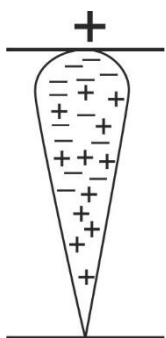


Рис. 5.2. Електронна лавина

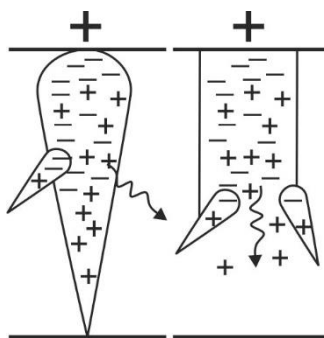
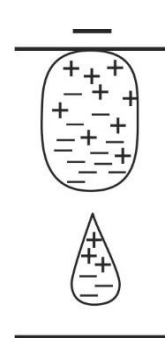


Рис. 5.3. Перехід лавини в анодний стример в однорідному полі й в катодний при катоді – вістрі.



Коли *плазмовий канал досягає катода*, то слабоіонізована область з великим опором, що залишилася після проходження первинної лавини зникає, струм у проміжку різко зростає, світіння каналу підсилюється, канал швидко перетинає весь проміжок. Розряд переходить у *стадію іскрового*. Струм у ньому деякий час підтримується *ударною іонізацією в прикатодній області*. Інша частина каналу являє собою *добре провідну плазму*, падіння потенціалу в якій досить низьке. Залежно від зовнішніх умов установлюється режим, що *відповідає тліючому розряду з іонно-електронною емісією з катода, або дузі – з термо- чи автоемісією*, як вторинним явищем.

Приблизно за такою ж схемою розвивається *лідерний розряд при блискавці: імпульсна корона, східчастий (розгалужений) лідерний розряд з боковими розгалуженнями, головний розряд (зворотний удар)*. Різниця потенціалів між хмарою і землею при блискавці сягає 10^8 В, швидкість лідера – $3 \cdot 10^5$ м/с, струм лідера – 200 – 300 А. При зворотному ударі швидкість поширення активної зони розряду зростає до 0,05 – 0,5 швидкості світла, а струм складає десятки кілоампер. Інколи від високих об'єктів на землі назустріч лідеру може розвиватися *зустрічний лідер*, тоді розряди розвиваються в обидва боки від точки зустрічі прямого і зустрічного лідерів. Більш детально закономірності лідерного пробоя розглядається в техніці високих напруг.

З технічної точки зору максимальний інтерес становить залежність пробивної напруги при пробії газового діелектрика від характеристик газового проміжку, конфігурації, матеріалу і стану поверхні електродів і форми діючої напруги. Розглянемо ці питання більш детально.

3.1.4 Залежність пробивної напруги від тиску і відстані

Пробивна напруга газового проміжку, як вже відзначалося, залежить від конфігурації електродів, що визначає розподіл поля в проміжку, а через нього й інтенсивність первинних процесів. *Однорідне поле*, в якому напруженість у всіх точках однакова, можна створити між електродами спеціальної форми (*електроди Роговського*), наближене до однорідного – між *плоскими електродами з*

закругленими краями або між сферами, відстань між якими сумірна з діаметрами сфер або менша за них. Умова пробою у формі

$$\gamma(e^{ad} - 1) = 1 \quad (5.5)$$

справедлива тільки для статичного процесу з однорідним полем.

Для однорідного поля з умови пробою після підстановки в неї формули для коефіцієнта ударної іонізації, перетворення, подвійного логарифмування і наступного перетворення можна одержати **формулу Пашена** – загальне співвідношення, що описує закономірності зміни пробивної напруги залежно від довжини проміжку d й тиску газу p в ньому:

$$U_{np} = \frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln(1 + \gamma^{-1})}}, \quad (5.6)$$

де A і B – константи для даних умов пробою; γ – коефіцієнт вторинної іонно-електронної емісії.

Криві Пашена для деяких газів в широкому інтервалі pd дані на рис. 5.4.

З формули Пашена випливає **закон Пашена**, який стверджує, **що пробивна напруга газового проміжку залежить тільки від добутку тиску газу на відстань між електродами** і не залежить від кожного з цих факторів окремо, що є одним з різновидів законів подібності. Він дозволяє ввести **замість двох факторів, тиску газу і довжини проміжку, один – їх добуток**, що визначає величину пробивної напруги газу.

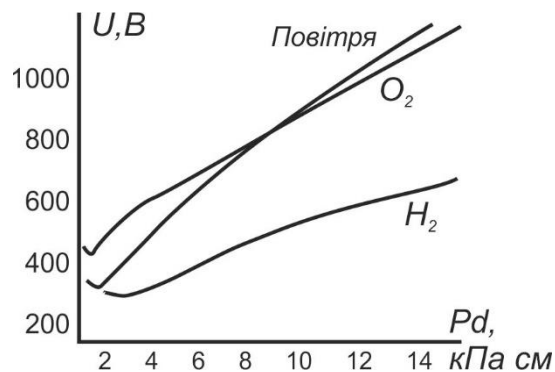


Рис. 5.4. Криві Пашена для пробую в однорідному полі.

Відповідно з формулою Пашена пробивна напруга газу має мінімальне значення, що дорівнює

$$U_{np \min} = B(pd)_{\min} \quad (5.7)$$

$$\text{при } (pd)_{\min} = \left(\frac{e}{A} \right) \ln(1 + \gamma^{-1}),$$

де e – основа натуральних логарифмів.

Мінімум в залежності пробивної напруги від pd , що має місце згідно з кривою Пашена, пояснюється наступним чином.

Справа від $(pd)_{\min}$ *при збільшенні відстані між електродами* при фіксованому тиску *пробивна напруга лінійно зростає* відповідно до формули $U_{\text{пр}} = E_{\text{пр}}d$, враховуючи, що електрична міцність згідно з умовою ударної іонізації $E_{\text{пр}} = \phi_{\text{іон}}/e\lambda$ при сталому тиску від відстані в однорідному полі не залежить.

Якщо зафіксувати відстань між електродами і *збільшувати тиск за рахунок збільшення числа молекул в одиниці об'єму*, то буде зменшуватися довжина вільного пробігу, а враховуючи, що довжина вільного пробігу обернено пропорційна тиску $\lambda = \lambda_0/p$, маємо, *що електрична міцність і пробивна напруга теж будуть лінійно зростати при підвищенні тиску*.

Тепер, якщо *зменшувати відстань між електродами при фіксованому тиску*, то при $pd = (pd)_{\min}$ настає момент, коли *відстань між електродами зрівнюється з мінімальною довжиною сформованого каналу*, який згідно критерію Льюба повинен містити $2 \cdot 10^7$ заряджених частинок. Продовжуючи *зменшувати відстань* між електродами, ми повинні будемо *форсувати іонізацію*, збільшуючи напруженість поля, щоб довжина іонізаційного вільного пробігу зменшувалася і іонізація відбувалася через меншу кількість пружних зіткнень, при цьому *$E_{\text{пр}}$ буде зростати*. При відстані між електродами 0,005 мм, наприклад, $E_{\text{пр}}$ повітря досягне значення 70 МВ/м (при відстані порядку 1 см вона становить 3 МВ/м).

Коли *відстань між електродами стане рівною мінімальній довжині пружного вільного пробігу*, електрони перестануть мати зіткнення з нейтральними молекулами, іонізація взагалі зникне і *електричний пробій газу стане неможливим*. Піднімаючи напругу далі, ми дійдемо до напруженостей поля, при яких почнеться автоелектронна емісія з катода і почне формуватися пробій вакууму, що буде розглянутий нижче.

Зафіксувавши відстань між електродами і *зменшуючи тиск газу*, ми теж прийдемо до ситуації, коли *відстань між електродами стане менше мінімальної довжини пружного вільного пробігу, зникнуть зіткнення електронів з молекулами і, відповідно, ударна іонізація, і електричний пробій не зможе розвиватися*.

Таким чином, *зростання пробивної напруги зліва від мінімуму кривої Пашена пояснюється тим, що кількість молекул газу стає недостатньою для утворення провідникового каналу*.

На практично важливій ділянці справа від мінімуму кривої Пашена пробивна напруга в залежності від тиску і температури при даному значенні d наближено дорівнює

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}0}\delta,$$

де $U_{\text{пр}0}$ – пробивна напруга за нормальних умов; $\delta = 2,9 \cdot 10^{-3} P/T$, (P – тиск газу, Па, T – температура газу, К), для нормальних умов $\delta = 1$.

Для практичних розрахунків праву гілку кривої Пашена часто апроксимують виразом типу

$$U_{\text{пр}} = A\delta d + B\sqrt{\delta d}, \quad (5.8)$$

де для проміжків від 10^{-1} – до 10 см $A = 22,22$ кВ/см, $B = 6,08$ кВ/см $^{0.5}$; d – довжина розрядного проміжку в см.

Відносна похибка розрахункових значень щодо експериментальних при використанні наведених коефіцієнтів 0,2%.

Слід відзначити, що **використання тиску в формулі Пашена швидше історичний пережиток, тому що не відповідає дійсному стану речей**. Бо якщо розглядати пробій газу в герметичному об'ємі, то при підвищенні температури тиск згідно до рівняння стану газу $PV = RT$ буде зростати пропорційно їй, але пробивна напруга не зміниться, тому що густина молекул, i , відповідно, довжина вільного іонізаційного пробігу не змінюються. **Незалежність пробивної напруги від тиску в герметичному об'ємі** буде мати місце принаймні **до температур порядку 1000 °С**, при яких з'являється помітна термоємність електронів з катода i , як додатковий ініціювальний процес, починає впливати на пробивну напругу.

При нормальних умовах на величину електричної міцності газів впливає маса і електронегативність молекул, чим вони більші, тим більша пробивна напруга газу. Наприклад, потенціал іонізації азоту і водню практично однакові (~15,5 еВ), але $E_{пр}$ водню складає 0,6 від $E_{пр}$ азоту. Пробивна напруга атомарних газів значно нижча, ніж молекулярних. Відносна $E_{пр}$ гелію при $W_i=24,6$ еВ по відношенню до $E_{пр}$ азоту всього 0,06, що частково пов'язано з різною електронегативністю.

Мінімальне значення пробивної напруги для молекулярних газів лежить в діапазоні від 280 В для H_2 до 3260 В для перфторфенантрена, для повітря на частоті 50 Гц в однорідному електричному полі – 326 В. Атомарні гази мають $U_{пр min}$ значно менше, особливо в суміші з парами лужних металів. Наприклад, для аргону $U_{пр min} = 195$ В, а з домішкою парів натрію – 95 В.

При низьких і середніх тисках закон Пашена, як закон подібності, добре підтверджується експериментальними результатами. При тисках, що значно перевищують атмосферний, спостерігається деяке зниження пробивної напруги, яке зв'язують, звичайно, з порушенням однорідності поля просторовими зарядами при більших густинах газу. Поле в проміжку при цьому підсилюється, збільшується ефективність ударної іонізації, що й приводить до зниження пробивної напруги.

При імпульсному пробіі на правій гілці кривої Пашена **стають істотними й ініціювальні процеси**, характеристики яких не входять явно в умову пробію. Пробивна напруга при цьому залежить від початкового струму згідно формулі

$$U_{пр} \approx A - B\sqrt{i_0},$$

де i_0 – струм ініціюючих електронів.

Пробивна напруга сумішей газів при середніх і високих тисках звичайно **перебуває в інтервалі між пробивними напругами чистих газів**, і приблизно дорівнює сумі пробивних напруг газів, що змішуються, при тисках, що відповідають парціальним тискам газів у суміші.

Однак, в області знижених тисків, а також при наявності в суміші компонента, енергія збудження якого перевищує енергію іонізації другого компонента, спостерігається істотне зниження пробивної напруги (рис. 5.5), як, наприклад, для суміші неона з енергією збудження 16,6 еВ і аргона, потенціал іонізації якого 15,7 еВ.

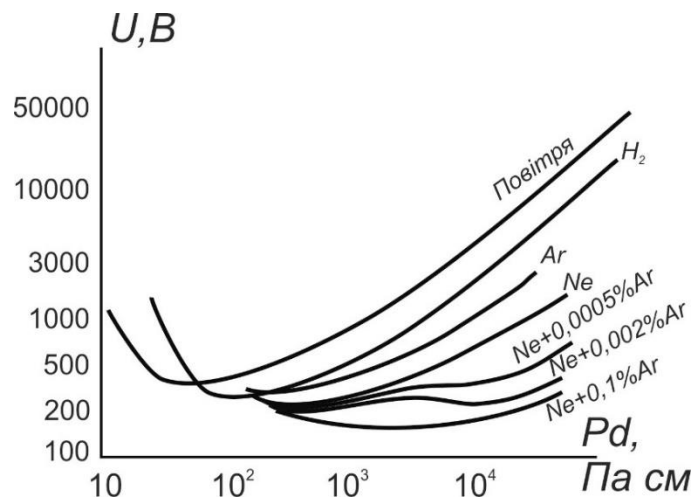


Рис. 5.5. Криві Пашена для деяких газів і сумішей газів.

При розгляді первинних процесів відзначалося, що найбільш істотно впливає на їхню інтенсивність прилипання електронів. Для коефіцієнта прилипання β справедливе співвідношення $\beta/p = f(E/p)$, тому закон Пашена буде виконуватися і в електронегативних газах, якщо тільки впливом об'ємних зарядів можна знехтувати.

Прилипання, однак, приводить до істотного підвищення пробивної напруги (табл. 5.2). Введення до газів таких електронегативних елементів, як хлор і фтор значно підвищує електричну міцність газів.

Електрична міцність фторовмісних газів і пари при нормальному тиску має той же порядок, що і рідкі діелектрики, але вони мають меншу густину, вищу нагрівостійкість і стійкість до старіння. Недоліком їх є відщеплення дуже активного хімічно фтору. В цьому відношенні виділяється елегаз, який мало піддається дії електричних розрядів і широко використовується в комутаційній техніці та комплектних розподільних пристроях.

Таблиця 5.2. Відносна електрична міцність деяких газоподібних діелектриків

Найменування газу	Молекулярна маса	Температура кипіння, °C	$\frac{E_{np, \text{газу}}}{E_{np, \text{повітря}}}$
Гелій	4	-268,8	0,06
Водень	2	-252,6	0,6
Вуглекислий газ	44	-78,3	0,9
Азот	28	-195,6	1
Фреон 12	129	-30	2,4
Елегаз	146	-63,8	2,9
Гексафторциклобутан	162	-5	3,9
Декафторциклопентан	250	22	4,3
Перфтордібутилтетрагідрофуран	416	101	6,3
Перфтордіметилциклогексан	400	101	8,5
Перфторфенантрен	624	205	10,0

3.1.5 Пробій газу в неоднорідному полі

Вплив об'ємних зарядів на закономірності пробою газів у порівняно рівномірних полях обговорювався вище. Ще більш сильно проявляється цей вплив у різко *неоднорідному* полі, яке виникає між двома вістрями, вістрям і площиною, між проводами лінії електропередачі, між сферичними поверхнями при відстані між ними значно більшій діаметрів даних сфер.

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. Пробій в неоднорідному полі виникає при меншій напрузі, ніж в однорідному, а пробивна напруга знижується при позитивній полярності вістря (рис. 5.6), особливо в електронегативних газах.

Якщо вістря перебуває під негативним потенціалом, то лавина або стример, зароджуючись від емітованих катодом електронів, швидко загасають при поширенні в область слабого поля, де напруженість поля недостатня для ударної іонізації. Там електрони прилипають до молекул газу, утворюючи негативні іони, що екранують поле позитивних іонів, розташованих біля катода-вістря. Напруженість поля біля катода знижується до величин, менших початкової, і розряд гасне. Після гасіння розряду відбувається повна нейтралізація позитивних іонів на катоді, і напруженість поля досягає мінімуму. Потім у результаті зсуву негативних іонів від катода в область слабого поля в напрямку до анода напруженість поля на катоді зростає й може досягти первісного значення, при якому знову запалюється розряд.

Слід зазначити, що через пульсаційний характер процесу розвиток стримера з негативного вістря ускладнений, а при коротких імпульсах – взагалі неможливий.

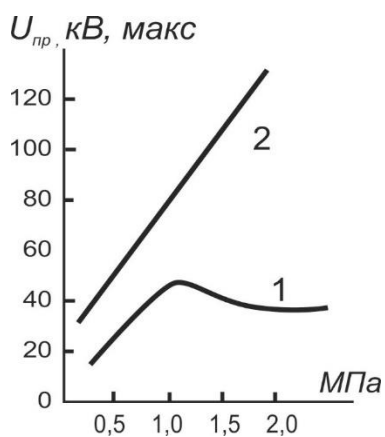


Рис. 5.6. Залежність пробивної напруги у випадку електродів вістря–площина при позитивній (1) і негативній (2) полярності вістря

Характерний максимум у залежності пробивної напруги від тиску при позитивній полярності на вістрі, пояснюється тим, що в проміжку з різко нерівномірним полем в області знижених тисків напруга виникнення коронного розряду нижча пробивної напруги. Якщо підвищувати напругу на проміжку після виникнення коронного розряду, то лавини й стримери зможуть просуватися на більшу відстань, і при певній напрузі стає можливим їхнє поширення через весь проміжок, що приводить до завершення пробою. Таким чином, в різко неоднорідному полі при позитивному вістрі виникає певна різниця між напругою виникнення корони і пробивною напругою (табл. 5.3).

Підвищення тиску приводить до того, що напруга виникнення коронного розряду зростає і при певному тиску стає рівною пробивній. При цьому

відновлюється монотонна залежність пробивної напруги від тиску, що відповідає деякому усередненому значенню коефіцієнта ударної іонізації.

У нерівномірному полі коефіцієнт ударної іонізації залежить від координати уздовж поля. Тому число первинних електронів можна знайти, інтегруючи його, і умова пробою прийме вид

$$\gamma \left[\exp \left(\int_0^d \alpha(x) dx - 1 \right) \right] = 1. \quad (5.9)$$

При стримерному характері пробою Пік запропонував умову пробою записувати у вигляді $E_{03}=E$ або

$$5,3 \cdot 10^{-7} \alpha_z \exp \int_0^d \frac{\alpha(x) dx}{\sqrt{\frac{d}{p}}} = k E_{03} \quad (5.10)$$

де d – довжина шляху лавини; E – поле джерела; α_z – коефіцієнт ударної іонізації, який відповідає полю в голівці лавини; E_{03} – поле об'ємного заряду позитивних іонів.

Значення величин напруги виникнення корони й пробивної напруги проміжку вістря – площина для нейтральних і електропозитивних газів з домішками кисню наведені у табл. 5.3. Вони отримані для проміжку 3,1 – 4,6 см при атмосферному тиску.

Таблиця 5.3. Пробивні напруги (кВ) для проміжку вістря – площина для деяких газів

Вид газу	Позитивна полярність			Негативна полярність	
	корона	іскра	пробій	корона	пробій
H_2	3.5	10	18	2.6	–
$H_2+0,1\%O_2$	5	8	–	4.2	–
N_2	4,8	11	20	3.7	14
$N_2+1\%O_2$	4.8	12.5	20	5.5	–
Ar	немає	немає	3,5	немає	3,5
$Ar+1\%N_2$	3,5	4.6	4,6	3.9	–
$Ar+0,4\%O_2$	4.5	–	7	3	24

Напруженості виникнення коронного розряду в однорідному полі наведені в табл. 5.4 для деяких газів при атмосферному тиску й температурі 0°C. Ці результати отримані екстраполяцією до однорідного поля. Як видно з таблиці, напруженості виникнення коронного розряду в однорідному полі часто більші за пробивну напругу в однорідному полі, а тому коронний розряд для відповідних газів в однорідному полі не спостерігається.

Таблиця 5.4. Екстрапольовані напруженості виникнення коронного розряду в однорідному полі

Вид газу	Екстрапольована напруженість виникнення корони, кВ/см	Вид газу	Екстрапольована напруженість виникнення корони, кВ/см
повітря	35,5	вуглекислий газ CO_2	45,5
водень H_2	15,5	аміак NH_3	56,7
гелій He	4,5	метан CH_4	22,3
неон Ne	4,5	монохлорметан CH_3Cl	45,6
аргон Ar	7,2	дихлорметан CH_2Cl_2	126
кисень O_2	29,1	трихлорметан $CHCl_3$	162
азот N_2	38	чотирихлористий вуглець CCl_4	204

3.1.6 Статистичне запізнення пробою і імпульсна міцність діелектриків

Конфігурація, стан поверхні й матеріал електродів впливають на величину пробивної напруги, тому що саме вони у випадку пробою газу при низьких і нормальних тисках визначають значною мірою інтенсивність ініціювальних і вторинних процесів.

В загальному випадку пробій газового проміжку відбувається за час, за який розрядний струм досягає величини, що відповідає зміні знака диференціальної провідності $\gamma_0 = \frac{\partial j}{\partial E}$. Час формування пробою містить у собі час статистичного запізнення, рівний інтервалу часу від подачі напруги до появи в проміжку придатного ініціювального електрона, бо не кожний електрон може спричинити формування лавини, і власне час формування розрядного каналу, що відраховується від моменту появи ініціювального електрона до досягнення розрядним струмом критичної величини.

Ініціювальні процеси стають визначальними, якщо їхня інтенсивність настільки низька, що в проміжку можна створити без пробою сильне електричне поле, достатнє для інтенсивної ударної іонізації. У цьому випадку спостерігається *значне статистичне запізнення початку пробою* стосовно моменту прикладення напруги (рис. 5.7) і *істотне розсіювання пробивних напруг* (рис. 5.8), що зменшується при опроміненні проміжку. Наявність факторів, що інтенсифікують ініціювальні процеси – діелектричних забруднень (рис. 5.6), зовнішніх іонізаторів (рис. 5.7) і т.п., зменшує статистичний час запізнювання й розсіювання пробивних напруг.

Через дію зазначених факторів досить складно вирішити питання про вплив матеріалу електродів на величину пробивної напруженості газового проміжку, хоча *експериментальні дані свідчать*, що завдяки інтенсифікації ініціювальних процесів при погіршенні якості обробки поверхні електродів *пробивна напруга знижується*.

Про вплив статистичного часу запізнення на величину пробивної напруги можна судити за даними, наведеними на рис. 5.7 – 5.8, якщо врахувати, що

прикладення напруги до проміжку на час, менший часу запізнення, не може привести до пробую. Час статистичного запізнення зменшується при інтенсифікації ініціювальних процесів і зростає зі збільшенням роботи виходу електронів з катода.

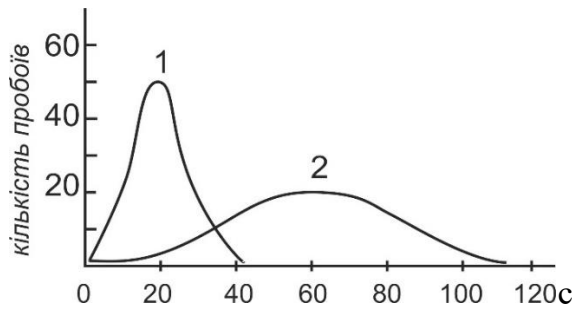


Рис. 5.7. Розподіл часів запізнювання для сильно (1) і слабо окислених (2) вольфрамових електродів.

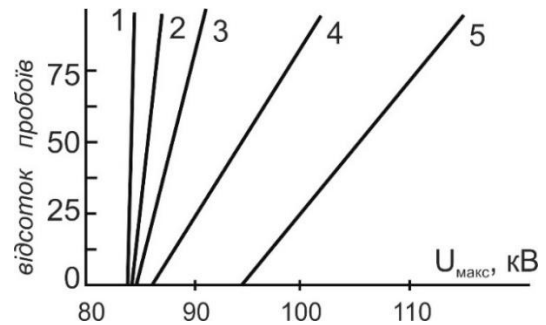


Рис. 5.8. Розподіл пробивних напруг проміжку довжиною 3 см між кулями діаметром 12,5 см при опроміненні. Інтенсивність опромінення знижується з ростом індексу прямої.

Якщо час формування розряду позначити τ і врахувати, що $d = v_e \tau$, а $v_e = \mu_e E$, то, враховуючи умову пробую по Таунсенду одержимо

$$\tau = \frac{1}{\alpha \mu_e E} \ln(1 + \gamma^{-1}),$$

$$\tau \cdot p = \left(\frac{\alpha}{p} \mu_e p \frac{E}{p} \right)^{-1} \ln(1 + \gamma^{-1}) = f\left(\frac{E}{p}\right) = f\left(\frac{U}{pd}\right),$$

при цьому враховуємо, що $\mu_e p \approx const$, $\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right)$.

Згідно приведеним оцінкам при справедливості теорії Таунсенда повинна існувати узагальнена залежність приведеної пробивної напруженості $\frac{E_{пр}}{p}$ від добутку $p\tau$. Це положення дійсно підтверджується експериментом (рис. 5.9).

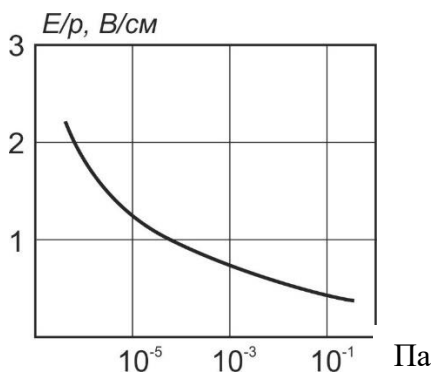


Рис. 5.9. Узагальнена вольтсекундна характеристика газового пробую

При стримерному пробую лавина повинна пройти шлях d , щоб перетворитися в стример, швидкість руху якого істотно вище, що дозволяє знехтувати часом розвитку стримера у порівнянні з часом розвитку лавини і для оцінки часу формування пробую можна скористатися тим самим виразом. Однак, при переході від лавинного розряду до стримерного спостерігається зменшення часу формування розряду на порядок – два, чого наведена формула не може пояснити.

Зазвичай малий **час формування стримерного розряду** пояснюють фотоемісією з катода при дії на нього фотонів, що утворюються при нейтралізації позитивних іонів електронами. Однак, довжина вільного пробігу для фотонів з енергією іонізації дуже мала і при підвищених тисках цей процес не може бути ефективним. Якщо інтегрально враховувати вторинну іонно-електронну емісію, обумовлену розрідженою хмарою позитивних іонів, які залишаються лавиною в розрядному проміжку, то час **формування розрядного каналу можна обчислити в рамках теорії Таунсенда** за формулою:

$$t_{\phi} = \frac{\frac{k}{k-1} \tau_{oc} \ln \left[\frac{1}{k} + \frac{k-1}{k} \frac{i(t_{\phi})}{i_0} \right]}{1 - \frac{\alpha d_c - k}{\alpha d_c (k-1)} \ln \left[\frac{1}{k} + \frac{k-1}{k} \frac{i(t_{\phi})}{i_0} \right]}, \quad (5.11)$$

де $k = \gamma(\exp \int \alpha dx - 1)$ – коефіцієнт іонізаційного наростання; d_c – проміжний перетин розрядного каналу, у якому струм лавини досягає значення $i(t_{\phi})$, при якому вступають у дію просторові заряди; i_0 – початковий фотострум, α – коефіцієнт ударної іонізації.

При коефіцієнті іонізаційного наростання $k \gg 1$

$$t_{\phi} = \frac{\alpha d_c \tau_{ec} \ln \frac{i(t_{\phi})}{i_0}}{\alpha d_c + \ln \frac{i(t_{\phi})}{i_0}}, \quad (5.12)$$

де τ_{ec} – час прольоту електронів до перетину d_c , а якщо до того ж $\ln(i(t_{\phi})/i_0) \gg \alpha d_c$, то

$$t_{\phi} = \alpha d_c \tau_{ec}. \quad (5.13)$$

Звідси випливає, що при досить великих перенапругах час формування лавинного розряду й без врахування фотоемісії може бути одного порядку з часом прольоту електронів, а не позитивних іонів, як це приймається в рамках теорії Таунсенда.

Через необхідність дочекатися появи ініціюючого електрона і затрати часу на формування каналу пробою при пробі на імпульсній напрузі пробивна напруга повинна підвищуватися зі зменшенням довжини імпульсу.

Залежність пробивної напруженості поля від тривалості імпульсу при імпульсній напрузі характеризується коефіцієнтом імпульсу, який дорівнює відношенню пробивних напруженостей поля при імпульсному пробі і постійній напрузі, що використовується в техніці високих напруг для координації ізоляції, тобто вирівнювання коефіцієнтів запасу по електричній міцності ізоляції при різних видах напруг, що діють на неї.

3.1.7 Вплив частоти на пробивну напругу газів

У попередніх міркуваннях малося на увазі, що при імпульсному пробіі природа елементарних процесів така ж, як і при пробіі постійною напругою. При пробіі газових проміжків при змінній напрузі в області високих частот визначальна роль може переходити до інших процесів. Розглянемо трохи докладніше це питання.

Загальний характер залежності пробивної напруги при змінній напрузі від частоти, а значить і від тривалості періоду випробувальної напруги (рис.5.10) істотно відмінний від часової залежності пробивної напруги при імпульсному пробіі (див. рис. 5.9).

Відмінність пояснюється насамперед зміною полярності напруги в проміжку протягом кожного періоду, у зв'язку із чим кожний електрод по черзі відіграє роль то катода, то анода, а напрям руху заряджених часток щораз змінюється на зворотний. Доки період випробувальної напруги значно більший часу прольоту іонів і електронів через проміжок, доти зміна полярності приводить тільки до додаткового симетрування умов у проміжку й зникненню ефекту полярності.

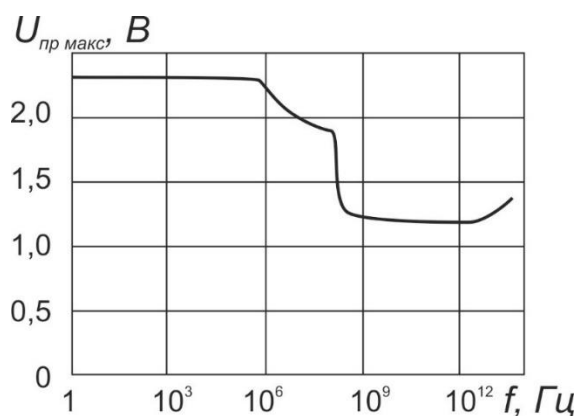


Рис. 5.10. Залежність пробивної напруги від частоти.

Як тільки півперіод напруги стає співвимірним з часом прольоту позитивних іонів через проміжок, то вони не встигають за цей час дійти до катода, і в проміжку починає накопичуватися позитивний об'ємний заряд. Внаслідок порушення цим зарядом рівномірності поля підсилюється процес ударної іонізації в прикатодній області, а величина пробивної напруги знижується.

Цей спад пробивної напруги спостерігається в певному діапазоні частот. При подальшому підвищенні частоти (зменшенні періоду) значення пробивної напруги стабілізується внаслідок того, що кулонівське розштовхування й дифузія перешкоджають наростанню густини об'ємного заряду.

Однак, коли півперіод випробувальної напруги зрівняється з часом прольоту електронів між електродами, останні також не встигають вийти із проміжку і при зміні полярності виступають в ролі ініціювальних. При цьому спостерігається посиленна іонізація, і пробивна напруга знижується доти, доки накопичування електронів не урівноважиться їхньою дифузією із проміжку і нейтралізацією з позитивними іонами. Потім пробивна напруга знову не залежить від періоду прикладеної напруги. І тільки коли період напруги стає менше часу вільного іонізаційного пробігу, електрони не встигають зіштовхуватися з атомами газу, інтенсивність іонізації знижується, а пробивна напруга зростає.

3.2 ПОВЕРХНЕВИЙ ПРОБІЙ

В електроізоляційних конструкціях пробій може проходити вздовж поверхні твердого діелектрика в газі чи в рідині, тоді його називають поверхневим. Наявність у газовому проміжку твердого діелектрика, що має контакт із електродами, характерна для багатьох електроізоляційних конструкцій (ізолятори, розпірки в газо- і оливонаповнених кабелях і т.п.). Конструкція в цьому випадку розраховується таким чином, щоб пробій відбувався в газі, а не в твердому діелектрику, для якого втрата електричної міцності при пробіі є необоротною. Тому ізоляторам надають таку форму, щоб іскровий розряд проходив в шарі повітря якомога далі від поверхні ізолятора (грибок, бочечка).

На питання, чи змінюється пробивна напруга газового проміжку при внесенні твердого діелектрика, експериментально була отримана відповідь, що зміна пробивної напруги газового проміжку спостерігається тоді, коли внесення твердого діелектрика супроводжується викривленням початкового розподілу поля зарядженими частинками на поверхні діелектрика.

Викривлення поля твердим діелектриком тим більше, чим більша вологість газу й чим більша діелектрична проникність діелектрика, тобто менше крайовий кут змочування. Наприклад, при напрузі частотою 50 Гц збільшення відносної вологості з 60% до 90% знижує розрядну напругу для керамічних ізоляторів в 2 рази. Це зниження пов'язане, у першу чергу, із плівкою вологи на поверхні діелектрика, товщина якої збільшується з ростом зазначених факторів. Тому в однорідному полі при гарному контакті електродів з діелектриком і вологістю не більше 10% викривлення розподілу поля незначне й пробивна напруга практично не змінюється (рис. 5.12).

З ростом відносної вологості на поверхні твердого діелектрика утворюється тонкий суцільний шар вологи, що має знижений опір. В результаті протікання підвищених поверхневих іонних струмів біля електродів накопичуються заряди, що викривляють поле й знижують пробивну напругу. Через погану відтворюваність явища утворення суцільної плівки експериментальні дані мають в області переходу велике розсіювання (рис. 5.13).

Процес утворення поверхневого заряду досить інерційний, тому при напругах частотою понад 100 кГц пробивна напруга газового проміжку при наявності в ньому твердого діелектрика не залежить від відносної вологості й близька до пробивної напруги газу. Деяке зниження пробивної напруги у цьому випадку може бути пов'язане з розповзанням заряду на електродах, що компенсує поляризаційне поле в твердому діелектрику, і локальним збільшенням напруженості поля в газі у місці контакту краю діелектрика з електродом.

Викривлення розподілу поля в присутності сильно зволоженого твердого діелектрика може бути пов'язане не тільки з нагромадженням поверхневих зарядів, але й з нерівномірністю підсихання поверхні, що приводить до утворення локальних областей з підвищеним опором.

Цей механізм є основним при перекиванні твердих діелектриків по поверхні в умовах безперервного зволоження, наприклад при дощі, коли розподіл поля вздовж поверхні визначається падінням напруги на даній ділянці діелектрика при протіканні струму витoku.

Виділення теплоти при протіканні струму по плівці води приводить до випаровування вологи з поверхні діелектрика. Випаровування відбувається нерівномірно через флуктуацію товщини плівки вологи, наявності забруднень поверхні тощо. Опір ділянки діелектрика з тоншою плівкою води або підсушеної ділянки вищий, тому з урахуванням закону повного струму, згідно якого струм у будь-якому перерізі послідовного кола однаковий, на ньому виділяється більша частина потужності, що приводить до ще більш інтенсивного випаровування й до утворення, у кінцевому підсумку, сухих ділянок або смуг. Подальший розвиток процесу залежить від величини напруги, прикладеного до проміжку. Ця напруга у випадку утворення сухої смуги виявляється прикладеною до неї, тому можливо локальне перекрыття діелектрика в сухій області і часткові дужки або наскрізний пробій.

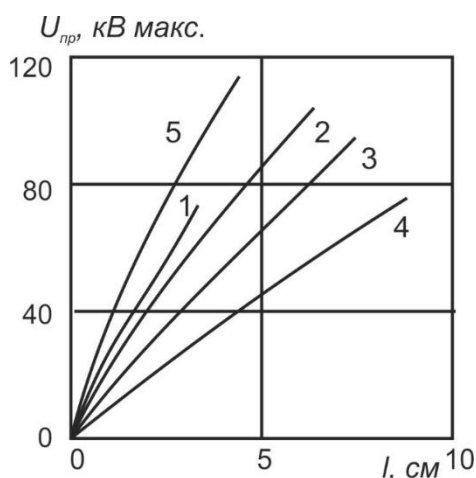


Рис. 5.12. Залежність пробивної напруги по поверхні діелектрика від довжини проміжку: 1 – парафін; 2 – порцеляна; 3 – турбоніт; 4 – парафін, порцеляна, турбоніт при поганому контакті; 5 – повітря

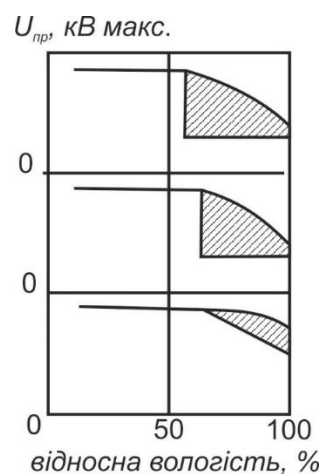


Рис. 5.13. Залежність пробивної напруги по поверхні скла від відносної вологості повітря: а – поліровані; б – матові; в – покриті діелектриком електроди

У результаті поверхневих пробіів, що повторюються, або поверхневих розрядів по поверхні діелектриків, особливо органічних, утворюються обуглені провідні сліди, які погіршують електроізоляційні властивості конструкції. Це явище називається *трекінгом*.

Стійкість органічних діелектриків до трекінгу тим більша, чим більше коксове число (відношення маси твердого залишку термічного розкладання без доступу кисню або у вакуумі до початкової) для даного матеріалу.

3.3 ПРОБІЙ ВАКУУМУ

Основні труднощі при поясненні пробією вакууму полягають у тім, що в проміжку відсутня речовина, а тому первинні процеси неможливі. Зростання струму, у цьому випадку, при зростанні напруги, прикладеної до проміжку, зумовлене тільки ростом інтенсивності ініціувальних процесів, основним з яких є холодна емісія електронів з катода. При ретельній обробці й тренуванні електродів вакуумний проміжок довжиною 1 мм може витримувати напругу понад 100 кВ, пропускаючи

значний струм (до 10 кА) без переходу до нестационарного режиму, тобто до режиму зі спадною вольт-амперною характеристикою, яка і є безпосередньою ознакою пробою.

У перших теоріях пробою вакууму автори намагалися обійтися без первинних процесів. Згідно цих, так званих обмінних теорій, ініціюючі електрони, прискорені електричним полем у вакуумному проміжку до великих енергій, вибивали з анода позитивні іони. Ці іони, потрапляючи на катод, вибивали нові електрони, забезпечуючи, таким чином, зворотний позитивний зв'язок. Щоб описаний процес став таким, що сам підтримується, а потім і нестационарним, згідно з умовою пробою потрібно забезпечити вихід вторинних електронів одиниця і більше на один ініціюючий електрон. Однак, експеримент дає величину виходу вторинних електронів у вакуумі менше 10^{-3} , що спростовує обмінні теорії.

У сучасних теоріях пробою вакууму основний наголос робиться на механізмі появи у вакуумному проміжку розрідженого газу в результаті десорбції забруднень із поверхні електродів або випаровування матеріалу анода при нагріванні електронними пучками, а також при відриві макрочастинок від анода, прискорення їх в електричному полі й ударі об поверхню катода. На користь такого підходу свідчить те, що механічне зміцнення електродів приводило до збільшення пробивної напруги в 1,8 раз. Також збільшує пробивну напругу тренування електродів тліючим розрядом або послідовними пробоями. Поява розрідженого газу в проміжку дозволяє додати в схему пробою вакууму ударну іонізацію як первинний процес. Роль вторинного процесу, можливо, відіграє іонно-електронна емісія, а також електронна емісія з катода зумовлена ультрафіолетовими, а інколи і рентгенівськими фотонами, що випромінюються анодом при ударах об нього електронів, прискорених до енергії $W = eU$, де U – повна напруга, прикладена до проміжку. Але в цілому на сьогодні можна констатувати, що теорія вакуумного пробою ще досить далека від завершення.

До основних емпіричних фактів, що повинні бути враховані при побудові теорії пробою вакууму відносяться наступні: малий час формування пробою, який у ряді випадків складає одиниці наносекунд, розвиток розряду з катода, перенесення матеріалу анода на катод, поява бугорків на поверхні електродів, що сприяють автоелектронній емісії, спалахи біля поверхні катода і анода, ефект повної напруги, відсутність прямої пропорційності між довжиною міжелектродного проміжку й величиною пробивної напруги.

Величина пробивної напруги U_{np} вакуумного проміжку збільшується з його довжиною d відповідно до емпіричної залежності

$$U_{np} = cd^{0.5...0.6},$$

як і при тепловому пробойі.

Приблизно така ж залежність, але трохи нелінійніша, має місце при пробойі вакууму уздовж поверхні діелектрика. На розвиток пробою в цьому випадку дуже впливає руйнування діелектрика автоемітованими електронами, внаслідок якого погіршується вакуум у проміжку.

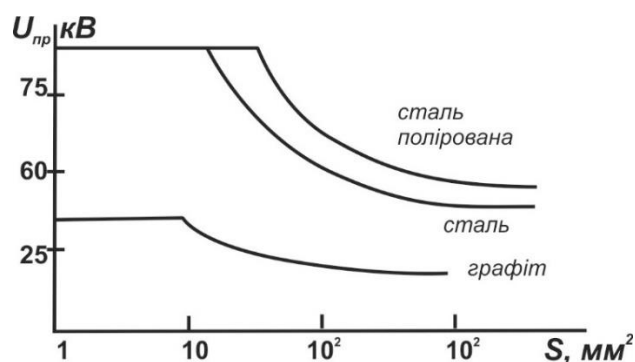


Рис. 5.14. Залежність пробивної напруги вакуумного проміжку від площі електродів з різною мікрогеометрією.

На пробивну напругу вакуумного проміжку також дуже впливає мікрогеометрія проміжку (рис. 5.14). Зі збільшенням чистоти поверхні електродів пробивна напруга вакууму $U_{пр}$ зростає.

Перехід від початкової стадії вакуумного пробою до дуги, за сучасними уявленнями, пов'язаний із процесами на катоді, що забезпечують достатню щільність плазми. Цими процесами можуть бути вибухи мікрівістер або запалювання дуги між неметалічними

домішками й катодом з випаровуванням металу. При горінні дуги спостерігається ерозія катода, особливо сильна, коли катодна пляма дуги, що завжди перебуває в русі, переміщується повільно. При цьому іноді спостерігається викид швидких ($v \sim 10^6$ см/с) струменів металу.

Збільшення площі електродів приводить до зниження $U_{пр}$ в результаті збільшення числа активних центрів. Максимальна $U_{пр}$ спостерігається, коли анод має форму вістря. Коли катод є вістря, $U_{пр}$ трохи нижча, ніж при аноді-вістрі, але вища, ніж для проміжку площина-площина, на відміну від пробою газів.

ЛЕКЦІЯ 6

6.1 ПРОБІЙ РІДКИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

6.1.1 Загальна характеристика пробою рідких діелектриків

У ряді високовольтних пристроїв (трансформатори, конденсатори, кабелі, прохідні ізолятори й т.п.) використовуються, як ізоляція, поряд з іншими електроізоляційними матеріалами *рідкі діелектрики*. Серед них найбільше поширення одержали *кабельна, трансформаторна й конденсаторна оливи* (виробляються із нафти при зростаючому ступені очищення), а також синтетичні рідини: *рідкі кремнійорганічні олігомери з ряду силосанів, фторорганічні рідини типу $C_8F_{16}O$, $C_6(F_{10})_2O$, $(C_4F_6)_N$, низькомолекулярний пропілен, деіонізована вода*.

Пробивна напруга рідин в цілому значно вища, ніж газів. Крім того, рідка ізоляція інтенсивніше відводить теплоту, поліпшуючи тим самим енергетичні характеристики устаткування.

Однак, незважаючи на значне поширення рідких діелектриків, фізичні процеси, що відбуваються в них у сильних електричних полях, вивчені дуже слабо, особливо з теоретичної сторони. Основна причина полягає в тому, що до теперішнього часу *практично не існує закінченої теорії рідкого стану*, подібної до статистичної теорії газів або зонної теорії кристалів. Крім того, характеристики зовнішніх і внутрішніх факторів при пробі в рідині, такі як *форма і частота напруги, температура, тиск в рідині, її густина, в'язкість, структура молекул, енергія власних коливань, температура і енергія випаровування, наявність в рідині розчинених газів і їх природа, матеріал електродів, стан їх поверхні* відрізняються великою складністю й сильною залежністю від ступеня забруднення рідини.

Зовні картина розвитку розряду в рідині аналогічна тій, що була розглянута для газів – можна спостерігати й стримерну корону, і іскровий розряд, і дугу. Однак, *задовільна умова пробою для рідин в загальному випадку*, на відміну від газів, *в аналітичному вигляді не може бути сформульована* через велику кількість факторів, що впливають на розвиток пробою в рідині.

На даний час прийнято, що *пробій рідин внаслідок збереження трансляційної (поступальної) степені свободи руху молекул має значно більше загального із пробоєм газів, ніж із пробоєм твердих діелектриків*, де положення частинок зафіксоване.

Провідність рідин у слабких полях обумовлена дією космічного випромінювання та дисоційованими забрудненнями. Наскільки важлива роль дії космічного випромінювання в формуванні електропровідності рідин можна бачити з такого прикладу: провідність ретельно очищеного *n* – гептану зменшується від $2 \cdot 10^{-10}$ до $9 \cdot 10^{-20}$ $\text{См} \cdot \text{см}^{-1}$ при екрануванні вимірювального об'єму шаром свинцю товщиною 6 см.

У сильних полях ініціювальні електрони (дірки) можуть поставлятися також *автоемісією*, тобто вириванням сильним електричним полем електронів з катода чи дірок з анода, *або емісією Шотткі*, що враховує зниження роботи виходу електронів (дірок) за рахунок дії поля. При цьому потрібно мати на увазі, що *робота виходу*

електронів в рідину в ϵ_r раз менша за роботу виходу електронів (дірок) в *газоподібний діелектрик*, а тому автоемісія носіїв заряду з електродів може відбуватися при набагато нижчій напруженості поля і є значно ефективнішою, ніж в газах.

Характер первинних процесів при пробіі рідких діелектриків сильно залежить від чистоти рідини. Можна говорити про три ступеня чистоти рідин:

– *особливо ретельно очищені* та дегазовані, для яких може мати місце електричний пробій з ударною іонізацією, як первинним процесом;

– *технічно чисті*, що практично не мають емульсійної вологи та механічних домішок, для яких більш характерним, як первинний процес, є термогенерація і тепловий пробій;

– *забруднені*, що містять емульсійну воду та тверді механічні домішки, пробій яких зумовлений іонізаційними процесами в пухирцях газу, та утворенням містків з крапель води і твердих домішок, що спотворюють поле і полегшують пробій.

Роль зворотного зв'язку (*вторинних процесів*) можуть відігравати *процеси утворення електронів при нейтралізації позитивних іонів на катоді (вторинна іонно-електронна емісія) або емісії електронів в результаті дії об'ємних зарядів позитивних іонів (автоелектронна емісія).*

6.1.2 Пробивна напруга чистих рідких діелектриків

Найбільш ймовірним *первинним елементарним процесом* в ретельно очищених рідинах можна вважати різке зростання концентрації електронів у розрядному проміжку в результаті *ударної іонізації*.

Електрична міцність рідких діелектриків при нормальних умовах в десятки-сотні разів вища, ніж газів, за рахунок *більшої приблизно в 1000 разів густини і, відповідно, меншої довжини вільного пробігу носіїв заряду* ($\sim 10^{-7}$ см), внаслідок чого потрібна *значно більша напруженість електричного поля для ударної іонізації*. Наприклад, для газоподібного чотирихлористого вуглецю (CCl_4) маємо $E_{\text{пр}} = 18,6 \text{ МВ/м}$, а $E_{\text{пр}}$ рідкого CCl_4 складає приблизно 479 МВ/м .

На відміну від газів у рідинах електрон при зіткненнях витрачає енергію на збудження коливань вздовж хімічних зв'язків і вібрації молекул. Якщо для збудження коливань хімічних зв'язків потрібна енергія $0,11 - 0,37 \text{ еВ}$, на збудження атомів чи молекул рідини $2 - 7 \text{ еВ}$, то для іонізації молекули – $10 - 24 \text{ еВ}$. Таким чином, для досягнення електроном за рахунок поля енергії, що дорівнює іонізації молекул рідини, потрібні дуже сильні електричні поля.

Для ретельно очищених рідин можна встановити ряд зв'язків між $U_{\text{пр}}$ і молекулярними характеристиками. $U_{\text{пр}}$ зростає зі збільшенням *в'язкості, температури кипіння, молекулярної ваги, теплоти випаровування, густини й поверхневого натягу рідин і знижується з ростом термодинамічного потенціалу*.

Таким чином, як і у випадку газів, $U_{\text{пр}}$ рідин визначається *в першу чергу характеристиками міжмолекулярної взаємодії*. Можливо, це пов'язане з тим, що саме вона визначає втрату енергії електроном, прискореним у електричному полі.

На величину $U_{\text{пр}}$ чистих рідин (рис. 6.1) досить істотно впливає температура внаслідок зміни рівноважної концентрації носіїв заряду у рідині, умов їхнього

розсіювання при прискоренні та зростання емісії електронів з катода. Зі зміною температури змінюються також *густина рідини, а також її в'язкість*, що приводить до *зміни рухливості носіїв заряду*. Велике значення може мати також *збільшення відносного вмісту газу* в рідині при підвищенні температури внаслідок зменшення його розчинності. При великих струмах може спостерігатися випаровування або розкладання рідини й утворення бульбашок газу, у яких потім розвивається пробій. При цьому, *чим вища температура кипіння й більша теплота випаровування, тим більша електрична міцність рідини.*

У ретельно дегазованій рідині $U_{пр}$ не залежить від тиску. Якщо ж у рідині є розчинений газ, то її $U_{пр}$ підвищується зі збільшенням тиску (рис. 6.2). Найбільш імовірним поясненням цієї залежності є *підвищення розчинності газу в рідині і погіршення умов для утворення газових бульбашок* у ній при збільшенні тиску, а також *збільшення $U_{пр}$ газу* у цих бульбашках. Деяку роль може відігравати й зміна рівноважного стану адсорбованої на катоді плівки газу, що з ростом тиску повинна розчинятися.

При пробіі ретельно очищених рідин в однорідному полі їх *електрична міцність $E_{пр}$* , як і у випадку електричного пробію газів, *не залежить від довжини проміжку при її зменшенні до 10^{-4} м, і збільшується, якщо довжина проміжку менша* (рис. 6.3). Цей ефект може бути пояснений або існуванням біля електродів областей об'ємного заряду, або, за аналогією з газами, зниженням ефективності ударної іонізації зі зменшенням довжини проміжку.

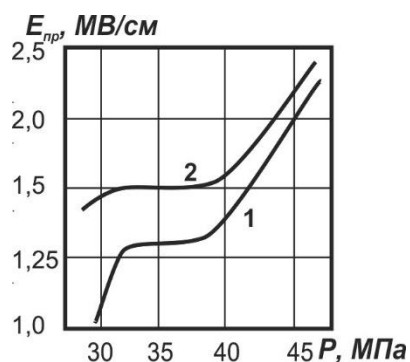


Рис. 6.1. Залежність електричної міцності рідких діелектриків від оберненої температури: 1 – пентану; 2 – октану.

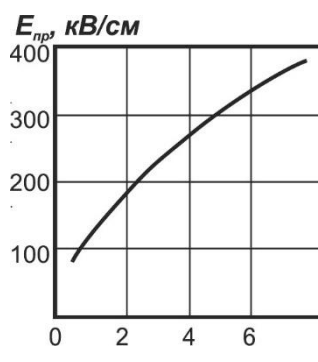


Рис. 6.2. Залежність електричної міцності оливи парафінового ряду від тиску.

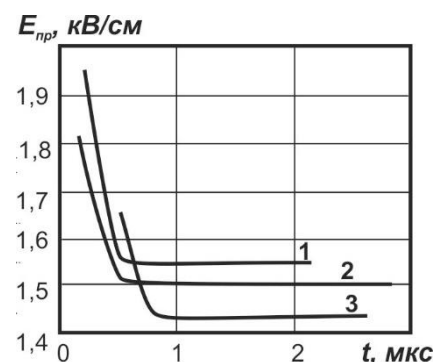


Рис. 6.3. Залежність $E_{пр}$ гексану від тривалості імпульсу при довжині проміжку 1 – 50,8 мкм; 2 – 63,5 мкм; 3 – 85,9 мкм

Підвищення електричної міцності при малих проміжках часу дії напруги, як і в газоподібних діелектриках, називають електричним зміцненням і *характеризують коефіцієнтом імпульсу*. При цьому треба мати на увазі, що $E_{пр}$ *полярних рідин зростає зі зменшенням проміжку швидше і* внаслідок цього при імпульсній напрузі *може перевищити $E_{пр}$ неполярних рідких діелектриків*, що при постійній напрузі мають вищу пробивну напругу.

Час пробію малих проміжків менше 1 мкс, що свідчить про електричну форму пробію рідин при таких умовах.

В ретельно очищених рідинах поряд з утворенням позитивних можуть утворюватися і негативні іони внаслідок прилипання електронів до нейтральних атомів чи молекул. **З врахуванням прилипання електронів** в теоріях пробою ретельно очищених рідин **формулу для струму в сильних полях**, в яких основна роль в пробі відводиться ударній іонізації, **записують у вигляді**, що співпадає з формулою для передпробивного струму в газах при наявності прилипання

$$\frac{i}{i_0} = \frac{\frac{\alpha}{\alpha - \eta} \exp[(\alpha - \eta)\delta] - \frac{\eta}{\alpha - \eta}}{1 - \frac{\gamma\alpha}{\alpha - \eta} (\exp[(\alpha - \eta)\delta] - 1)},$$

де i_0 – початковий (ініціювальний) струм, α – коефіцієнт ударної іонізації, η – коефіцієнт прилипання, γ – коефіцієнт вторинної емісії, δ – відстань між електродами. Умова пробою відповідно приймає вигляд:

$$\frac{\gamma\alpha}{\alpha - \eta} [\exp[(\alpha - \eta)\delta] - 1] = 1.$$

Для рідких діелектриків однакового складу, наприклад, парафінів, E_{np} зростає зі збільшенням густини, яке приводить до зменшення довжини вільного пробігу, а також зменшується зі збільшенням ϵ_r , що супроводжується зменшенням роботи виходу електронів з катоду, збільшенням діелектричних втрат в діелектрику і приводить до теплового пробою рідин.

При тепловому пробі рідин електрична міцність за однією з теорій

$$AE_{np}^{3/2} \tau_r = V [c_p (T_{кин} - T_0) + Q_n],$$

де A – стала, τ_r – час, на протязі якого рідина знаходилася в області максимальної напруженості поля, V – об'єм рідини, c_p – теплоємність, $T_{кин}$ – температура кипіння, Q_n – теплота пароутворення.

Для пробою, що пов'язаний з наявністю в технічно чистій рідині пухирців газу, їх деформацією (розтягуванням) і виникненням ударної іонізації на гострих кінцях пухирців, теоретичну електричну міцність оцінюють за формулою

$$E_{np} = \frac{1}{\epsilon_1 - \epsilon_2} \left\{ \frac{24\pi\sigma(2\epsilon_1 - \epsilon_2)}{r} \left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{V_b}{2rE_0} - 1 \right) \right]^{1/2} \right\}^{1/2},$$

де ϵ_1, ϵ_2 – відносні діелектричні проникності рідини і газу, σ – поверхневий натяг рідини, r – початковий радіус пухирців, E_0 – напруженість поля в пухирці, V_b – напруга на пухирці.

Результати експериментів із виявлення **впливу матеріалу електродів на величину пробивної напруги** рідин дуже суперечливі. Можна зробити висновок, що основна причина розбіжностей полягає в різному **ступені обробки й чистоти електродів**. Наприклад, електрична міцність гептану й бензолу залежно від ступеня полірування й дегазації електродів може змінюватися від 100 до 1700 кВ/см. **Ця**

залежність U_{np} від мікрорельєфу й кількості адсорбованого на катоді газу маскує вплив матеріалу електродів.

Крім того, роль катода різна і залежить від того, який процес відіграє основну роль. Якщо в полях, що відповідають пробою, має місце **інтенсивна ударна іонізація, і розвиток пробою обмежує емісія з катода, то роль катода істотна.** І, навпаки, якщо спостерігається інтенсивна емісія з катода при слабкій ударній іонізації в об'ємі рідини, то саме ударна іонізація стає обмежуючим фактором пробою і матеріал катода вже не грає помітної ролі.

Отже, якщо створити умови для інтенсивної ударної іонізації в проміжку при порівняно слабких полях на катоді, то можна виявити вплив матеріалу катода. Дійсно, у проміжку вістря – площа, коли катодом служить площа, а анодом вістря, U_{np} п – гексану **для матеріалів катода зі зростаючою роботою виходу** (Al – 4,25, Cu – 4,4 і Cr – 4,58 eV) **має відповідно зростаюче значення** при даній відстані між електродами (рис. 6.4). **Якщо ж вістря є катод, то U_{np} рідини не залежить від матеріалу,** з якого він виготовлений.

Для підвищення U_{np} рідких діелектриків використовують **покриття** струмопровідних і потенціальних металевих елементів **шаром діелектрика,** щоб запобігти осіданню води і шламу на електродах, що створюють місця локальних перенапружень, а також встановлюють **тверді діелектричні бар'єри** в рідкій ізоляції, що заважають утворенню містків з водяних крапель або волокон. Такі заходи дають можливість **підвищити U_{np} на 25–70% в залежності від форми поля і частоти прикладеної напруги.**

Однак, **розглянуті теоретичні формули** для пробивної напруженості рідких діелектриків, як і інші, не розглянуті нами теорії, на жаль, **не зовсім узгоджуються з практикою.** Тому розглянемо більш докладно емпіричні закономірності пробою рідких діелектриків, якими можна користуватися на практиці при використанні рідинної ізоляції.

Орієнтовний розрахунок U_{np} **трансформаторної оливи при змінній нарузі** і нормальних умовах для електродів **вістря–вістря** можна проводити за формулою

$$U_{np} = 39,4d^{0.6}$$

а для проміжку **вістря – площа**

$$U_{np} = 18,7d^{0.75} \text{ при } 3 \leq d \leq 20 \text{ см}$$

$$U_{np} = 26,6d^{0.64} \text{ при } 30 \leq d \leq 80 \text{ см.}$$

Пробивні напруги рідин у проміжках вістря–площина, як і у випадку газів, **залежать від полярності вістря.** При **негативній полярності вони вищі,** ніж при позитивній, внаслідок екрануючої дії приелектродного об'ємного заряду. Слід зазначити, що **екрануюча дія об'ємних зарядів у рідинах менш ефективна** в порівнянні з екрануючою дією у газах **через рух рідини** в сильному електричному полі. На співвідношення пробивних напруг впливає також **інтенсивна емісія електронів з вістря** при його негативній полярності внаслідок **зниженої роботи виходу електронів** у рідині порівняно з газовим діелектриком.

6.1.3 Пробій технічних рідинних діелектриків

Електрична міцність технічних рідин через вплив домішок газів, рідин чи твердих діелектриків **значно нижча, ніж ретельно очищених**. Так, наприклад, $E_{пр}$ **очищеного трансформаторної оливи складає $\sim 20...25$ МВ/м, а без очищення – всього 4 МВ/м**, що тільки трохи більше, ніж при пробіі повітря.

Як показують дослідження з допомогою швидкісної фотореєстрації, перед пробоем **в однорідному полі** при постійній чи низькочастотній напрузі у рідині формуються ниткоподібні оптичні неоднорідності, що, можливо, є результатом утворення газових бульбашок в результаті теплових процесів, викликаних струмами електронної емісії з катода, струмами наскрізної провідності і абсорбції, а також автоіонізацією молекул рідини. Таким чином є підстави вважати, що **при тривалій дії напруги** на технічні рідкі діелектрики в них можливий **специфічний вид теплового пробію**.

При тепловому пробіі рідких діелектриків такі домішки як **колоїдні крапельки води, волокна паперу і тканини**, що скупчуються в місцях найбільшої неоднорідності поля, утворюють ланцюжки за час не більше 1 с. Якщо ці ланцюжки, особливо зволожені, повністю перекривають простір між електродами, то по них протікає підвищений струм, розігріваючи рідину і утворюючи в ній газові бульбашки, по яких і проходить канал пробію при більш низькій напрузі. Проймовірність такого механізму пробію по містках, утворених краплями води або волокнами, також свідчить підвищення $U_{пр}$ при перемішуванні рідкого діелектрика в процесі пробію.

Пробивна напруга технічно чистих рідин істотно залежить **від форми діючої напруги** і, в першу чергу, від тривалості її прикладення (рис. 6.5). Ріст $U_{пр}$ при $t < 10$ мкс пояснюється **статистичним запізнюванням пробію** (пробій при низьких U не встигає сформуватися). **Зниження $U_{пр}$ при $t > 10^{-2}$ с** пояснюється **впливом домішок**.

Відповідно до часової залежності з **ростом частоти поля електрична міцність технічно чистих рідких діелектриків знижується**.

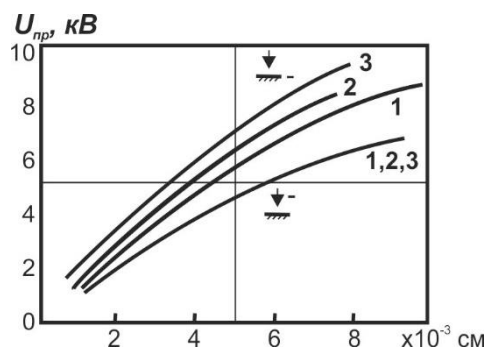


Рис. 6.4. Вплив матеріалу електродів на пробивну напругу $U_{пр}$ гексану: 1 – алюміній, 2 – мідь, 3 – хром

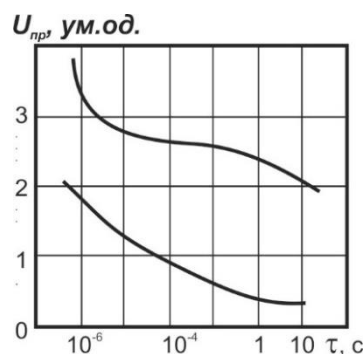


Рис. 6.5 Залежність пробивної міцності трансформаторної оливи від часу: 1 – масло з слідами води; 2 – очищена олива

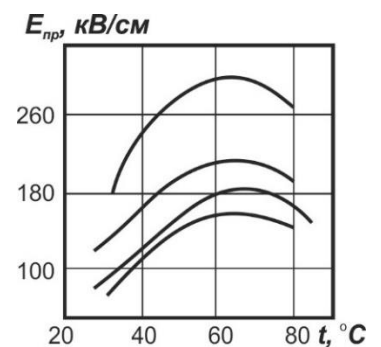


Рис. 6.6. Температурна залежність $E_{пр}$ трансформаторної оливи при концентрації води: 1 – 0,002%, 2 – 0,01%, 3 – 0,05%. 4 – 0,1%

Найбільш істотний вплив на величину U_{np} рідин, особливо неполярних, типу трансформаторної оливи, мають домішки. Найпоширенішою домішкою є **вода**. Вода може перебувати **в розчиненому стані**, тоді вона **не істотно впливає на U_{np}** , або **у вигляді емульсії**, коли її вплив на U_{np} **досить помітний**.

U_{np} трансформаторної оливи різко знижується зі збільшенням вмісту емульгованої води (рис. 6.6). **Пробій зволоженої оливи** звичайно відбувається **вздовж переривистих ланцюжків** деформованих **крапельок води**, що утворюються і орієнтуються під впливом електричного поля. При цьому, внаслідок значно більшої відносної діелектричної проникності води, напруженість поля в оливі, що знаходиться між крапельками води, різко збільшується (для послідовно з'єднаних шарів $\epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2$), що і приводить до передчасного пробію оливи.

З цієї ж причини особливо різке зниження U_{np} спостерігається при наявності в маслі **твердих гідрофільних частинок**. При їх зволоженні, що має місце при наявності емульгованої води в трансформаторній оливі, ϵ_r твердих частинок зростає, вони починають узгоджено орієнтуватися в електричному полі, при цьому утворюються переважані в електричному відношенні прошарки оливи між частинками. Через ці прошарки і відбувається пробій трансформаторної оливи.

Про значний вплив твердих гідрофільних частинок на пробивну напругу свідчить такий приклад: при збільшенні концентрації води до 0,01 мас.% її вплив на U_{np} трансформаторної оливи незначний, але при додаванні до трансформаторного масла 0,002 мас. % води і $1,1 \cdot 10^{-6}$ мас.% волоконців, його U_{np} знижується на 15 %.

У різко нерівномірному полі крапельки води й тверді домішки розбігаються від електрода, утворення містків ускладнюється, і **вплив забруднень на U_{np} різко знижується**. Відсутня залежність U_{np} від ступеня забруднення також при імпульсах напруги, коли містки не встигають створюватися.

6.2 ПРОБІЙ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

6.2.1 Основні закономірності пробію твердих діелектриків

Тверда електрична ізоляція є однією з найпоширеніших в техніці. Це пояснюється її високою електричною міцністю, а також можливістю використовувати її як конструкційний матеріал, тобто для сприйняття механічних навантажень.

Розглянемо закономірності пробію твердої ізоляції за загальною схемою: джерела носіїв заряду в слабких полях, процеси збільшення їхньої кількості в сильних полях, вторинні процеси й критерії пробію.

Як і у випадку газів і рідин для твердих діелектриків з ковалентними зв'язками поява вільних носіїв струму зумовлена іонізацією космічними променями, термогенерацією і наявністю домішок і дефектів структури, що полегшують термогенерацію. Носіями струму є в основному іони й електрони, якщо не враховувати домішкової електропровідності, яка переважно іонна. В іонних кристалічних діелектриках, на відміну від молекулярних, основний внесок в електропровідність дають іони в міжвузлях або іонні вакансії. Концентрація носіїв заряду в діелектриках визначається, як звичайно, формулою

$$n \sim N \exp(-W/kT)$$

де N – число атомів в 1 см^3 ; W – енергія активації.

У сильних полях до зазначених процесів генерації носіїв можна долучити також електростатичну іонізацію в діелектриках з вузькою забороненою зоною, термоелектронну емісію за Френкелем й холодну емісію з електродів.

6.2.2 Електричний пробій твердих діелектриків

Електричний пробій має такі характерні риси:

- високі значення електричної міцності $E_{пр}$ на рівні $10^8 - 10^9 \text{ В/м}$, що пояснюються високою щільністю пакування твердих діелектриків і відсутністю трансляційної степені свободи;
- малий час розвитку пробою (менше 10^{-6} с), але цю в $10 - 100$ разів більший, ніж для повітря) зумовлений швидкістю формування лавино-стрімерного пробою;
- незначне зростання $E_{пр}$ в області низьких температур до температур, близьких до 0°C , і експоненційний спад при вищих температурах, зумовлений особливостями розсіювання електронів кристалічною ґраткою, хоча, не виключено, що в цій області температур ми маємо перехід від електричної форми пробою до теплової;
- практична незалежність $E_{пр}$ від товщини зразка (при $h > 10 - 20 \text{ мкм}$) при умові відсутності дії об'ємних зарядів електронів, емітованих катодом і захоплених електронними пастками в діелектрику;
- різке електричне зміцнення при товщинах $h < 10 - 20 \text{ мкм}$, пов'язане з ускладненнями з формуванням лавини через брак нейтральних частинок, аналогічно тому, що мало місце при пробіі газів на лівій гілці кривої Пашена;
- залежність $E_{пр}$ від щільності пакування структурних елементів діелектрика, що в свою чергу залежить від хімічного складу і будови діелектрика

Розглянемо **часовий перебіг електричного пробою** на прикладі кристалів кухонної солі NaCl . Згідно з експериментальними даними на початковій стадії пробою в кристалі в результаті проходження первинної лавини утворюється **переривистий канал діаметром менше 1 мкм** , після цього **густина струму зростає до $10^8 - 10^9 \text{ А/м}^2$** і від анода починає проростати до катода **проплавлений канал**, навколо якого спостерігається **світіння збудженого діелектрика**. Коли канал доходить до катода, то через цей канал починає **розряджатися паразитна ємність** і відбувається **руйнування діелектрика**.

У кристалах канали пробою прямі, орієнтовані по одному з кристалографічних напрямків, **в аморфних – звивисті**.

Слід зазначити, **що форма каналу пробою не може бути використана для встановлення форми пробою, бо форма каналу і ступінь руйнування діелектрика при пробіі мало залежить від форми пробою, а визначається розрядом ємності діелектрика і паразитної ємності через канал пробою і струмом короткого замикання в колі**.

Як основний процес збільшення кількості носіїв при електричному пробіі розглядається ударна іонізація електронами. Теорії електричного пробою твердих

діелектриків, що ґрунтуються на розгляді тільки ударної іонізації без врахування ініціювальних та вторинних процесів, відрізняються критеріями пробою. Одними з перших були сформульовані **критерії Хіппеля–Коллена**

$$A=B \text{ при } \varepsilon \sim 4\hbar\omega$$

і Фрьоліха

$$A=B \text{ при } \varepsilon=I,$$

де A – енергія, яку електрон отримує від поля за 1 с, B – втрати енергії електрона при взаємодії з коливаннями кристалічної ґратки за той же час, ω – максимальна частота оптичних (зустрічних) коливань ґратки, I – енергія іонізації діелектрика.

Відповідно до **критерію Хіппеля–Коллена** пробій можливий за умови, що кожний вільний електрон, прискорюючись в електричному полі, здобуває енергію, достатню для **подолання гальмування ґраткою в області максимальної взаємодії**. Його використання дає завищені значення пробивної напруги твердих діелектриків.

Відповідно до критерію Фрьоліха – пробій відбувається в тому випадку, коли **тільки швидкі електрони**, що мають енергію, порівнянну з енергією іонізації діелектрика, можуть **перебороти гальмування ґраткою** (рис. 6.7). Таке припущення дозволило дещо знизити завищені за Хіппелем значення пробивної напруги.

6.2.3 Тепловий пробій твердих діелектриків

Тепловий пробій, на відміну від електричного, не має своєї теорії. Те, що в літературі називається теоріями теплового пробою, є лише **теоріями порушення теплової рівноваги між діелектричними втратами на електропровідність і теплотою, що відводиться в зовнішнє коло** згідно закону Ньютона.

Якою неоднорідністю визначається локальне місце пробою площею в долі мм², наприклад, при пробії конденсатора з площею м²; як формується канал пробою, що є основною ознакою пробою згідно з визначенням; які процеси, що задіяні в ньому зумовлюють від’ємну диференціальну провідність, яка також є невід’ємною ознакою при будь-якій формі пробою; як залежить струм пробою, саме пробою, а не струм, що відповідає критичному режиму тепловіддачі, від відстані між електродами і часу; яка температура розвивається в каналі пробою – про це в існуючих теоріях «теплового пробою» нічого не говориться. Так що **створення теорії теплового пробою – справа майбутнього**, можливо хтось із теперішніх студентів зробить цю справу. Але в лекціях ми будемо дотримуватися прийнятої термінології і називати існуючі теорії порушення теплової рівноваги між діелектричними втратами на електропровідність і теплотою, що відводиться в навколишнє середовище, теоріями теплового пробою.

Розглянемо найпростіший варіант теорії теплової рівноваги. Апроксимувати діелектричні втрати на електропровідність ми будемо дещо спрощеним виразом, що справедливий у вузькому інтервалі температур, але дає можливість спростити розгляд і інтерпретацію результатів,

$$P_d = U^2 w C t g \delta_0 \exp(a(t^\circ - t_0^\circ)),$$

а відведена в навколишнє середовище теплоту згідно закону Ньютона приймати рівною

$$Q = \alpha_t S (t_n^\circ - t_{nc}^\circ),$$

де α_t – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні діелектрика; S – площа поверхні діелектрика; t_n – температура поверхні; t° – температура діелектрика; t_0 – температура, при якій визначався $\text{tg } \delta_0$; t_{nc} – температура навколишнього середовища.

Спочатку зведемо обидва вирази, які відрізняються температурами, до одних змінних. Оскільки, t_0 – температура, при якій визначався $\text{tg } \delta_0$, а t_{nc} – температура навколишнього середовища, то можна домовитися, що початкові діелектричні втрати беруться при умові, що $t_0 = t_{nc}$. Ніяких обмежень на теорію, крім узгодження вибору температур, при яких береться значення $\text{tg } \delta_0$, це не накладає. Дещо складніше з температурами t_n і t° , якщо ми їх прирівнюємо, то нехтуємо перепадом температур в об'ємі діелектрика і дещо завищуємо $U_{пр}$, але на це доводиться йти, щоб отримати систему двох рівнянь з двома невідомими, і тому приймаємо $t_n = t^\circ$.

З врахуванням прийнятих наближень вирази для P_d і Q мають вигляд:

$$P_d = U^2 w C \text{tg } \delta_{nc} \exp(a(t_n^\circ - t_{nc}^\circ)),$$

$$Q = \alpha_t S (t_n^\circ - t_{nc}^\circ).$$

Графіки цих характеристик зображені на рис. 6.7. Діелектричні втрати P_d показані для трьох напруг – докритичної, критичної і закритичної. При докритичній напрузі крива P_d перетинається з прямою Q , що характеризує відведення теплоти в навколишнє середовище, в двох точках рівноваги t_{pc} і t_{pn} , де $P_d = Q$.

При ввімкненні напруги $t_n = t_{nc}$, $Q = 0$, а $P_d = P_d(t_{nc}^\circ)$, тепловиділення переважає тепловіддачу і діелектрик нагрівається до точки стійкої рівноваги t_{pc} .

Якщо діелектрик буде перегрітий тимчасово до більш високої температури, ніж температура стійкої рівноваги, не за рахунок діелектричних втрат, а зовнішніми джерелами теплоти, наприклад за рахунок джоулевих втрат в обмотці при струмовому перевантаженні, то при припиненні його дії температура знову повернеться в точку t_{pc} , віддаляючись від точки нестійкої рівноваги t_{pn} .

В той же час, після переходу через точку t_{pn} за рахунок зовнішніх джерел енергії почнеться неконтрольоване розігрівання і пробій діелектрика, тобто температура знову буде віддалятися від t_{pn} , тому точка t_{pn} і називається точкою нестійкої рівноваги.

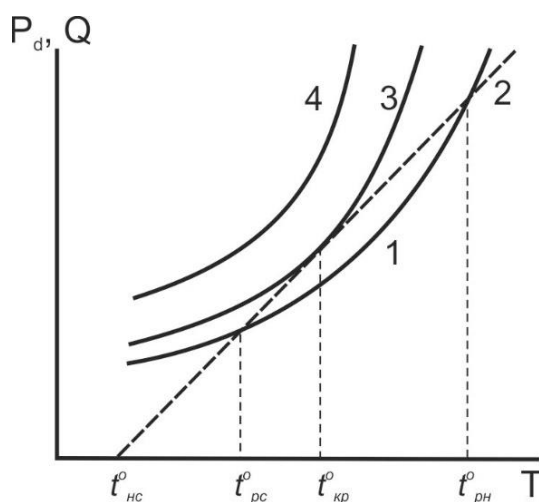


Рис. 6.7. Залежність тепловиділення (1,3,4) і тепловіддачі (2) від температури

При підвищенні напруги точки рівноваги зближуються і в критичному режимі зливаються в одну невідому критичну температуру $t_{кр}$. Таким чином, в критичному режимі є тільки одна точка теплової рівноваги, і саме цей режим вважається таким, що відповідає пробію. Відповідно, напруга, що відповідає критичному режиму, є найменшою напругою, що викликає пробій, тобто є пробивною напругою діелектрика за визначенням. В закритичному режимі завжди буде спостерігатися тільки необмежене розігрівання діелектрика і його пробій.

Для знаходження двох невідомих величин потрібно два рівняння. Перше з них відповідає умові критичної рівноваги $P_{dkp} = Q_{кр}$, а друге випливає з того факту, що пряма $Q_{кр}$ в критичному режимі є дотичною до кривої P_{dkp} .

Таким чином, маємо систему двох нелінійних рівнянь з двома невідомими, яка має як рішення пробивну напругу U_{np} , якій відповідає критична температура $t_{кр}$

$$P_{dkp} = \alpha_t S (t_{кр}^{\circ} - t_{нс}^{\circ}),$$

$$a P_{dkp} = \alpha_t S.$$

При розв'язанні системи рівнянь, поділивши перше рівняння на друге, будемо мати для критичної температури

$$t_{кр}^{\circ} = t_{нс}^{\circ} + 1/a.$$

Підставивши це значення в перше рівняння знайдемо пробивну напругу діелектрика

$$U_{np} = \sqrt{\frac{\alpha_t S}{eawCtg\delta_{нс}}},$$

або, якщо підставити в розгорнутому вигляді вираз для ємності плоского зразка діелектрика, що віддалено може слугувати за діелектрик з однорідним полем, то

$$U_{np} = \sqrt{\frac{\alpha_t h}{eaw\varepsilon_0\varepsilon_r tg\delta_{нс}}},$$

де h – товщина діелектрика.

Тепловий пробій має ряд особливостей, які ми розглянемо більш детально.

З першої формули випливає, що при тепловому пробію температура поверхні діелектрика перевищує температуру навколишнього середовища на $1/a$, де a – температурний коефіцієнт $tg\delta$, і, виходячи з практичного досвіду, можна стверджувати, що тепловий пробій можливий, якщо $a \approx 10^{-2}$, бо значні перегрівання діелектрика поза неоднорідністю, в якій формується пробій, на практиці не спостерігаються.

Згідно другої формули пробивна напруга діелектрика U_{np} при тепловому пробію тим вища, чим краща тепловіддача в навколишнє середовище, і тим нижча, чим більші значення мають $tg\delta_{нс}$, частота, Tk та $tg\delta$ і ємність.

Залежність U_{np} від умов тепловіддачі приводить до того, що ні U_{np} , ні E_{np} не є не тільки характеристиками діелектрика, але й конструкції, бо U_{np} залежить від коефіцієнта тепловіддачі в навколишнє середовище від поверхні діелектрика, який з допомогою вентиляції можна підвищити, а значить підвищити U_{np} і E_{np} в 2 – 2,5 рази. Саме тому, на електрогенерувальних підприємствах найпильніша увага приділяється контролю системи охолодження гідро- і турбогенераторів, в якій використовується примусова конвекція водню, що є найкращим охолоджуючим газом.

І ще одне суттєве зауваження, пробивна напруга U_{np} залежить від $tg\delta_{нс}$ навколишнього середовища, тобто його початкового значення, а не $tg\delta$ досягнутим в процесі розігрівання діелектрика, як можна було чекати. Це означає, що пробивна напруга при тепловому пробої є експоненційною функцією температури навколишнього середовища з енергією активації, що дорівнює половині енергії активації електричної провідності $W_{апроб} = W_{апров}/2$, що може служити критерієм для вибору форми пробою.

Як відомо, на низьких частотах на величину $tg\delta$ помітно впливають зволоження, релаксаційні й абсорбційні процеси. Однак, потрібно мати на увазі, що величина $tg\delta$ не завжди може служити критерієм стійкості діелектрика до теплового пробою. В теорію закладено, що тепловий пробої діелектрика визначається $tg\delta$ на електропровідність. Це означає, що оцінювати стійкість до теплового пробою по $tg\delta$ при 20°C можна тільки для іонних зі щільним упакуванням або неполярних діелектриків. Вважати, що зволожена й неоднорідна ізоляція менш надійні або що пробивна напруга полярного діелектрика буде меншою, ніж неполярного, не завжди можна, бо за рахунок діелектричних втрат зволожена ізоляція в електричному полі при поступовому підвищенні напруги підсихає і нагрівання її зменшується, а $tg\delta$ при релаксаційній і міграційній поляризаціях проходить через максимум і далі діелектрик автотермостабілізується і його пробої за рахунок релаксаційних втрат стає неможливим.

При наявності втрат на електропровідність і релаксаційних втрат при нормальних умовах температурна залежність $tg\delta$ може мати максимум, що зумовлений максимумом релаксаційних втрат, і мінімум, зумовлений накладанням на спад релаксаційних втрат зростаючих втрат на електропровідність. В таких випадках тепловий пробої відбудеться при критичній температурі поблизу температури мінімуму діелектричних втрат. Детально цей фактор в літературі не аналізувався, але потрібно мати його на увазі.

При зміні температури навколишнього середовища застосовується початкове значення $tg\delta_{нс}$, яке відповідає новій температурі, і відповідно змінюється U_{np} . Однак, аналогічна залежність від температури спостерігається й при електричному пробої у області температур вище нуля за Фрьоліхом, з врахуванням того, що при електричному пробої вважається, що температура діелектрика дорівнює температурі навколишнього середовища. Тому зниження U_{np} з ростом температури не можна вважати характерною ознакою теплового пробою.

Звичайно тепловий пробої характеризується залежністю U_{np} від частоти й форми випробувальної напруги та умов відведення теплоти. Крім того, тепловий

пробій відрізняється великою інертністю. Встановлення рівноважного стану і його порушення можуть тривати хвилинами, а іноді й годинами, що залежить від теплової сталої діелектричної конструкції, на відміну від електричного пробою, де час формування пробою складає менше 1 мкс. При тепловому пробі спостерігається нелінійність $U_{np}(d)$. Розвиток теплового пробою при постійній напрузі звичайно пов'язують з нестабільністю іонної провідності діелектрика. Тому у більшості ковалентних і молекулярних бездомішкових діелектриків повинен мати місце електричний пробій.

При тепловому пробі U_{np} обернено пропорційна кореню квадратному з частоти. Це можна використати для важливого з врахуванням можливості зовнішнього впливу на величину пробивної напруги при тепловому пробі практичного визначення форми пробою діелектрика. Якщо пробивна напруга на постійній напрузі і змінній напрузі частотою 50 Гц (при змінній напрузі ми вимірюємо діючу напругу) однакова, то пробій тепловий, якщо пробивна напруга при змінній напрузі менша приблизно в $\sqrt{2}$ раз, то електричний, бо пробій розвивається при максимальному значенні напруги.

Залежність від ємності за межами областей дисперсій незначна і, рідко враховується при розрахунках.

В літературі, навіть в підручниках і навчальних посібниках, при розгляді простої моделі пробою не розглядається питання про вплив сторонніх джерел енергії на пробивну напругу діелектрика. В той же час, така ситуація на практиці зустрічається досить часто, наприклад ізоляція кабелю підігрівається внаслідок протікання струму по жилі, ізоляція статорної обмотки обертових електричних машин – по обмотці, а також теплотою, що виділяється в результаті магнітних втрат тощо. Для врахування сторонніх джерел енергії в ліву частину формули для теплового балансу додамо незалежне джерело потужності $P_{ст}$, що підігріває діелектрик, і виконаємо практично ті ж самі дії над системою. В результаті отримаємо для U_{np} формулу

$$U_{np} = \sqrt{\frac{\alpha_t S}{e a \omega C t g \delta_{nc}} \exp\left(-\frac{a P_{cm}}{\alpha_t S}\right)},$$

згідно якої U_{np} експоненціально знижується в залежності від потужності сторонніх джерел теплоти, що пояснює аварії на виробництві у відсутності суттєвих перенапружень в ізоляції.

Так виглядають основні закономірності, що впливають з найпростішої теорії теплового пробою.

Більш детальна і набагато досконаліша теорія теплового пробою твердих діелектриків розвинута Фоком, Вальтером і Семеновим. Основні положення цієї теорії в основному відповідають прийнятим для найпростішої теорії. Додатково враховувалося, що відведення теплоти від діелектрика в навколишнє середовище здійснюється через електроди.

Розв'язок диференціального рівняння, що описує тепловий баланс у діелектрику, дає з умови його порушення для плоского зразка

$$U_{np} = 3,79 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{k}{af\varepsilon \cdot tg\delta}} \varphi(c),$$

де k – коефіцієнт теплопровідності діелектрика; $\varphi(c)$ – функція від $c = \frac{d\lambda}{2k}$, де d – товщина ізоляції; λ – коефіцієнт теплопровідності області між діелектриком і електродами.

Функція $\varphi(c)$ має вигляд, показаний на рис. 6.8 (крива $\varphi_1(c)$ відповідає більш точній теорії, в якій враховується перерозподіл поля, пов'язаний з температурним градієнтом в діелектрику)

Для циліндричних зразків

$$U_{np} = 1,9 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{k}{af\varepsilon \cdot tg\delta}} \varphi(c), \quad c = \frac{\lambda \ln \frac{r_2}{r_1}}{k}$$

Теорія Фока-Вальтера-Семенова дає результати, досить близькі до реальних при певному виборі параметрів і в цьому випадку її можна застосовувати для технічних розрахунків високовольтної ізоляції. Але, слід пам'ятати, що вона також є тільки теорією порушення теплової рівноваги між діелектричними втратами на електропровідність і теплою, що відводиться в навколишнє середовище, і що в ній також не враховується вплив сторонніх джерел нагрівання на порушення теплової рівноваги.

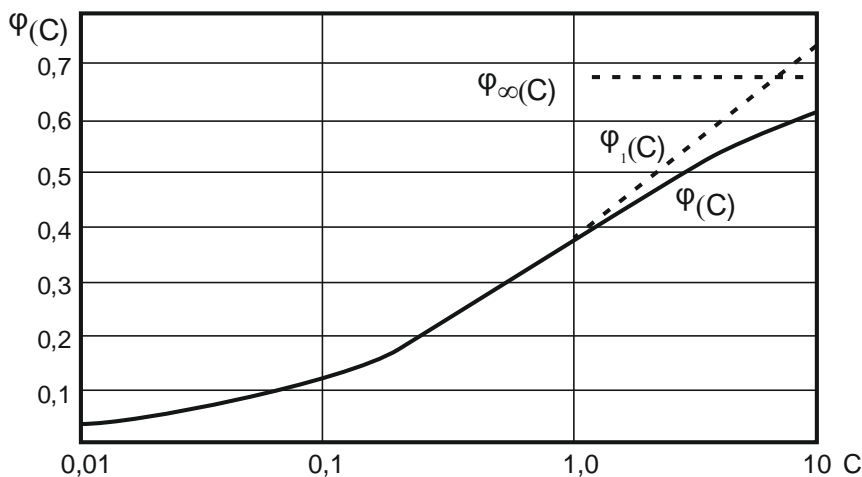


Рис. 6.8. Функція $\varphi(c)$ по теорії Фока-Вальтера-Семенова

На практиці можлива ситуація, коли діелектрик в результаті нагрівання діелектричними втратами і сторонніми джерелами теплоти буде обвуглюватися, плавитися, або розкладатися і втрачати електроізоляційні властивості без формування каналу пробую. Така ситуація називається тепловим пробоем другого роду, і потрібно мати на увазі і таку можливість в процесі експлуатації електрообладнання.

6.2.4 Пробивна напруга твердих діелектриків

Пробивна напруга твердих діелектриків звичайно розраховується за формулою

$$U_{np} = E_{np} d$$

Причому E_{np} береться з довідників по електроізоляційних матеріалах. Однак, при цьому варто враховувати, що U_{np} твердої ізоляції, як і газової і рідкої, залежить від конфігурації електродів, стану, структури і товщини матеріалу й форми напруги, що діє на матеріал.

Наприклад, міцність литої епоксидної ізоляції в системі електродів різної конфігурації залежить від товщини, як наведено на рис. 6.9., і може змінюватися до 2 – 3 раз в залежності від форми електродів. А тому при користуванні довідниками потрібно звертати увагу на те, при якій формі електродів і товщині матеріалу визначалася електрична міцність конкретних діелектриків.

Як і у випадку газів і рідин, мінімальне значення U_{np} має місце для проміжку вістря–площина при позитивній полярності вістря. Крім того, у різко нерівномірному полі порушується пропорційність між U_{np} і d (рис. 6.10)

Аналогічні залежності спостерігаються й для інших твердих діелектриків. Причому чим більше їхня неоднорідність, тим більше виражена залежність U_{np} від d і рівномірності поля. Так, наприклад, U_{np} порцеляни різко знижується зі збільшенням довжини пор на 1 мм зразка (рис. 6.11).

Залежність U_{np} від форми напруги, що впливає на матеріал, уже частково обговорювалася. При тепловому пробі $U_{np} \sim f^{-0.5}$. При електричному U_{np} не залежить від частоти до частот порядку 10^4 Гц. Однак, як і при пробі газів і рідин, у випадку дуже коротких імпульсів в неоднорідному полі спостерігається збільшення U_{np} , обумовлене статистичним характером пробі (рис. 6.12, а).

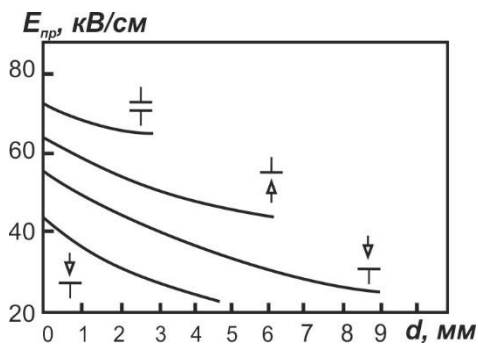


Рис. 6.9. Залежність електричної міцності епоксидних компаундів від товщини діелектриків у неоднорідному полі, нижній електрод заземлений. Найменша міцність має місце для позитивної полярності вістря

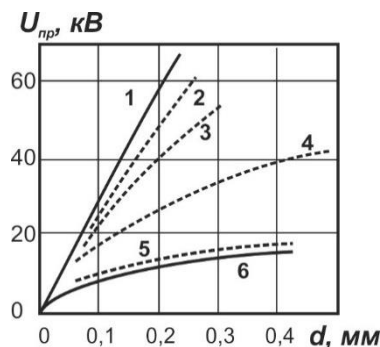


Рис. 6.10. Залежність пробивної напруги скла від відстані між платиновим дротом діаметром 1 мм (2), 0,3 мм (3), 0,1 мм (4), 0,03 мм (5) і площиною. 1 – однорідне поле; 6 – мінімальні значення

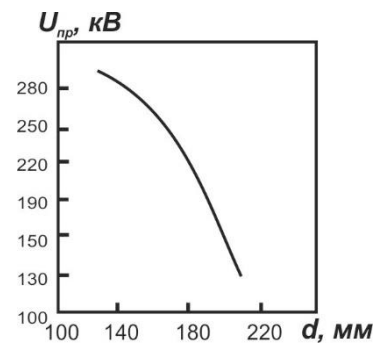


Рис. 6.11. Залежність пробивної напруги порцеляни від довжини пор

Для неоднорідних діелектриків в області більшої тривалості дії напруги спостерігається ще одна область зниження електричної міцності внаслідок впливу дефектів, просторових зарядів, розігрівання тощо (рис. 6.12, б).

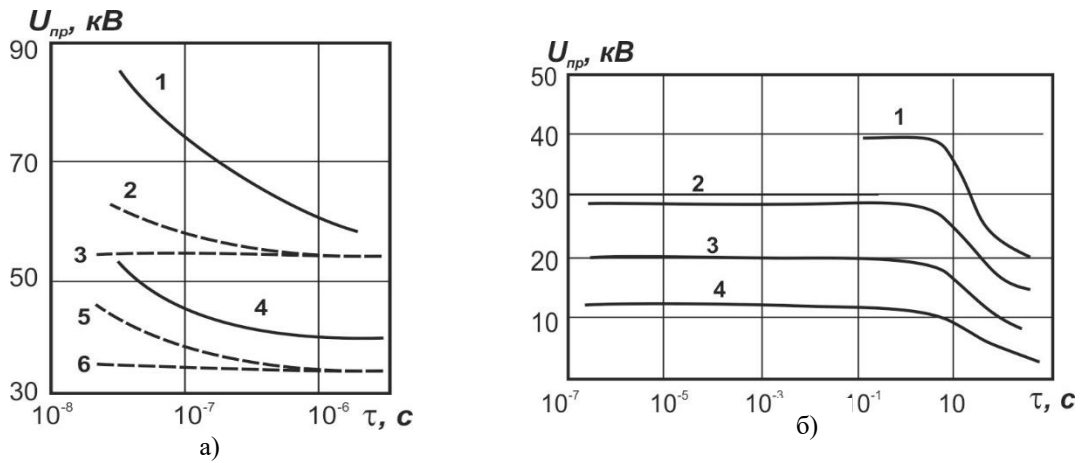


Рис. 6.12. Залежність пробивної напруги скла від тривалості імпульсу в неоднорідних (а): 1,2,3 – товщина 4 мм, 4, 5, 6 – 2 мм, 2, 5 – початкові напруги (корона), 3, 6 – пробивна напруга при 50 Гц і однорідних (б): товщина 1 – 0,05 мм, 2 – 0,1 мм, 3 – 0,15 мм, 4 – 0,2 мм – полях

Збільшення тиску звичайно слабо впливає на пробій твердих діелектриків. Спостерігається незначне підвищення пробивної напруги, зумовлене збільшенням густини діелектрика.

ЛЕКЦІЯ 7

7.1 ІОНІЗАЦІЙНИЙ ПРОБІЙ (ТРИНГ) ДІЕЛЕКТРИКІВ

7.1.1 Часткові розряди у високовольтній ізоляції

За визначенням, *до часткових розрядів належать розряди, які не закорочують основні електроди каналом високої провідності* (корона, розряди у газових порожнинах в твердих чи рідких діелектриках тощо).

Часткові розряди можна класифікувати на *зовнішні та внутрішні*.

Зовнішні часткові розряди у газоподібних діелектриках можливі в різко неоднорідному полі *у вигляді коронного розряду*, наприклад на дротах ЛЕП або шинах розподільних пристроїв. Під їх дією може спостерігатися *утворення хімічно активних продуктів у газі*, які потім шкідливо впливають на ізоляцію або струмоведучі елементи.

Крім того, зовнішні часткові розряди можуть розвиватися в газі *по поверхні твердих діелектриків в різко неоднорідному полі*. Якщо діелектрик полімерний, то вони приводять до *утворення провідникових доріжок – треків*, розвиток яких закінчується *поверхневим пробоєм*. Вони також руйнують напівпровідникові покриття, що застосовуються для вирівнювання поля в лінійних ізоляторах.

Внутрішні часткові розряди у добре вакуумованій рідкій або просоченій ізоляції виникають у найбільш напружених місцях, *викликаючи розкладання рідкого діелектрика*. У результаті *утворюється газ*, що спочатку розчиняється в рідкому діелектрику, а потім, після перевищення порогу розчинності, збирається в бульбашки, у яких *виникають інтенсивні критичні часткові розряди*, тому що електрична міцність газу значно нижча електричної міцності рідини. Під дією цих критичних часткових розрядів ізоляція пробивається за порівняно короткий час – тижні, місяці. Таким чином, *час до пробою рідкої й просоченої ізоляції, крім інтенсивності розрядів, визначається інтенсивністю виділення і розчинністю газів*, що утворюються при впливі початкових часткових розрядів.

У твердих діелектриках внутрішні часткові розряди виникають у повітряних або газових порожнинах, які часто утворюються в процесі виготовлення або експлуатації. В останній час внаслідок поліпшення технології розміри порожнин в полімерній ізоляції рідко перевищують 50 мкм, що суттєво знижує інтенсивність і руйнівну дію часткових розрядів.

Крім того, *при напруженостях 10 – 20 кВ/мм часткові розряди можуть виникати і в полімерах, що не містять порожнин, внаслідок утворення об'ємних зарядів* при емісії електронів (дірок) з загострень на електродах, чи з локальних дефектів, що викликають перенапруження, в місцях знаходження сторонніх включень, таких як провідникова чи діелектрична частинка з іншою діелектричною проникністю, локальні обводнені включення (водний тріінг) тощо *і наступних пробоев в полі об'ємних зарядів*. *

Хоча внутрішні часткові розряди мають малу потужність (енергія приблизно $10^{-10} - 10^{-6}$ Дж, тривалість $10^{-9} \dots 10^{-6}$ с), вони викликають деструкцію (руйнування полімерних молекул) і ерозію (руйнування поверхні) полімерних діелектриків у

місці контакту з каналом розряду та утворення порожнистих розгалужених каналів в об'ємі діелектрика – дендритів, іноді в гумі з провідними стінками. Цей процес називається тріінгом.

Саме *руйнівна дія часткових розрядів відіграє найбільш істотну роль в обмеженні часу експлуатації* високовольтної полімерної ізоляції, трансформаторної оливи та паперово-оливної ізоляції до пробою *при робочій напрузі, що перевищує напругу виникнення часткових розрядів.*

На неорганічну ізоляцію часткові розряди можуть впливати тільки при високих частотах, локально розігріваючи її внаслідок діелектричних втрат, що може *спричинити термомеханічні напруження і розтріскування* керамічних діелектриків, особливо конденсаторних.

Зумовлений іонізаційними процесами, що супроводжують часткові розряди у газових порожнинах діелектриків, *пробій називається іонізаційним*. Власне кажучи, *назва «іонізаційний пробій» є не зовсім коректною, бо суперечить визначенню пробою*, як процесу утворення провідникового каналу в діелектрику. Насправді, під дією часткових розрядів йде старіння діелектрика, зниження його електричної міцності, і через певний час при робочій напрузі відбувається електричний або тепловий пробій. Таким чином, *для іонізаційного пробою немає ні пробивної напруги, ні електричної міцності, а є лише час до пробою (час життя)*, як це має місце для всіх процесів старіння – поступового погіршення властивостей матеріалу під дією експлуатаційних і зовнішніх факторів до критичного рівня.

Звісно, *можна прийняти за пробивну напругу при іонізаційному пробої напругу виникнення часткових розрядів, а кількарічне руйнування діелектрика розглядати як процес формування провідникового каналу в ньому по аналогії з тепловим пробоем*, для якого пробій теж можливий тільки *після розігрівання діелектрика, яке займає певний час.*

На наш погляд, ситуація у цих двох випадках відрізняється тим, що сам *процес розігрівання діелектрика не супроводжується незворотними змінами структури і характеристик діелектрика*, і якщо напругу вимкнути до настання теплового пробою, то характеристики діелектрика відновляться на початковому рівні. В той же час *при дії часткових розрядів* весь час *спостерігається незворотне погіршення характеристик діелектрика*, зокрема зниження пробивної напруги. Аналогічна ситуація має місце і при електрохімічному пробої. Так що краще було б розглядати *іонізаційний і електрохімічний пробій, як процеси старіння, що закінчуються руйнуванням діелектрика*, в даному випадку пробоем. Але ми будемо розглядати їх у відповідності до класифікації МЕК, як види пробою, в тому числі іонізаційний пробій, як такий, що зумовлений дією часткових розрядів.

Зниження часу до пробою ізоляції при наявності часткових розрядів характерне для всіх твердих діелектриків, але особливо істотно для полімерів. Маючи малі $\epsilon_r = 2 - 5$ і $\text{tg } \delta = 10^{-4} - 10^{-3}$, велику електричну міцність (до 200 – 300 кВ/мм), *полімерні діелектрики при відсутності часткових розрядів могли б працювати при великих електричних навантаженнях тривалий час*. Часткові розряди скорочують його в сотні разів, обмежуючи тим самим можливість

органічної ізоляції. З огляду на те, що іонізаційний пробій є основним фактором, що обмежує можливості органічної ізоляції і на важливість проблем підвищення робочої напруги і терміну служби полімерної ізоляції, а також не досить коректним розглядом закономірностей іонізаційного пробію в навчальній літературі, розглянемо його більш докладно.

Стійкість полімерних діелектриків до дії часткових розрядів залежить від інтенсивності останніх. Основними характеристиками, що використовують для оцінки інтенсивності внутрішніх часткових розрядів, є **напруга виникнення часткових розрядів, частота повторення, уявний заряд, середній струм, потужність часткових розрядів і іонізаційний $\text{tg}\delta$.** Для об'єктів одного типу уявний заряд зростає з ростом розмірів порожнин, а час до пробію обернено пропорційний середньому струму часткових розрядів. Ці закономірності використовуються для діагностування електричної ізоляції.

Слід відзначити, що полімерні діелектрики суттєво відрізняються по стійкості до утворення дендритів: фторопластова плівка під дією часткових розрядів перетворюється на сито з багатьма наскрізними дірочками, найбільша з яких і стає причиною пробію, на поліетиленовій – виникає ерозія у вигляді фігур Ліхтенберга, що зменшують товщину діелектрика, поки прикладена напруга не стане рівною пробивній, полістирольна плівка при часткових розрядах взагалі не має зовнішніх пошкоджень, можна бачити тільки канал пробію, що утворився внаслідок дії часткових розрядів. Так що вважати, що в усіх випадках саме дендритоутворення, тобто утворення порожнистих каналів, є основним в процесі старіння під дією часткових розрядів, на нашу думку, не зовсім коректно.

7.1.2 Часткові розряди в порожнинах діелектриків при постійній напрузі

Часткові розряди в порожнинах діелектриків **починаються за умови, що напруга на порожнині** досягає значення, що **дорівнює пробивній напрузі газу у ній. Прикладена до ізоляції напруга, при якій починаються часткові розряди в газових порожнинах називається напругою виникнення часткових розрядів.** Вона різна на постійному й змінному струмах, тому що постійна напруга розподіляється за провідностями, а змінна – за діелектричними проникностями. Якщо проводити експеримент на моделях з відомими ϵ й h , то можна встановити, що пробивна напруга $U_{пр}$ газу у порожнині приблизно така ж або на 10–20% вища ніж для газу між металевими електродами аналогічної конфігурації.

Для розгляду умов виникнення часткових розрядів можна скористатися найпростішою еквівалентною схемою діелектрика із порожниною (рис. 7.1). Еквівалентна схема діелектрика містить послідовно з'єднані ємність і опір газової порожнини C_1, R_1 і ємність і опір діелектрика між порожниною і

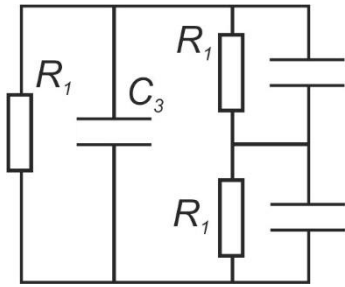


Рис. 7.1. Еквівалентна схема діелектрика із порожнинами: C_1, R_1 – ємність і опір порожнини, C_2, R_2 і C_3, R_3 – те ж для діелектрика

електродами C_2, R_2 , а також паралельно їм включені ємність і опір бездефектного діелектрика C_3, R_3 .

Для визначення напруги виникнення розрядів при постійній напрузі достатньо розглянути розподіл напруги за ланцюжком C_1-R_1, C_2-R_2 , нехтуючи шунтувальною дією C_3 і R_3 . Якщо прийняти до уваги, що при подачі постійної напруги вона спочатку розподіляється за ємностями, а потім експоненціально переходить в розподіл по опорах, то для напруги на порожнині U_1 можна записати

$$U_1 = U_0 \left[\frac{R_1}{R_1 + R_2} + \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \exp \left(- \frac{t}{\tau_{екв}} \right) \right],$$

де U_0 – величина прикладеної постійної напруги, $\tau_{екв} = (C_1 + C_2) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ – стала часу заряджання порожнини.

Коли в процесі зростання напруга на порожнині U_1 досягне значення U_{np} , то відбудеться перший розряд, напруга на порожнині в результаті заряду протилежних поверхонь порожнини різнойменними зарядами знизиться до напруги гасіння розряду, яка різними дослідниками приймається рівною від нуля до $0,8 U_{np}$, й розряд припиниться. Після розряду буде продовжуватися еквідистантне зростання напруги згідно з графіком напруги на порожнині до нового пробоя, аж поки різниця напруг на порожнині не стане менше пробивної.

Коли напруга на порожнині буде знаходитися в межах $U_{м1} - U_{np}$, буде відбуватися поступове зростання напруги на ній від нуля до пробивної внаслідок релаксації зарядів, що осіли на поверхні порожнини, і заряджання порожнини. Цей процес буде проходити зі сталою часу $\tau_0 = \epsilon_0 \epsilon_r \rho$. Впливом поверхневого заряду, що осів на стінках порожнини, на сталу часу заряджання ємності порожнини, враховуючи товщину діелектрика, можна знехтувати.

Для реальних діелектриків $\tau_{екв}$ становить десяті долі – десятки секунд. Тому при постійній напрузі часткові розряди відбуваються дуже рідко, і тільки на стадії заряду ємності діелектричної конструкції, коли постійна напруга зростає, розряди будуть відбуватися дещо частіше.

Частоту повторення часткових розрядів можна визначити з умови, що при розряді

$$U_1 = U_{np} = U_0 \left[\frac{R_1}{R_1 + R_2} + \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \exp \left(- \frac{t_p}{\tau_0} \right) \right].$$

Звідси для часу між двома розрядами T , знаходимо

$$T = \tau_{\delta} \ln \frac{U_{np} - U_{вчр} \frac{R_1}{R_1 + R_2}}{U_{вчр} \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)}$$

Загальний характер залежності напруги на порожнині від часу наведений на рис. 7.2., а залежності t_p від E на рис. 7.3.

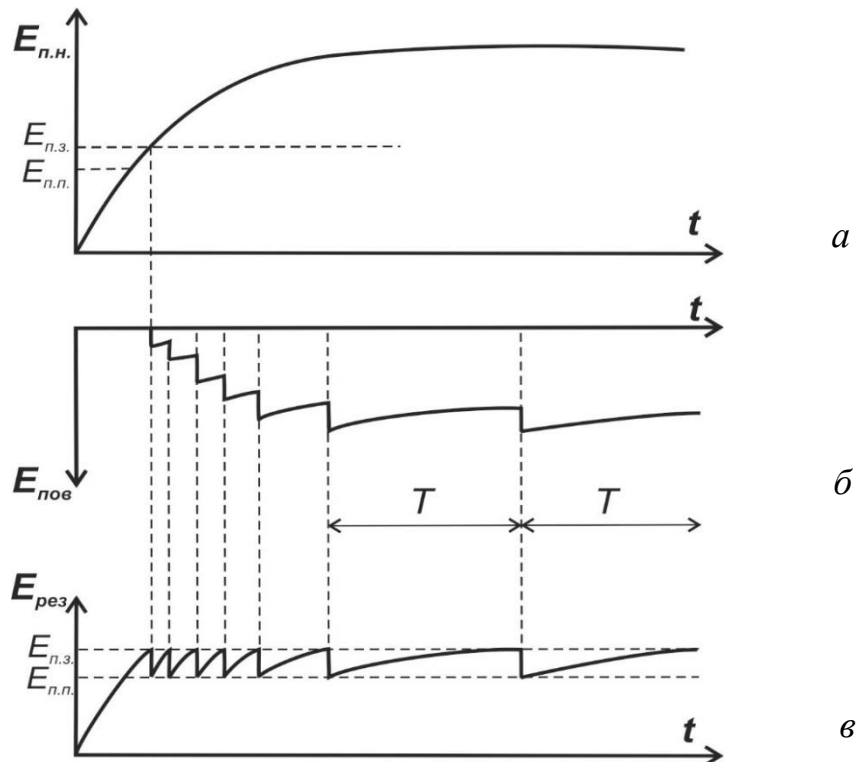


Рис. 7.2. Схема ЧР на постійній напрузі: *а* – напруженість прикладеного поля; *б* – напруженість поля поверхневого заряду; *в* – результуюча напруженість поля

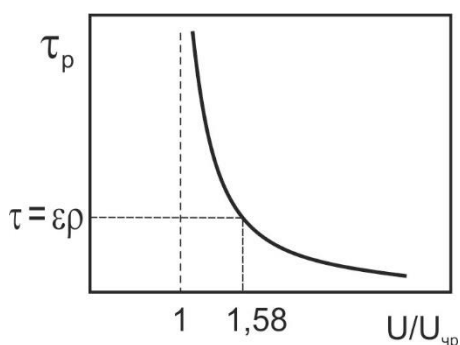


Рис. 7.3. Залежність часу між розрядами від напруги. $U_{вчр}$ – напруга виникнення часткових розрядів

Звичайно частота повторення часткових розрядів перевищує розрахункове значення. Найбільш імовірною причиною цього є те, що поперечний розмір каналу часткового розряду часто менше 0,1 мм, а тому порожнини, що мають більшу площу, можуть розряджатися не одним, а кількома розрядами, хоча, можливо, на частоту повторення часткових розрядів впливає і неповний розряд порожнини. Враховуючи недоступність порожнини і можливість вимірювання характеристик процесів, що супроводжують частковий розряд, тільки у зовнішньому колі, визначити, який з цих факторів має місце, практично неможливо.

Як відзначалося, частота повторення (число часткових розрядів в 1 с)

$$n = 1/T$$

є однієї з характеристик інтенсивності часткових розрядів. Іншими найбільш вживаними характеристиками інтенсивності часткових розрядів є уявний заряд ΔQ_x і відносна інтенсивність або середній струм часткових розрядів I_x .

Уявний заряд – це міра найбільшого заряду, що компенсується у зовнішньому колі при одиничному частковому розряді. Нейтралізація накопиченого на порожнині заряду $U_{np}C_1$ еквівалентна подачі на порожнину східчастої напруги ($-U_{np}$). Враховуючи, що розряд має малу тривалість, впливом опорів можна знехтувати й розглядати чисто ємнісну еквівалентну схему діелектрика із порожниною. З неї випливає, що нейтралізація заряду на порожнині приведе до зниження напруги на C_3 (або на електродах) на величину $\Delta U = \frac{U_{np}C_2}{C_2 + C_3}$. При цьому, в зовнішньому колі це

зниження буде сприйматися як втрата діелектриком заряду, який при умові $C_3 \gg C_1$ й C_2 , що завжди виконується, дорівнює

$$\Delta Q_x = \left(C_3 + \frac{C_2C_1}{C_1 + C_2} \right) \Delta U \approx U_{np}C_2 = U_{вчр} \frac{C_2^2}{C_1 + C_2}.$$

Середній струм часткових розрядів дорівнює заряду, що нейтралізується в діелектрику за 1 с, тобто

$$I_x = n \cdot \Delta Q_x,$$

а потужність часткових розрядів

$$P_{чр} = U_{вчр} I_x.$$

7.1.3 Часткові розряди в діелектриках при змінній напрузі

При змінній напрузі впливом резистивних опорів еквівалентної схеми діелектрика з порожниною на розподіл напруги можна знехтувати. Тоді згідно трьохємнісної еквівалентної схеми, що залишилася, для шаруватої (складеної, намотаної) моделі ізоляції з порожниною у формі щілини, для якої h_1 і $h_2 = \text{const}$, для максимального значення напруги виникнення часткових розрядів з умови $U_{1m} = U_{np}$ маємо

$$U_{твчр} = U_{np} \frac{C_1 + C_2}{C_2} = U_{np} \left(1 + \frac{h_2}{\varepsilon_2 h_1} \right)$$

$$\text{або } U_{вчр} = U_{np} \left(1 + \frac{h_2}{\varepsilon_2 h_1} \right) / \sqrt{2} = (A + B h_1) \left(1 + \frac{h_2}{\varepsilon_2 h_1} \right).$$

При $50 \text{ мкм} \leq h_1 \leq 600 \text{ мкм}$ $A=0,35 \text{ кВ}$, $B=31 \text{ кВ/см}$ (для A і B наведені діючі значення напруги).

Для екструдованої ізоляції з фіксованою товщиною h і змінною товщиною порожнини h_1 , що збільшується за рахунок зменшення h_2 ,

$$U_{\text{впр}} = (A + Bh_1) \left(1 + \frac{h-h_1}{\varepsilon_2 h_1} \right) = (A + Bh_1) \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{h}{\varepsilon_2 h_1} \right).$$

Таким чином, в загальному випадку можна записати

$$U_{\text{впр}} = (A + Bh_1) \left(a + \frac{b}{h_1} \right).$$

Напруга виникнення часткових розрядів монотонно зростає зі збільшенням товщини діелектричного шару h_2 , розташованого послідовно із порожниною, в першому випадку і загальної товщини ізоляції – в другому, і проходить через мінімум при критичній товщині порожнини (рис. 7.4.).

$$h_{1\text{кр}} = \left(\frac{bA}{aB} \right)^{0.5},$$

причому

$$U_{\text{мін}} = \left(\sqrt{aA} + \sqrt{bB} \right)^2.$$

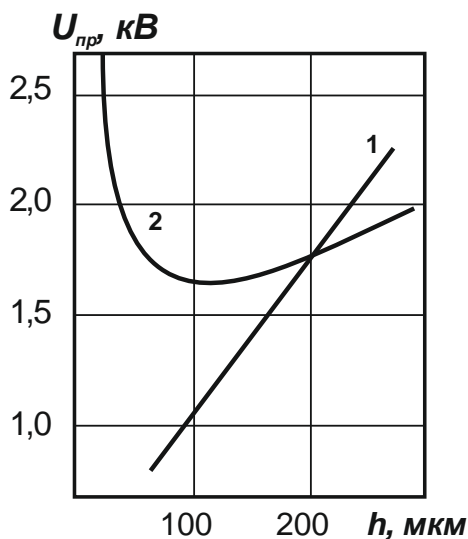


Рис. 7.4. Залежність напруги виникнення часткових розрядів: 1 – від товщини діелектрика при сталій товщині порожнини; 2 – від товщини порожнини при постійній товщині діелектрика

Для виведення формули для частоти повторення часткових розрядів врахуємо, що напруга на порожнині в процесі часткових розрядів при змінній напрузі має такий вигляд (рис. 7.5).

Спочатку напруга на порожнині змінюється, як і прикладена за синусоїдальним законом, доки U не стане рівним $U_{\text{пр}}$. При $U = U_{\text{пр}}$ відбудеться пробій порожнини. Наскрізна провідність діелектрика дуже мала в порівнянні із провідністю плазми розряду, тому в процесі розряду заряди осядуть на стінках порожнини. У результаті поле в розрядному каналі, що дорівнює сумі полів джерела й поверхневих зарядів стане близьким до нуля. Розряд згасне.

Після затухання часткового розряду поле у порожнині визначається полем джерела й полем адсорбованих зарядів, яке можна вважати постійним через значну величину часу їх релаксації (1 – 100 с). Тому при подальшому підвищенні прикладеної напруги, напруга на

порожнині змінюється еквідистантно тій синусоїді, що мала б місце, якби розряд був відсутній, проходячи нижче її на постійну величину U_{np} . Як тільки напруга U_{1m} стане знову рівною U_{np} , відбудеться новий розряд і все повториться спочатку.

Для числа розрядів за півперіод на підставі рис. 7.5 можна записати вираз

$$n_{\frac{T}{2}} = \frac{2(U_{1m} - U_{np})}{U_{np}} = 2 \left(\frac{U_{1m}}{U_{np}} - 1 \right) = 2 \left(\frac{U}{U_{вчр}} - 1 \right).$$

Тоді для частоти повторення часткових розрядів за секунду маємо

$$n = 4f \left(\frac{U}{U_{вчр}} - 1 \right),$$

а з врахуванням того, що

$$\Delta Q_x = U_{np} C_2 = U_{вчр} \left(\frac{C_2^2}{C_1 + C_2} \right)$$

для середнього струму часткових розрядів можна записати

$$I_x = n \cdot \Delta Q_x = 4f \frac{C_2^2}{C_1 + C_2} (U - U_{вчр}).$$

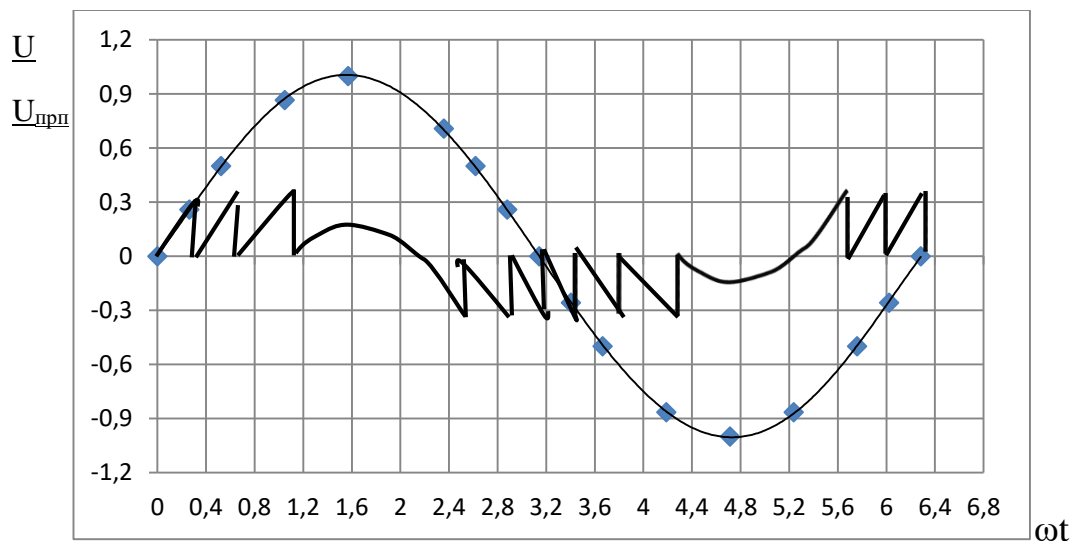


Рис. 7.5. Зміна напруги на порожнині при часткових розрядах при змінній напрузі

При кожному розряді у порожнині виділяється енергія, що дорівнює $\frac{(C_1 + C_2)U_{np}^2}{2}$. Тому виникнення часткових розрядів супроводжується зростанням втрат потужності. Потужність, що втрачається при часткових розрядах дорівнює

$$P_{чр} = n \frac{(C_1 + C_2)U_{np}^2}{2} = 4f \left(\frac{U}{U_{вчр}} - 1 \right) \frac{(C_1 + C_2)}{2} U_{вчр}^2 \frac{C_2^2}{(C_1 + C_2)^2} = 4f \frac{C_2^2}{(C_1 + C_2)} U_{вчр} (U - U_{вчр})$$

Реактивна потужність $\sim U^2$, тому, при часткових розрядах в одній невеликій порожнині, тому залежність $tg \delta$ як відношення активної потужності до реактивної від напруги, яку часто називають кривою іонізації, від прикладеної до ізоляції напруги має такий вигляд

$$tg \delta = const (U - U_{вчр})/U^2,$$

тобто $tg \delta$ має максимум залежно від напруги при $U = 2U_{вчр}$.

Якщо в ізоляції є багато порожнин різних розмірів, то всі характеристики інтенсивності часткових розрядів більш складним чином залежать від напруги. Зокрема ΔQ_x – зростає, а n і I_x стають надлінійними функціями напруги:

$$n \sim (U - U_{вчр})^m, \quad I \sim (U - U_{вчр})^m.$$

Зростаючою функцією напруги стає і $tg \delta \sim (U - U_{вчр})^n$, де $n \approx 3$.

Таким чином, для порожнин великого розміру і для часткових розрядів на краях електродів чи між електродами і діелектриком при нещільному приляганні максимум в залежності $tg \delta(U)$ може бути відсутнім.

До іонізаційного пробою дуже подібний пробій полімерних діелектриків у результаті утворення і проростання заповненого водою розгалуженого каналу (водний тріінг), який спостерігається при експлуатації полімерної ізоляції у вологому середовищі, особливо у морській воді або в розчинах електролітів. В даний час розрізняють два основні види водних тріінгів – типу "бант", що виникають в товщі ізоляції, і типу "віяло" на виступах металевих чи напівпровідникових елементів конструкції.

Зазначимо, що водний тріінг не може бути зведений до електролітичного старіння, бо розвивається і за змінної напруги. Проростання водних тріінгів не супроводжується електричними розрядами, які з'являються тільки тоді, коли водний тріінг переростає в електричний. Механізм розвитку водного тріінгу остаточно не встановлений. Однією з причин проростання водних тріінгів може бути електроосмос.

7.1.4 Теорії руйнування і строк служби полімерних діелектриків при дії часткових розрядів

В процесі вивчення іонізаційного пробою виникло ряд теорій руйнування полімерів частковими розрядами, що ґрунтуються на визнанні основним того чи іншого руйнівального фактора:

1. Руйнівна дія часткових розрядів зумовлено хімічно активними продуктами газового розряду, такими як озон, окисли азоту й т.п. (Гольдман). Цю найдавнішу точку зору можна вважати справедливою для целюлозних матеріалів, але не для синтезованих потім полімерних діелектриків (поліетилен, полістирол, фторопласт і ін.).

2. Руйнування полімерів при впливі часткових розрядів у вигляді ерозії зумовлено випаровуванням діелектрика у місці контакту його поверхні з розрядним каналом (Мейсон). Однак, ерозія не спостерігається при впливі часткових розрядів за відсутності кисню і, крім того, відсутній зв'язок між нагрівостійкістю й

короностійкістю полімерів (час до пробою полістиролу значно вищий, ніж для фторопласта, хоча нагрівостійкість фторопласта значно перевищує нагрівостійкість полістирола).

3. Відповідно до гіпотези Томаса ерозія діелектриків при впливі часткових розрядів обумовлена тим, що електрони, які бомбардують діелектрик, і позитивні іони мають різну глибину проникнення. Однак, відсутність ерозії в інертних газах, зокрема в ретельно очищеному азоті, не може бути пояснена цією теорією.

4. Беручи до уваги той факт, що ерозія діелектрика спостерігається тільки в області безпосереднього впливу розряду в присутності кисню, Хоуген висунув гіпотезу про те, що ерозія є наслідком радикально-ланцюгових реакцій мікрорадикалів, що утворюються в результаті електронно-іонного бомбардування діелектрика, з нестабільними продуктами газового розряду.

Ця гіпотеза була обґрунтована С.М. Койковим. Однак, зводити руйнівну дію розрядів тільки до окисної деструкції й ерозії недоцільно, бо, наприклад, при часткових розрядах в азоті ерозія повністю відсутня.

5. Це ж зауваження можна віднести й до гіпотези Макмагона й Перкінса про електромеханічний характер руйнуючої дії часткових розрядів. Дійсно, у присутності кисню при впливі розрядів на механічно напружений поліетилен на його поверхні утворюються тріщини, але при старінні в інертному газі тріщини не утворюються навіть у сильно напруженому матеріалі.

6. З урахуванням відзначених недоліків існуючих гіпотез співробітниками КПІ Ільченко М.С. і Кириленко В.М. була запропонована гіпотеза про радикально-ланцюговий механізм руйнування діелектриків частковими розрядами, що включає окиснювальну деструкцію, як окремий випадок. Ця гіпотеза ґрунтується на широкій аналогії в наслідках впливу на полімери часткових розрядів і частинок високих енергій і дозволяє пояснити більшість фізико-хімічних процесів, що відбуваються в полімерах при часткових розрядах.

Час до пробою, що є основною характеристикою іонізаційного пробою в загадному випадку можна визначити як:

$$\tau = \frac{BR}{p},$$

де τ – час до відмови діелектрика; R – ресурс, тобто час роботи під напругою; B – коефіцієнт розмірного узгодження; p – характеристика інтенсивності часткових розрядів.

Залежно від того, що обрано за критерій для оцінки руйнівальної дії часткових розрядів: глибина ерозії, втрата ваги, величина газовиділення, час до пробою й т.п., час до пробою діелектрика і його відносна стійкість до часткових розрядів будуть різні, а ресурс стійкості до часткових розрядів буде мати різний фізичний зміст.

Враховуючи емпіричну залежність інтенсивності часткових розрядів, згідно якої вона є степеневою функцією різниці діючої напруги і напруги виникнення часткових розрядів з показником степені більшим одиниці, час до пробою діелектрика згідно з експериментальними даними може бути відображений функцією напруженості поля ("кривою життя"):

$$\tau = B(E - E_{\text{свр}})^{-m},$$

де B – константа для даного типу діелектрика, $m = 4 - 8$ для змінної напруги; $m = 11 - 14$ для постійної напруги.

Приймаючи до уваги, що степінь m змінюється від 4 до 8 при дії часткових розрядів на діелектрик з заданою пористістю при підвищенні $E - E_{\text{свр}}$, Дакін запропонував емпіричну формулу

$$\tau = \frac{A}{(E - E_0)f} \exp\left(-\frac{W - b(E - E_0)}{kT}\right)$$

Формула для часу до пробою у такому вигляді близька до формули, що виведена Ільченко М.С. і Кириленко В.М. на основі аналогії між дією на полімерні діелектрики часткових розрядів і радіоактивного опромінення

$$\tau = \frac{q_e W}{\varepsilon I} D_k = A \exp(-\beta \sqrt{E}),$$

де q_e – заряд електрона; W – маса діелектрика;

$$\varepsilon = 2,5 \cdot 10^{-2} \left[21 + 33 \lg \left(\frac{0,5}{h_2} + 44 \right) \right] - \text{середня енергія електронів, що бомбардують}$$

діелектрик;

$$I = \frac{4f \varepsilon_r S}{11,3} \Delta E_2 - \text{струм частинок, що бомбардують діелектрик;}$$

$$\Delta E_2 = \frac{U - U_{\text{свр}}}{h_2},$$

$$D_k = \frac{5 \cdot 10^{-13} f \Delta E_2 \bar{\varepsilon}}{l} \frac{\varepsilon_2}{\rho(h_2 - h_0)} - \text{критична доза енергії, що передається діелектрику}$$

при його бомбардуванні електронами під час дії часткового розряду.

Згідно з експериментом $D_k = D_{k0} \exp(-\beta \sqrt{E})$. Експериментальні значення параметрів D_{k0} , β наведені в таблиці 7.1. Наведені дані можна використовувати для орієнтовних розрахунків часу до пробою високовольтної полімерної ізоляції.

Таблиця 7.1

Полімер	$\lg D_{k0}, (eB/\varepsilon)$	$\beta \cdot 10^3, (см/В)^{0,5}$	$\lg D_k, (eB/\varepsilon) E=40кВ/мм$
Поліетилен	21,6± 0,6	1.0 ±0.8	21,0
Полістирол	22,3± 0,6	1.8 ±0.6	21.2
Полікарбонат	22,2±0,9	1.2 ±0.8	21,4
Поліетилентерефталат	22,5±1.0	1,6 ±0.9	21,5
Фторопласт-4	22,9±1.4	2.3 ±1,5	20,6
Поліпропілен	23,7	4.7	21
Триацетат целюлоза			20,3
Сополімер етилен-пропілен			20.9
Полівінілхлорид (E=23 кВ/мм)			20.4
Фторопласт-3			20,7

Для використання полімерних діелектриків як високовольтної ізоляції велику роль відіграє можливість підвищення часу до її пробою при дії часткових розрядів.

У загальному випадку, з урахуванням закономірностей старіння полімерної ізоляції при дії часткових розрядів, можна визначити наступні способи підвищення часу до її пробою:

1. Зниження робочих напруг до $U < U_{впр}$.
2. Удосконалення конструкції й технології виготовлення з метою уникнути утворення газових порожнин або зменшити їхню кількість, знизивши тим самим інтенсивність часткових розрядів.
3. Розробка більш стійких до розрядів видів полімерних матеріалів, зокрема зшитих полімерів, сополімерів, привитих полімерів тощо.
4. Підвищення стійкості до дії часткових розрядів полімерних діелектриків шляхом введення спеціальних домішок.
5. Використання неорганічних діелектриків як бар'єрів на шляху проростаючих каналів.

Перший спосіб хоча й знаходить широке застосування, втрачає свою економічну привабливість, тому що його використання пов'язане з підвищеною витратою ізоляційного матеріалу, збільшенням ваги, габаритів, а інколи і витрат на експлуатацію.

Другий спосіб пов'язаний з особливостями технологічного характеру виробництва електротехнічних матеріалів і розглядатись не буде.

Третій спосіб реалізується хіміками-органіками і поки що не реалізований в промисловому масштабі. Але слід відзначити, що шляхом “зшивання” поліетилену γ – випромінюванням на повітрі, вдалося підвищити термін служби його приблизно в 3 рази. З ростом дози опромінення термін служби росте, однак при дозах понад 0,2 МДж/кг починається деяке зниження механічних характеристик поліетилену.

Четвертий спосіб оснований на тім, що стійкість до часткових розрядів є специфічною властивістю полімеру, аналогічною стійкості до дії радіації. Як домішки можна брати ті речовини, що вже зарекомендували себе як *антиради* у радіаційній хімії: *N*-циклогексил – *N'*-феніл – *n*-фенілендіамін, *N*-дифеніл – *n*-фенілендіамін, феніл – α -нафтиламін, феніл – β -нафтиламін, іонол, тимол, 1,4-нафтохінон, α -нафтиламін, бензойна кислота, α -нафтол, дифенілтіосечовина, 8-оксихінолін, дифеніл і інші феніли й аміни.

Досліди, проведені в КПІ, із введення α -нафтиламіну, феніл – β -нафтиламіну й бензойної кислоти в поліетилен показали, що при цьому вдається підвищити термін служби в 1,7– 3,1; 2,2 – 3,4 і 4,4 – 5,6 рази, відповідно, при концентрації добавки до 1%. Враховуючи, що старіння пов'язане з витратою добавок, то з підвищенням їх концентрації ефект зростає, але при цьому можуть погіршуватися властивості полімера.

Спільний вплив домішок і опромінення не дає додаткового ефекту, тому що домішки захищаючи поліетилен від “зшивання” при опроміненні витрачаються. При цьому захист виявляється менш ефективним, ніж при роздільному застосуванні домішок і опромінення.

П'ятий спосіб відпрацьовувався в 70–80 роках минулого століття, а зараз його дослідження практично припинено.

Використання бар'єрів ускладнює технологію виготовлення високовольтних кабелів з полімерною ізоляцією, але знаходить широке використання у високовольтній ізоляції електричних машин, де як бар'єр використовується слюда.

Слід відзначити, що подальші дослідження необхідно вести в напрямках уточнення ресурсів стійкості до часткових розрядів для різних полімерних діелектриків в умовах, що відповідають сучасним методам використання полімерної ізоляції, пошуку нових більш ефективних домішок, що могли б захищати полімер від дії часткових розрядів та розробки мікроскопічної теорії руйнування й захисту полімерних діелектриків частковими розрядами.

7.1.5 Реєстрація часткових розрядів

Враховуючи різноманітність явищ, що супроводжують часткові розряди, для їх реєстрації реалізовано цілий ряд методів. Найширше використовують електричний метод, що ґрунтується на імпульсному характері часткових розрядів, з використанням давачів, що мають електричний контакт з об'єктом вимірювання, або антени.

Давач у вигляді резистора використовують, якщо необхідно спостерігати імпульс часткового розряду максимально близьким до його дійсного вигляду, для чого потрібен дуже широкополосний реєструючий пристрій (\sim до 10^8 МГц). Використання паралельного з'єднання резистора і конденсатора обмежує зверху полосу пропускання реєстратора на рівні $\Delta f \sim 1/(RC)$, що зменшує вимоги до реєструючого пристрою. Можна також застосовувати як давач резонансний контур, що обмежує і знизу і зверху полосу пропускання на рівні $0,707 U_{рез}$ в околі $f = f_{рез}$. Давач вмикається безпосередньо в заземлення об'єкта, або ж в заземлення конденсатора зв'язку (рис. 7.12.). Як правило, таким чином отримують інформацію про імпульс струму, що протікає у зовнішньому колі при частковому розряді в порожнині діелектрика.

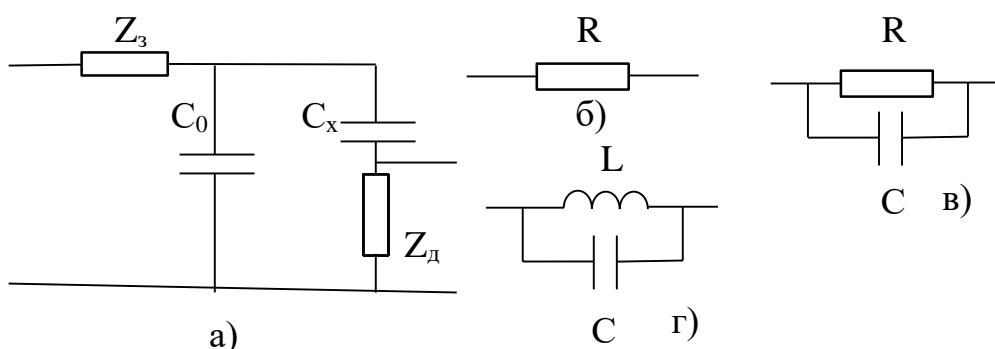


Рис. 7.6. Спрощена схема реєстрації часткових розрядів з додатковим конденсатором зв'язку для створення шляху для протікання струму часткових розрядів: а – загальна схема (Z_3 – захисний опір, C_0 – додатковий конденсатор, C_x – об'єкт вимірювання часткових розрядів, Z_d – давач сигналу); б, в, г – можливі варіанти Z_d .

При відповідному градуванні схеми вимірювання на основі результатів його вимірювання можна отримати дані про значення уявного заряду ΔQ_x часткового розряду, що вимірюється найчастіше, оскільки воно дає уявлення про розміри порожнин і їх поведінку в процесі експлуатації. Паралельно можна визначати також частоту повторення часткових розрядів n , що дає можливість при одночасній фіксації ΔQ_x розраховувати середній струм I_x .

Реалізація на практиці електричних методів реєстрації часткових розрядів вимагає застосування різних методів зменшення впливу перешкод від корони і сторонніх розрядів: виконання некоронуючої ошиновки, вимірювання в певні інтервали періоду напруги, використання мостових схем, екранування приміщень і т.п.

В процесі технічного діагностування електричної ізоляції часто експериментальним шляхом контролюють допустимі значення ΔQ_x , які не повинні перевищуватися для надійної роботи ізоляції в процесі експлуатації.

7.2 ІНШІ ВИДИ ПРОБЮЮ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Електрохімічний пробій – це пробій, зумовлений хімічними процесами, що приводять до поступового погіршення діелектричних властивостей і зниження пробивної напруги до прикладеної. Він пов'язаний з електролізом і спостерігається при постійній нарузі в іонних діелектриках і в просоченій паперовій ізоляції при наявності в ній компонентів, що можуть розкладатися на іони.

Причиною електрохімічного пробую в твердих діелектриках є зростання дефектності та іонної провідності діелектрика, що супроводжується електролізом. Іонна провідність приводить до зростання концентрації іонів у міжвузлях біля електрода, знак напруги на якому протилежний знаку заряду іонів, що зумовлюють електропровідність. Біля протилежного електрода нагромаджуються вакансії при електропровідності, що зумовлена одним типом іонів, або іони протилежного знаку. В лужних іонних кристалічних діелектриках при тривалій електропровідності можуть утворюватися металеві дендрити, які закорочують електроди.

У просоченій паперовій ізоляції електрохімічне старіння спостерігається за підвищених температур (вище $50\text{ }^{\circ}\text{C}$), прискорюючись з ростом напруги. Вважається, що основну роль у цьому процесі відіграють іони водню, які виділяються під час гідролізу целюлози та скупчуються біля катода. Особливо небезпечні вони у випадку хлорованого просочення – утворюється соляна кислота і відбувається корозія електродів, що супроводжується зростанням у зоні просочення концентрації іонів металу, які каталітично сприяють розкладанню ізоляції.

Зазначимо, що для електрохімічного, як і для іонізаційного пробую, час формування може сягати кількох років, а тому, як вже відзначалося, часто говорять про іонізаційний та електрохімічний механізми старіння, а не про іонізаційний та електрохімічний пробій діелектриків.

Електромеханічний пробій. Як було встановлено В.Д. Кучіним, при дуже коротких імпульсах, $U_{пр}$ для лужно-галоїдних кристалів перестає залежати від температури, що суперечить теоріям і електричного, і теплового пробую. Крім того,

Старком і Гертоном була встановлена аналогія в зміні модуля Юнга й U_{np} опроміненого поліетилену при підвищенні температури.

Це дозволило їм сформулювати гіпотезу про електромеханічний пробій, згідно якій при дуже коротких імпульсах напруги на діелектрик діє ударне навантаження, що може перевищити його механічну міцність. Для полімерів, що мають порівняно малий модуль Юнга, при стискуванні електростатичними силами деформація може досягти такої величини, що зразок стане механічно нестійким. В області високих температур при зазначених припущеннях можна дістати кількісне узгодження з експериментом.

Таким чином, вважається, що при дуже короткому часі дії імпульсної напруги, коли пробивна напруга помітно зростає, може спостерігатися електромеханічний пробій, пов'язаний з пошкодженням діелектрика механічними зусиллями, що виникають під впливом електричного поля. У цьому випадку канал пробою також утворюється, але вже після руйнування діелектрика, що тільки частково відповідає визначенню пробою.

На думку авторів посібника, електромеханічний пробій малоімовірний, за винятком випадків, коли ми маємо справу з поверхневим пробоєм, канал якого при малій тривалості імпульсної напруги занурюється в твердий діелектрик. Внаслідок швидкого розширення розрядний канал діє на діелектрик як ударне навантаження і руйнує його механічно, як відзначалося вище при розгляді поверхневого пробою.

ЛЕКЦІЯ 8

8.1 ТЕПЛОФІЗИЧНІ, МЕХАНІЧНІ І ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ

При вивченні зазначених питань слід виходити з системного підходу та розглядати теплофізичні, фізико-механічні й хімічні властивості діелектриків, враховуючи їхній взаємний вплив і вплив на електрофізичні властивості. Особливу увагу слід звернути на параметри матеріалів, що характеризують їхню стійкість до дії високих і низьких температур, механічних навантажень, радіації, хімічних речовин і біологічних факторів, вологи, тому що саме вони визначають можливість використання діелектрика у виробах для різних кліматичних зон.

8.1.1 Теплофізичні характеристики діелектриків

Теплопровідність.

Однією з основних задач діелектриків, крім забезпечення електричної ізоляції, ємності конденсаторів і функціональних перетворень, є відведення теплоти, що виділяється внаслідок діелектричних втрат в ізоляції, джоулевих втрат в електропровідних елементах електрообладнання та магнітних втрат в магнітопроводах електричних машин, трансформаторів й інших апаратів в навколишнє середовище через шар діелектрика. Чим меншим буде перепад температури в діелектрику, чим інтенсивнішим буде відведення теплоти з ізоляції в навколишній простір, тим меншою буде її температура, а значить меншими значення γ і $\text{tg } \delta$ більшою електрична міцність E_{np} діелектрика, внаслідок чого ізоляція зможе працювати при більшій питомій потужності.

Перепад температур в ізоляції визначається її теплопровідністю. Теплопровідність матеріалів кількісно характеризують **питомою теплопровідністю λ , Вт/(м·К)**, що вказує, яке кількість тепла пройшла через одиницю площі за одиницю часу при градієнті температури в 1 К/м:

$$\lambda = \frac{\Delta P_t}{\frac{dT}{dl} \Delta S},$$

де ΔP_t – потужність теплового потоку через площину ΔS , нормальну до потоку теплоти, dT/dl – градієнт температури.

Теплопровідність – аналог електропровідності, через неї виражається тепловий опір об'єкта R_t (К/Вт), наприклад діелектричної стінки площею S і товщиною h

$$R_t = \frac{1}{\lambda} \frac{h}{S},$$

який дозволяє записати тепловий аналог закону Ома

$$\Delta T = R_t P_t,$$

де ΔT – різниця температур на поверхнях стінки (аналог напруги), P_t – теплова потужність (аналог струму).

Відносно теплопровідності газів потрібно зробити зауваження, що вони мають надзвичайно малу молекулярну теплопровідність, порядку 0,05 – 0,5 Вт/(м·К), яка проявляється в умовах, коли молекули газу не можуть приймати участь в упорядкованих макроскопічних рухах, наприклад в об'ємах менше 1 мм³.

Теплопровідність рідких діелектриків знаходиться в межах 0,08 – 0,7 Вт/(м·К), води від 0,56 Вт/(м·К) при 0° до 0,68 Вт/(м·К) при 100°.

Значення λ для більшості твердих електроізоляційних матеріалів визначається *фононною* теплопровідністю (табл. 8.1.). При зіткненні іонів, атомів чи молекул змінюється характер їхнього руху, а значить і спектр коливань, тобто набір фононів, що описують рух. Таким чином, можна говорити про зникнення (зменшення інтенсивності руху частинок речовини) і породження (збільшення інтенсивності руху частинок речовини) фононів без посилення на характеристики реального руху, і розглядати процес поширення теплоти, що супроводжується зростанням інтенсивності коливань частинок речовини в області, куди поширюється теплота, як процес теплової дифузії фононів.

Теплопровідність твердих діелектриків залежить від їх структури, складу і будови. Полімерні діелектрики мають теплопровідність на рівні десятих часток Вт/(м·К), пластмаси – на рівні десятих часток – одиниць Вт/(м·К), неорганічні діелектрики – від одиниць до десятків і дуже рідко від десятків до сотень Вт/(м·К), як, наприклад, для керамічних оксидів металів (Al₂O₃, MgO, BeO). Перехід від аморфних до кристалічних речовин приводить до зростання теплопровідності.

Таблиця 8.1. Питома теплопровідність λ деяких матеріалів, Вт/(м·К)

Повітря (молекулярна)	0,05	Плавлений кварц, SiO ₂	1,25
Бітум	0,07	Стеатит	2,2
Папір	0,10	Кристалічний кварц, SiO ₂	12,5
Лакотканина	0,13	оксид алюмінію, Al ₂ O ₃	25 – 30
Гетинакс	0,35	оксид магнію, MgO	36
Фарфор	1,6	оксид берилію, BeO	218

Тверді пористі діелектрики через низьку молекулярну теплопровідність газів в їх порожнинах мають також низьку теплопровідність, на рівні сотих – десятих часток Вт/(м·К). При просоченні пористих матеріалів, наприклад в конденсаторах, їх теплопровідність зростає.

Для практичного визначення теплопровідності використовують стаціонарні і нестаціонарні методи, що в свою чергу можуть бути абсолютними та відносними. Стаціонарні методи характеризуються стабільністю розподілу теплового поля, що використовують для розрахунку λ , в діелектрику. Наприклад, для плоского зразка діелектрика у вигляді круга чи прямокутника з товщиною h меншою 0,1 найбільшого

іншого лінійного розміру, наприклад діаметра, при температурах стінок T_1 і T_2 згідно з приведеною вище формулою маємо

$$\lambda = \frac{P_t h}{(T_1 - T_2) S}$$

Для підвищення точності використовують абсолютний метод двох зразків, в якому нагрівач розташований між двома, однаковими за властивостями та розмірами, зразками діелектрика. У цьому випадку

$$\lambda = \frac{P_t - P_{nc}}{(\Delta T_1/h_1 + \Delta T_2/h_2) S},$$

де P_{nc} – втрати теплоти в навколишнє середовище, що визначаються за температурою поверхні діелектрика і коефіцієнтом теплопередачі.

У відносному стаціонарному методі λ вимірюють для зразка, що розташований між двома еталонними зразками, наприклад з поліметилакрилату ($\lambda = 0,198$ Вт/(м·К)), вимірюють падіння температур на робочому ΔT_x і еталонних ΔT_{em} зразках матеріалів і розраховують λ за формулою

$$\lambda_x = \lambda_{em} \Delta T_{em} / \Delta T_x.$$

Основними недоліками стаціонарних методів визначення λ , крім складності створення однорідного теплового поля, компенсації втрат теплоти в неробочих напрямках, що є притаманним для всіх методів, є значні витрати часу на вимірювання та велика кількість термопар для вимірювання температури поверхонь.

Нестаціонарні методи дають можливість отримати інформацію не тільки про λ , а й про теплоємність, густину і температуропровідність, але вони складніші в реалізації і тому розглядатися не будуть.

Відведення теплоти від поверхні діелектрика характеризується **коефіцієнтом тепловіддачі**:

$$\alpha = \lambda / \delta,$$

де δ – товщина пограничного шару, порядок розрахунку якого приводиться в підручниках з теплопередачі.

Теплопередача може здійснюватися в трьох варіантах: молекулярна, конвективна і теплопередача випромінюванням.

Молекулярна тепловіддача можлива в умовах, коли в навколишньому середовищі не можуть утворюватися конвективні потоки, наприклад у вузьких прошарках газу, а температура поверхні діелектрика недостатня для виникнення інтенсивної теплопередачі випромінюванням.

При умові, що в навколишньому середовищі вільно утворюються конвективні потоки в результаті його нагрівання поверхнею діелектрика, значення коефіцієнта теплопередачі у повітрі знаходиться в межах 8–30 Вт/(м²·К). При вимушеній конвекції, тобто при продуванні повітря вентилятором чи компресором вздовж поверхні діелектрика, коефіцієнт теплопередачі може досягати 10 – 500 Вт/(м²·К).

Конвективний коефіцієнт теплопередачі від діелектрика в рідину, наприклад воду, з поверхні діелектриків при вільній конвекції може становити 100 – 1000 Вт/(м²·К), а при вимушеній – від 500 до 20000 Вт/(м²·К). Найінтенсивніше відведення теплоти має місце при плівковій конденсації водяної пари, коли коефіцієнт теплопередачі складає 4·10³ – 10⁴ Вт/(м²·К), а при капельній навіть 4·10⁴ – 10⁵ Вт/(м²·К). Внаслідок збільшеного коефіцієнта теплопередачі рідкі діелектрики широко використовуються як основна ізоляція в трансформаторах і деяких апаратах.

Теплоємність.

Теплоємність діелектриків може бути молярною при сталому тиску C_p , Дж/(моль·К), молярною при сталому об'ємі C_v , Дж/(моль·К), або просто питомою масовою чи об'ємною теплоємністю c . Зауважимо, що різниця між C_p і C_v є тільки для газоподібних діелектриків, для рідких і твердих діелектриків вона не суттєва.

Питома масова і питома об'ємна теплоємності визначаються при відповідних умовах

$$c = P_t / (\Delta T \cdot m) \quad \text{або} \quad c = P_t / (\Delta T \cdot V)$$

і виражається в Дж/(кг·К) або Дж/(м³·К).

Орієнтовні значення масової питомої теплоємності:

- кераміка, стекла – 700 – 1200;
- органічні полімери – 1200 – 2200;
- нафтові електроізоляційні масла – 1800 – 2500;
- вода – 4200 Дж/(кг·К).

Температуропровідність

Величиною, яка тісно пов'язана з теплопровідністю і теплоємністю є температуропровідність:

$$a = \lambda / (c \cdot \rho), \text{ м}^2/\text{с},$$

де ρ – густина діелектрика. Температуропровідність характеризує співвідношення між здатностями діелектрика проводити теплоту та акумулювати її, визначає швидкість прогрівання чи охолодження діелектрика і розподіл температури в ньому.

В електрообладнанні різні діелектрики часто використовують разом, наприклад поліетилен, як ізоляцію, і полівінілхлорид, як захисну оболонку кабелю, або в комбінації з провідниковими матеріалами – мідна або алюмінієва жила і поліетиленова ізоляція кабелю, фарфорове чи скляне ізоляційне тіло і чавунна арматура в ізоляторах тощо. В таких випадках для надійної роботи обладнання суттєве значення має *виникнення термомеханічних напружень* внаслідок різного теплового розширення матеріалів, що може привести до їх деформації чи навіть розтріскування у випадку неорганічних діелектриків.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення.

Теплове розширення діелектричних матеріалів визначає теплостійкість діелектриків і їх стійкість до термоударів і оцінюється *температурним*

коефіцієнтом лінійного розширення ТКЛР, K^{-1} , який характеризує відносне подовження зразка при нагріванні на 1 К

$$TKLP = \alpha = (1/l) \cdot (dl/dT),$$

де l – довжина випробувального бруска, м.

Значення ТК лінійного розширення необхідно знати при конструюванні електроустаткування, що працює в широкому діапазоні температур. У цьому випадку добирають матеріали з приблизно однаковими ТК лінійного розширення, щоб запобігти термомеханічним напруженням, або передбачають спеціальні конструктивні заходи для їх зменшення.

Для неорганічних діелектриків інколи доводиться конструктивно забезпечувати можливість вільного руху контактних деталей, як, наприклад, в підвісних лінійних ізоляторах, де обернене конічне з'єднання забезпечує перетворення розтягуючих зусиль, що виникають у стрижні при підвішуванні проводу, в стискаючі і вільний ковзний рух верхньої конічної частини стрижня в головці ізолятора при зміні температури ізолятора.

Матеріали з малим значенням ТКЛР мають більш високу **стійкість до термоудару** (табл. 8.2), яку можна охарактеризувати перепадом температур, що може витримати діелектрик без руйнування:

$$\Delta T = k \frac{\sigma_p}{\alpha E} \sqrt{\frac{\lambda}{c\rho}},$$

де k – константа; σ_p – розривна напруга при розтягуванні, МПа; α – ТКЛР, K^{-1} ; E – модуль пружності, МПа; λ – теплопровідність, Вт/(м·К); c – теплоємність, кДж/(кг·К); ρ – густина kg/m^3 .

Стойкість до термоудару тим вища, чим більша механічна міцність матеріалу і його температуропровідність та чим нижчі модуль Юнга і ТКЛР. Тому високу стійкість до термоудару мають органічні термопластичні матеріали. З неорганічних діелектриків можна назвати кварц, нітрид кремнію, оксид берилію та ін.

На практиці стійкість до термоударів визначається для крихких матеріалів шляхом їх різкого нагрівання або охолодження. Наприклад, лінійні ізолятори повинні витримати трьохкратне нагрівання і охолодження шляхом занурення в крижану воду без погіршення своїх властивостей, про що повинні свідчити результати наступних оглядів і випробувань високою напругою. Температура і час нагрівання залежать від маси виробів.

Таблиця 8.2. ТКЛР деяких матеріалів $\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$

Неорганічні		Органічні	
Кварцове скло	0,55	Епоксидні смоли	55
Фарфор	3,5	Пластмаси	55 – 70
Стеатит	7	Політетрафторетилен	100
Силікатні стекла	9,2	Поліетилен	100– 145

В процесі роботи діелектрики можуть нагріватися по різному: швидко нагрівання до високих температур, досить тривала робота при підвищених температурах, різке охолодження тощо. Тому для них в залежності від характеру нагрівання потрібно враховувати такі теплофізичні характеристики, як *температура розм'якшення, температура каплепадіння, температура плавлення, температура крихкості, температура склування, температура спалаху пару, температура займання, теплостійкість, термостійкість, холодостійкість та нагрівостійкість.*

Температура розм'якшення бітумів, воску та деяких видів термопластичних компаундів визначається методом «кільця і кулі» за температурою, при якій сталена кулька діаметром 9,5 мм проходить через кільце, заповнене випробувальним матеріалом при нагріванні в середовищі термостатувальної рідини (вода, гліцерин тощо) від 5 °С зі швидкістю $5 \pm 0,5$ °С/хв. Варіантом цього метода є метод ртутного шару, коли ртуть наливається поверх діелектрика і при нагріванні його при температурі, яка приймається за температуру розм'якшення, продавлює діелектрик і переходить на дно посудини.

Для пластмас температура розм'якшення визначається за методом Віка при підвищенні температури зі швидкістю 5 °С/хв, як температура, при якій індентор (тіло, що вдавлюється в дану речовину) у вигляді циліндра діаметром 1,13 мм і довжиною 3 мм під дією навантаження 10 або 50 Н проникає в матеріал на глибину 1 мм.

Інший метод визначення температури розм'якшення пластмас зводиться до фіксації при нагріванні зі швидкістю 2 К/хв температури деформації розміщеного на двох опорах діелектрика довжиною 110 мм, висотою 10 мм і шириною 4 мм вертикальним стрижнем з циліндричним закругленням 3 мм під дією одного з напружень згинання 0,45; 1,8; 4,9 або 7,4 Па на величину 0,33 мм. Температуру розм'якшення пластмас можна визначати також методом Мартенса.

Для церезину, парафіну, озокериту тощо температура розм'якшення визначається методом каплепадіння Уббелодє, як **температура каплепадіння**, тобто як температура падіння першої каплі речовини з латунної чашки з діркою у дні діаметром 3 мм при її нагріванні в термостатувальній рідині зі швидкістю 1 °С/хв.

Температури плинності, плавлення, склування і крихкості. (Визначаються для полімерних діелектриків).

При температурі плинності $T_{пн}$ полімер повністю втрачає пружну деформацію, залишається тільки пластична. В цьому стані він переробляється: ллється, пресується, формується, екструдуюється тощо. Температура плавлення $T_{пв}$ кристалічних утворень (кристаліти, сфероліти) в полімерних діелектриках може бути нижчою або вищою температури плинності. Наприклад, фторопласт-4 плавиться при температурі 327 °С і сублимується (переходить з твердого до газоподібного стану) тільки при 415 °С, але при цьому зовсім не переходить у в'язкоплинний стан.

При зниженні температури нижче температури склування T_c кристалічний полімер переходить у твердий і крихкий стан, втрачаючи пластичну деформацію,

але може експлуатуватися і при нижчих температурах аж до температури крихкості $T_{крх}$, коли його механічна міцність стає незадовільною.

Різниця $T_c - T_{крх}$ визначає температурний інтервал *примусової еластичності*. Чим вона більша, тим ширше температурний інтервал експлуатації полімеру і тим більш цінним є полімер. Цей температурний інтервал зростає зі збільшенням величини сегмента молекулярного ланцюга. Якщо від T_c залежить верхня межа робочого температурного інтервалу полімера, що експлуатується в скловидному стані, то $T_{крх}$ у багатьох випадках визначає його нижню межу (табл. 6.2).

Таблиця 6.2. Значення температури склування T_c , крихкості $T_{крх}$ і температурного інтервалу примусової еластичності $T_c - T_{крх}$ деяких полімерів

Полімер	$T_c, ^\circ\text{C}$	$T_{крх}, ^\circ\text{C}$	$T_c - T_{крх}, ^\circ\text{C}$
Полістирол	80 – 90	–40	120
Поліметилметакрилат	100	10	90
Полівінілхлорид	81	–90	170
Гума ненаповнена на основі:			
– натурального каучуку НК	–62	–80	18
– бутадієнового каучуку СКС	–39	–112	73
– бутадієн–стирольного каучуку СКС – 30	–49	–135	86

Температура плавлення діелектриків, тісно пов'язана з енергією міжмолекулярних зв'язків. Найнижчі температури плавлення у лінійних полімерів, що обмежує їхню термостійкість. Просторові полімери неплавкі й можуть експлуатуватися за вищих температур. Неорганічні матеріали, особливо з ковалентним зв'язком, в цьому плані переважають органічні.

Температури спалаху і займання.

Для рідинних горючих речовин дуже важливими експлуатаційними характеристиками є *температура спалаху $T_{сп}$ і температура займання $T_{зм}$* . Для визначення температури спалаху рідину нагрівають у відкритому тиглі зі швидкістю $10\text{ }^\circ\text{C/хв}$ до температури $(T_{сп} - 40)\text{ }^\circ\text{C}$, де $T_{сп}$ – очікуване значення температури спалаху, потім знижують швидкість нагрівання до $4\text{ }^\circ\text{C/хв}$, при температурі $(T_{сп} - 10)\text{ }^\circ\text{C}$ на відстані 10 – 14 см від поверхні рідини проводять полум'ям запалювального пристрою від однієї сторони тигля до іншої за 2–3 с, повторюючи цю операцію через кожні $2\text{ }^\circ\text{C}$. За температуру спалаху приймають температуру, при якій над поверхнею рідини перший раз з'явиться голубе полум'я.

Для визначення температури займання продовжують нагрівати рідину і підносити полум'я через кожні $2\text{ }^\circ\text{C}$. Температуру, при якій загориться сама рідина і буде продовжувати горіти не менше 5 с, вважають температурою займання.

Слід розуміти, що підвищення температур спалаху і займання приводять до зменшення небезпеки пожежі, але не зменшують пожежної небезпеки трансформаторного масла, що горить.

Холодостійкість.

У багатьох випадках для ізоляції, наприклад, ліній електропередачі і зв'язку, відкритих підстанцій, літакового електро- і радіоустаткування і в інших випадках важлива холодостійкість, тобто здатність електричної ізоляції не знижувати експлуатаційної надійності при низьких температурах, наприклад – (60 – 70) °С і більш низьких (криогенних) температурах. При низьких температурах, як правило, електричні властивості ізоляційних матеріалів поліпшуються; однак багато матеріалів, гнучкі й еластичні в нормальних умовах, при низьких температурах стають крихкими і твердими, що створює відповідні ускладнення. Наприклад, поліетилен при температурі рідкого азоту стає настільки крихкий, що поліетиленова плівка розтріскується під дією навіть малопотужних часткових розрядів.

При випробуваннях на холодостійкість визначають значення однієї з механічних характеристик, наприклад, деформацію при даному навантаженні при нормальній температурі l_n і при пониженій температурі l_p , а потім коефіцієнт холодостійкості розраховують як відношення $k_x = l_n / l_p$. Для полімерних діелектриків холодостійкість можна оцінювати по температурі крижкості.

Перевірку електроізоляційних матеріалів і виробів з них на холодостійкість нерідко здійснюють при одночасному впливі вібрацій, оскільки саме динамічна дія механічних факторів є визначальною у цих обставинах.

Нагрівостійкість діелектриків буде розглянута в розділі Старіння діелектриків.

8.1.2 Механічні властивості діелектриків

Механічні властивості діелектриків забезпечують здатність матеріалу витримувати дію зовнішніх механічних навантажень без неприйнятних змін початкових розмірів і форми, тобто виступати у ролі конструкційних матеріалів.

Як зазначалося раніше, газоподібні діелектрики, як правило, не використовуються як конструкційні матеріали.

В'язкість.

Важливою механічною характеристикою *рідких діелектриків* (електроізоляційних масел, лаків, заливальних і просочувальних компаундів і т.п.) є *в'язкість*. Під в'язкістю розуміють внутрішнє тертя, що проявляється при відносному русі сусідніх шарів рідини одного відносно іншого, яке залежить від молекулярних сил зчеплення. Вона визначає, наприклад, здатність лаків проникати в обмотку при її просочуванні та конвекцію масла при експлуатації трансформаторів. Розрізняють в'язкості динамічну, кінематичну й умовну.

Динамічна в'язкість η є коефіцієнтом внутрішнього тертя рідини. В одиницях СІ динамічна в'язкість (м²/с) вимірюється ротаційними віскозіметрами між двома коаксіальними циліндрами, зовнішній з яких нерухомий, а внутрішній обертається під дією двигуна чи тягаря. Динамічна в'язкість рідини значно залежить від температури та з її збільшенням знижується експоненціально

$$\eta = A \exp(-W/kT),$$

де A – стала для даного віскозиметра і даної рідини величина, W – енергія активації, що дорівнює роботі переходу молекули рідини з одного стійкого рівноважного положення в інше. Нагадуємо, що енергія активації в'язкості приблизно дорівнює енергії активації електропровідності і тому для рідких діелектриків в певному інтервалі температур має місце правило Писаржевського – Вальдена $\eta\rho = const$.

Кінематична в'язкість ν (Па·с) дорівнює відношенню динамічної в'язкості до густини d рідини:

$$\nu = \eta/d$$

і визначається U-подібними скляними капілярними віскозиметрами за градувальними кривими.

Умовну в'язкість вимірюють за допомогою кулькових або універсальних віскозиметрів, лійки НДІЛК, віскозиметра Енглера й ін. Умовна в'язкість в градусах Енглера ($^{\circ}E$) в першому наближенні пропорційна кінематичній в'язкості ν .

У твердому тілі при статичному випробуванні на розтягування під дією зовнішнього навантаження виникають напруження й деформація.

Межа пружності та межа плинності

Напруження σ – це навантаження (сила) P , віднесена до початкової площі поперечного перерізу F_0 зразка:

$$\sigma = P/F_0.$$

У системі одиниць СІ силу P вимірюють у Н, площу F_0 у м², міцність матеріалу при розтягуванні σ у Па.

Деформація – це зміна форми й розмірів твердого тіла під дією зовнішніх сил або в результаті фізичних процесів, що виникають у тілі при механічних навантаженнях, фазових перетвореннях, усадці й т.п. Деформація при статичних випробуваннях на механічну міцність може бути *пружною* – вона зникає після зняття навантаження, і *пластична* – вона зберігається після зняття навантаження.

Для характеристики деформації вводять такі характеристики як **межа пружності** – напруження, при якому залишкова деформація складає 0,05% початкової довжини робочої частини зразка матеріалу, та **межа плинності** – напруження, при якому залишкова деформація сягає 0,2% при незмінному навантаженні. При зростаючому навантаженні пружна деформація, як правило, переходить у пластичну, і далі зразок руйнується.

Найбільш повну характеристику процесу руйнування дає діаграма деформації, тобто графік залежності деформації зразка від діючого на нього навантаження. Площа під графіком $\Delta l(F)$ визначає роботу, що була витрачена на деформування зразка, якщо потрібно, то аж до руйнування.

Модуль пружності при розтягуванні, стискуванні та згинанні визначається за формулами:

$$E_p = \frac{(F_2 - F_1)l_0}{A_0(\Delta l_2 - \Delta l_1)},$$

$$E_c = \frac{(F_2 - F_1)h_0}{A_0(\Delta h_2 - \Delta h_1)},$$

$$E_3 = \frac{(F_2 - F_1)l^3}{4bh^2(z_2 - z_1)}$$

де F_1 і F_2 – навантаження, Н, що викликають відносно подовження (стискування) чи деформацію зразків на 0,3% і 0,1% відповідно; Δl_2 , Δl_1 , Δh_2 , Δh_1 – подовження (стискування) зразків при відповідних навантаженнях, l_0 , h_0 – початкові розміри зразка, l – відстань між опорами балки, b і h – ширина і висота балки, z_2 і z_1 – прогин зразка, мм, при відносній поперечній деформації зразка на 0,3% і 0,1% відповідно.

В загальному випадку механічні характеристики твердих діелектриків діляться на статичні, коли навантаження зростає плавно з заданою швидкістю, динамічні, при якому навантаження різко змінюються за значенням, і знакозмінні, коли навантаження змінюється за напрямком. До перших відносяться такі характеристики як руйнівне напруження (межа міцності) при розтягуванні, стисненні і згинанні, межа плинності, відносно подовження при розриві і відносна деформація при стисненні, модуль пружності (Юнга) та інші, до других – ударна в'язкість, до третіх – стійкість до вібрацій. При використанні діелектриків необхідно враховувати також такі параметри матеріалу як твердість, гнучкість, еластичність та пластичність.

Міцність – здатність матеріалу, не руйнуючись, чинити опір зовнішнім силам.

Цю властивість матеріалу характеризують значеннями *межі міцності при:*

розтягуванні ($\sigma_p = P_p / F_0$),

стискуванні ($\sigma_c = P_c / F_0$),

згинанні ($\sigma_b = M_3 / W = P_3 l / (4 \cdot W) = 1,5 \cdot P_3 \cdot l / (b \cdot h^2)$),

де P_p , P_c , P_3 – найбільше навантаження, що передують руйнуванню зразка при статичному розтягуванні, стискуванні й згинанні відповідно; F_0 – площа поперечного перерізу зразка до випробування; M_3 – момент згинання, W – момент опору (момент опору для прямокутної балки $W = bh^2/6$, l – довжина зразка між опорами; b – ширина; h – висота зразка). Міцність найчастіше виражають у кгс/см² або в одиницях СІ – Па (1 кгс/см² \approx 0,1 МПа). Часто при випробуваннях на статичну міцність замість міцності використовують *тимчасовий опір* σ_t , який відповідає найбільшому напруженню, що передувало руйнуванню зразка.

Межа міцності при динамічному згинанні визначається на зразку матеріалу перетином 10x15 мм і довжиною 150 мм параметром

$$a_d = G(h_1 - h_2) / S_0,$$

де G – вага сталюого маятника, кг; S_0 – перетин зразка, h_1 , h_2 – висоти, на яку був піднятий маятник перед випробуванням і на яку він злетів після руйнування зразка.

Слід відзначити, що для отримання хорошої відтворюваності і достовірності результатів для механічних випробувань діелектриків використовують зразки певної форми у вигляді «вісімок», стрічок, трубки чи кільця (гума) – при визначенні міцності при розтягуванні, балок чи циліндрів – при випробуваннях на згинання, прямої призми, циліндра, паралелограма чи трубки – при випробуваннях на стискування і балок – при випробуванні на ударну в'язкість. Зразки виготовляють методами пресування, лиття під тиском, екструзії, механічної обробки тощо.

У діелектриків (неорганічні стекла, кераміка, пластмаси й ін.) σ_c , як правило, набагато більше, ніж σ_p й σ_z (наприклад, у кварцового скла $\sigma_c \approx 2 \cdot 10^3$ МПа, а $\sigma_p \approx 50$ МПа), тому їхню механічну міцність (залежно від виду прикладеного навантаження) оцінюють значеннями σ_p , σ_c , σ_z , а в ряді випадків ще *межею міцності при скручуванні* σ_k .

Для матеріалів анізотропної будови (шаруватих, волокнистих і т.п.) значення механічної міцності сильно залежать від напрямку прикладеного навантаження.

Механічна міцність діелектриків залежить від температури й з її ростом зменшується.

При вимірюванні σ_p можна одночасно визначити значення *відносного подовження* $\delta = 100 \cdot \Delta l_p / l_0$, %, і *відносного звуження* $\psi = 100 \cdot \Delta h_p / h_0$, % *перед розривом*, які є важливими технічними характеристиками матеріалу, де Δl_p і Δh_p – подовження і зменшення поперечного розміру зразка при руйнуванні, l_0 і h_0 – його початкові розміри.

В'язкість.

При *динамічних навантаженнях* міцність матеріалів оцінюють *питомою ударною в'язкістю* $\sigma_{y\delta}$, кДж/м². *В'язкість* – здатність матеріалів чинити опір ударним навантаженням. Ця властивість – протилежна *крихкості*.

Вимірюють величину $\sigma_{y\delta}$ на практиці методом маятникового копра Шарпі з бойком у вигляді клина з кутом при вершині 30° і радіусом закруглення $2 \pm 0,5$ мм. На початку випробування зразок у вигляді балки без або з прямокутним ($2/3 h_0$) чи трикутним ($0,8 h_0$) надрізом кладуть на дві опори. Маятник вагою P з заданою йому початковою енергією від 0,5 до 50 Дж падає на зразок з висоти h_2 , руйнує його і по інерції піднімається на певну висоту h_1 . За різницею початкової і кінцевої висот визначається з точністю до 2% енергія, що пішла на руйнування зразка:

$$\sigma_{y\delta} = P(h_2 - h_1)$$

Слід відзначити, що для таких матеріалів, як поліетилен, фторопласт-4 та деякі інші полімери $\sigma_{y\delta}$ перевищує 100 кДж/м² і не може бути визначено існуючими методами.

При *знакозмінних навантаженнях* міцність матеріалів характеризують стійкістю до вібрацій (міцністю до втомленості) – величиною найбільшої напруги, що може витримати матеріал без руйнування при заданому числі змін навантаження (циклів) із заданими амплітудою прискорення, м/с², діапазоном частот, Гц, і іншими характеристиками. Після визначеного в стандарті чи технічних умовах часу

випробувань перевіряють відсутність механічних пошкоджень, порушення герметичності тощо, а також контролюють електричні властивості ізоляції.

Для ряду діелектриків важливими характеристиками є **твердість, пластичність і еластичність**.

Твердість – це здатність матеріалу чинити опір проникненню в нього більш твердого тіла. Залежно від природи діелектрика твердість визначають різними статичними методами (по Брінеллю, Роквеллу, Віккерсу, Польді, Шору і на мікротвердість) за площею або глибиною відбитка індентора, що залишається в матеріалі після випробувань. Якщо використовується індентор у вигляді кульки, то твердість визначається як відношення прикладеної сили F до поверхні сферичного відбитка $H = F/(\pi dh)$, де d – діаметр кульки, h – глибина її вдавлювання. При використанні динамічних методів твердість визначають за висотою відскоку кульки (крихкі матеріали) чи часом затухання маятника (плівки електроізоляційних лаків та емалей).

Ряд діелектриків має **пластичність** – здатність необоротно деформуватися без руйнування під дією зовнішніх сил. З підвищенням температури пластичність зростає, що може стати причиною утворення дефектів. Деякі матеріали (наприклад, ПТФЕ) здатні деформуватися при тривалому впливі невеликого механічного навантаження навіть при температурах, близьких до абсолютного нуля; це явище називають *холодноплинністю*.

Еластичність (пружність) – це властивість, протилежна пластичності. Вона характеризує здатність матеріалу проявляти пружну (зворотну) деформацію без руйнування під впливом невеликих зусиль, а після зняття зовнішніх сил – відновлювати свою колишню форму.

Для матеріалів рухливих контактів важливою характеристикою є **зносостійкість** – опір зношуванню під дією процесів тертя.

8.1.3 Хімічні властивості і зволоження діелектриків

Важливими характеристиками діелектричних матеріалів є їх **хімічна й світлова стійкість**, а для матеріалів, що експлуатуються в умовах підвищеної вологості й температури, ще й стійкість до цвілі – **тропікостійкість**. При роботі твердих діелектриків у контакті з рідинами необхідно знати їхню **взаємну розчинність і здатність розчиняти**.

При експлуатації електроізоляційних матеріалів у місцевості, що загазована хімічно агресивними речовинами, або в хімічно агресивній речовині необхідно, щоб ці матеріали довгостроково й надійно працювали, не руйнуючись, тобто мали достатню **хімічну стійкість**. Важливо також, щоб діелектрики не викликали корозію металів, з якими вони стикаються. Наприклад, нафтове трансформаторне масло з підвищеним кислотним числом¹ може викликати корозію металевих частин трансформатора.

¹ **Кислотне число** вказує концентрацію вільних кислот у маслі; воно визначається кількістю міліграмів їдкого калію КОН, яка необхідна для нейтралізації всіх вільних кислот в одному грамі зразка (мг КОН/1 г).

При роботі у відкритій атмосфері актуальною характеристикою діелектриків є **світлостійкість** – фактично стійкість електроізоляційних матеріалів до дії ультрафіолетових променів. Під дією світлового опромінення деякі матеріали (наприклад, гуми) втрачають еластичність, необхідну механічну міцність, у них з'являються тріщини, лакові покриття відстають від підкладок.

Тропічність характеризує працездатність діелектричних матеріалів у районах із тропічним кліматом ($\psi_6 \approx 100\%$, $T \approx 30-40\text{ }^\circ\text{C}$). При тривалій роботі електроустановок у теплому вологому повітрі ($\psi_6 = 98-100\%$) електричні характеристики багатьох органічних матеріалів істотно погіршуються.

У тропічному кліматі, де на діелектрик одночасно діють волога і підвищена температура, на органічних діелектриках може розвиватися *цвіль*, що у свою чергу приводить до значного зменшення питомого поверхневого опору, росту діелектричних втрат, зниженню електричної міцності, руйнування діелектрика і корозії металевих частин.

Найменш стійкі до утворення цвілі – матеріали на основі целюлози, у тому числі просочені смолами (гетинакс, текстоліт). Найбільш стійкі – неорганічні діелектрики (стекла, кераміка, слюда), кремнійорганічні й деякі органічні матеріали (епоксидні смоли, політетрафторетилен, поліетилен, полістирол).

Діелектрики можуть бути **гігроскопічними** (*всотувати вологу*) та **вологопроникними** (*пропускати через себе вологу*). Про можливість проникнення вологи через дрібні пори можна судити за розміром молекули води, діаметр якої складає $2,5 \cdot 10^{-10}$ м. Основною причиною зволоження є взаємодія матеріалу з вологим повітрям.

При аналізі **зволоження діелектриків** потрібно розрізнити абсолютну і відносну вологість повітря, а також розуміти, що дія вологи на діелектрики визначається в основному відносною вологістю, близькістю її значення до концентрації насиченої пари, при перевищенні якої починається конденсація води у вигляді крапель. Вода у конденсованому стані впливає на електрофізичні характеристики діелектриків значно сильніше, ніж розчинена вода.

Абсолютна вологість повітря – це маса водяної пари в одиниці об'єму повітря, що може коливатися в досить широких межах. Кожному значенню температури відповідає певне значення маси насичення водяною парою повітря, тим

більше, чим більша температура (табл. 8.4). Як правило абсолютна вологість близька до насиченої при дощі. При перевищенні насиченої абсолютної вологості вода починає конденсуватися.

Таблиця 8.4. Абсолютна вологість повітря при насиченні m_n для різних значень температури T при $p=0,1$ МПа

$T, ^\circ\text{C}$	$m_n, \text{г/м}^3$	$T, ^\circ\text{C}$	$m_n, \text{г/м}^3$
-10	2,15	50	89,5
0	4,86	60	131,3
10	9,4	70	200,0
20	17,3	80	295,0
30	28,9	90	425,0
40	50,6	100	600

Якщо при заданій абсолютній вологості знижувати температуру, то при так званій *температурі роси* надлишок вологи випадає росою на навколишні предмети, або формується туман, при якому волога, що перевищує насичену, виділяється у вигляді дрібних завислих крапель води.

На практиці кількість водяної пари у повітрі, тобто вологість повітря, звичайно оцінюють відносною вологістю ψ_v , тому що експериментально визначити її простіше, ніж абсолютну вологість m . Відносну вологість повітря ψ_v вимірюють за допомогою спеціальних приладів: гігрометрів, психрометрів і т.п. Вона дорівнює

$$\Psi_v = \frac{m}{m_{\text{насич}}} \cdot 100\% = \frac{P}{P_{\text{насич}}} \cdot 100\%$$

Абсолютна й відносна вологості повітря залежать від температури і зі збільшенням температури зростають (рис. 8.1). Отже, тому самому значенню відносної вологості повітря ψ_v , виміряному при різній температурі, будуть відповідати різні значення абсолютної вологості m . Знаючи відносну вологість повітря ψ_v , можна за допомогою наведених формул визначити відповідну їй абсолютну вологість m (при тих же значеннях температури й тиску). Наприклад, якщо прийняти, що відносна вологість повітря $\psi_v = 70\%$, то абсолютна вологість при 10°C буде дорівнює $m = (9,4 \cdot 70) / 100 = 6,58 \text{ г/м}^3$, при 20°C – $m = (17,3 \cdot 70) / 100 = 12,11 \text{ г/м}^3$, при 30°C $m = 20,23 \text{ г/м}^3$.

Якщо в повітря з відносною вологістю ψ_v помістити два зразки того самого матеріалу, один із яких сухий, а інший вологий, то перший зразок почне зволожуватися, а другий підсихати. Вологість обох зразків протягом часу τ буде асимптотично наближатися до деякої рівноважної вологості ψ_p , що відповідає даній ψ_v (рис. 8.2). Крім того, зі збільшенням температури ψ_p в діелектрику знижується.

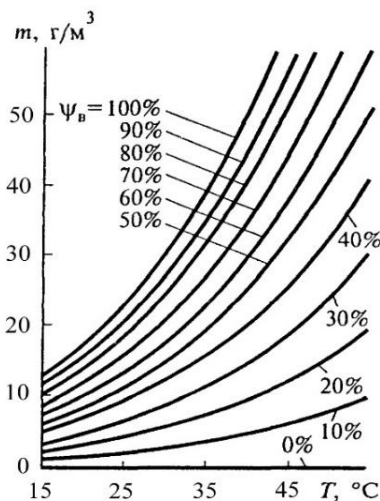


Рис. 8.1. Абсолютна вологість повітря m при нормальному атмосферному тиску й різних значеннях його відносної вологості ψ_v як функції температури T

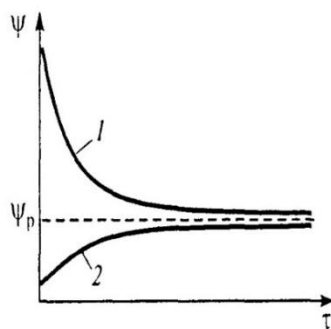


Рис. 8.2. Зміна в часі вологості зразків матеріалу вологого (1) і сухого (2) при незмінних значеннях ψ_v і T навколишнього повітря

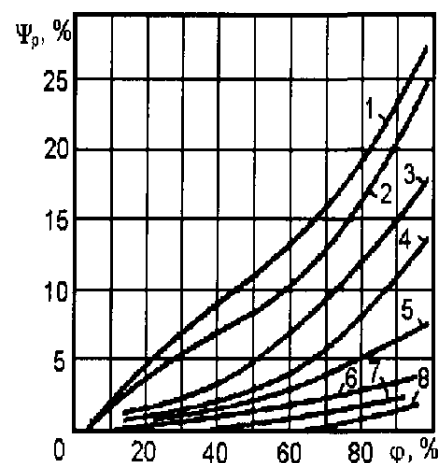


Рис. 8.3. Залежність рівноважної вологості волокнистих матеріалів від відносної вологості повітря: – віскозний шовк; 2 – натуральний шовк; 3 – бавовняне волокно; 4 – ацетатний шовк; 5 – капрон; 6 – полівінілхлоридне волокно; 7 – поліетилентерефталатне волокно; 8 – поліетиленове волокно

Ця рівноважна вологість ψ_p , до якої матеріал прагне зволожитися або підсохнути, при даній вологості повітря $\psi_в$ і температурі в різних матеріалів різна. У полярних матеріалів при одній і тій же відносній вологості повітря, наприклад $\psi_в = 80\%$ і одній й тій же пористості рівноважна вологість ψ_p в декілька разів більше, ніж у неполярних. Для різних матеріалів значення рівноважної вологості при тому самому значенні відносної вологості повітря можуть бути дуже різні. На ступінь зволоження істотно впливає наявність і розмір капілярних пор. У сильнопористих матеріалів, особливо волокнистих, ψ_p вище, ніж у матеріалів щільної, суцільної будови (рис. 8.3).

При висушуванні біля поверхні діелектрика створюється певна концентрація води, що буде перешкоджати іншим молекулам води виходити з діелектрика. При продуванні сухого повітря над поверхнею діелектрика інтенсивність висихання зростає. Таким чином, сушінню сприяють крім зниженої вологості навколишнього середовища і вентиляція повітря, яка обумовлює зіткнення з поверхнею матеріалу нових об'ємів сухого повітря, і підвищення температури, що зменшує розчинність води в діелектрику.

Під гігроскопічністю матеріалу (у вузькому значенні цього слова) розуміють рівноважну вологість ψ_p при $20\text{ }^\circ\text{C}$ у повітрі з $\psi_в \approx 100\%$. Якщо відносна вологість повітря $\psi_в = 65\%$ ($T = 20\text{ }^\circ\text{C}$), то це **кондиційна вологість** матеріалу.

Питомий об'ємний опір ρ органічної ізоляції, або пластмас із неорганічним наповнювачем, але органічним зв'язувальним, після декількох доби перебування в повітрі з $\psi_в \approx 100\%$ або у воді знижується на порядок і більше, $\text{tg}\delta$ зростає в кілька разів, а $E_{пр}$ знижується в 1,5–2 рази й більше (рис. 8.4 – 8.6).

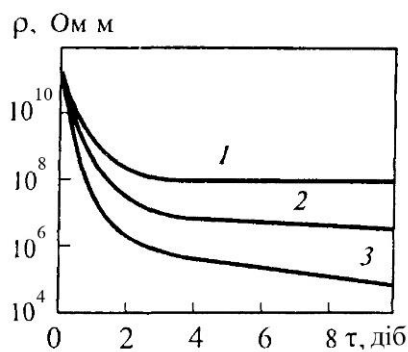


Рис. 8.4. Залежність ρ слюденітів від часу τ перебування в повітрі з $\psi_в = 95 - 98\%$ і $T = 20 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$: 1 – скло слюденіт на кремній-органічному лаку; 2 – слюденіт на бітумно-оливному і 3 – на гліфталево-оливному лаку

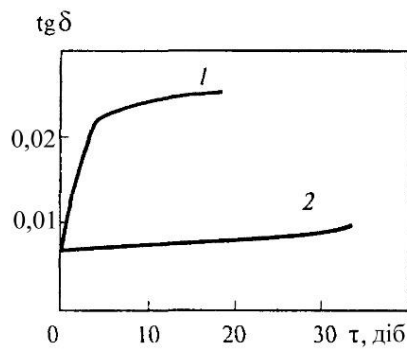


Рис. 8.5. Залежність $\text{tg}\delta$ (частота 50 Гц) поліакрилатної плівки від часу τ зволоження при $20\text{ }^\circ\text{C}$: 1 – у повітрі з $\psi_в = 95 - 98\%$; 2 – у воді

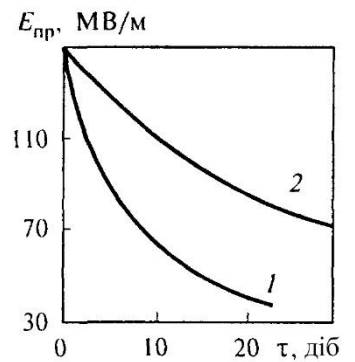


Рис. 8.6. Залежність $E_{пр}$ поліамідної плівки від часу τ зволоження при $40\text{ }^\circ\text{C}$: 1 – у воді; 2 – у повітрі з $\psi_в = 100\%$

Крім того, слід відзначити, що погіршення електричних характеристик в органічних діелектриках у вологому повітрі, як впливає з даних, наведених на рис. 8.4 – 8.6, відбувається інтенсивніше, ніж за такий же час при безпосередньому контакті матеріалу з водою.

Цей факт пояснюється тим, що пари води більш активно проникають у мікропори й мікротріщини з наступною конденсацією усередині матеріалу. Вода ж у рідкому стані через молекулярну взаємодію і наявність крайового кута змочування (рис. 8.7) проникає в мікропори з більшим уповільненням. Крайовий кут змочування β краплі води, нанесеної на поверхню тіла, характеризує здатність твердого тіла змочуватися водою (або іншою рідиною). Чим менше β , тим сильніше виражена змочуваність матеріалу; для поверхонь, які змочуються, $\beta < 90^\circ$ (рис. 8.7, а), для незмочуваних $\beta > 90^\circ$ (рис. 8.7, б).

Розчинність і коефіцієнт дифузії води в полімерних матеріалах залежить від їхньої природи, відносної вологості й температури повітря.

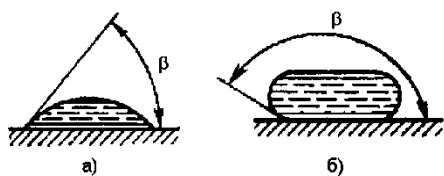


Рис. 8.7. Крапля рідини на змочуваній (а) і незмочуваній (б) поверхнях

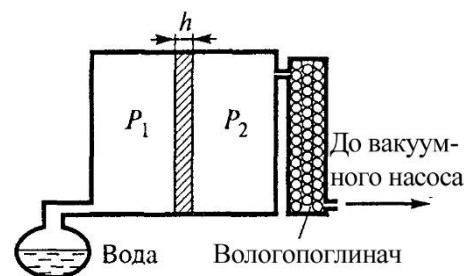


Рис. 8.8. Схема установки для визначення вологопроникності

Коли матеріал безпосередньо стикається з водою, то в цьому випадку він характеризується **водопоглинанням**. Такою є ізоляція відкритих установок, що піддаються дії атмосферних опадів, ізоляція електричних машин і апаратів на кораблях, у водяних насосах і т.п.

Матеріали анізотропної будови всмоктують вологу в різних напрямках з різною швидкістю. Так, дерево скоріше усмоктує вологу вздовж волокон, тобто з торцевого зрізу стовбура; шаруваті пластики — вздовж шарів, між які проникає волога. Сильно пористі матеріали, зокрема волокнисті, мають більше водопоглинання, ніж матеріали щільної, суцільної будови. Водопоглинання матеріалів, практично позбавлених пор (наприклад, стекл), може бути тільки поверхневим: волога, що поглинається з навколишнього середовища, накопичується у вигляді тонкої плівки на поверхні матеріалу, але не проникає всередину.

Якщо електроізоляційні матеріали взаємодіють безпосередньо з водою, то слід враховувати, що вода є сильно полярним діелектриком з низьким питомим опором ($10^3 \dots 10^4$ Ом·м). При попаданні в пори діелектриків вона значно знижує їх електричні властивості.

Гігроскопічність і водопоглинання не цілком відбивають ступінь можливих змін електричних властивостей електроізоляційного матеріалу при зволоженні через ефект перколяції (проникання).

Якщо поглинена волога здатна утворювати усередині ізоляції канали або плівки, які можуть пронизувати весь проміжок між електродами (або значну зону цього проміжку), то навіть дуже малі кількості поглиненої вологи приводять до дуже різкого погіршення електричних властивостей ізоляції внаслідок перколяції. Якщо ж волога розподіляється за об'ємом електроізоляційного матеріалу у вигляді окремих, не з'єднаних між собою малих включень, то вплив вологи на електричні властивості матеріалу менш суттєвий. Тому вплив вологи на пористі діелектрики значно сильніший, ніж на монолітні. Так, наприклад, питомий опір паперу з 3%-ю вологістю приблизно в 10 разів менший, ніж абсолютно сухого паперу, у той час як зволоження каучукових матеріалів з наповнювачами викликає лише дуже незначне зменшення їх ρ_v . Для матеріалів, які не змочуються, зменшення ρ_s при витримці у вологому середовищі незначне, тому що волога навіть у вигляді роси утворює окремі краплі, а не суцільну водяну плівку. Вологість діє в першу чергу на поверхневий опір діелектриків, а тому для захисту від зволоження їх покривають лаками, що не змочуються вологою.

Для оцінки якості захисних покриттів (лакові покриття обмоток електромашин, шлангова ізоляція кабелів, компаундні заливки й т.п.) велике практичне значення має **вологопроникність** діелектриків. **Вологопроникність** характеризує здатність матеріалу пропускати через себе вологу. Наявність навіть дрібної пористості, що є присутньою у більшості матеріалів, робить їх вологопроникними. Тільки стекла, випалена глазурована кераміка й метали вологонепроникні.

Коефіцієнт вологопроникності Π матеріалу визначається з основного рівняння вологопроникності

$$M = \Pi \cdot (P_1 - P_2) S \cdot \tau / h, \quad (8.1)$$

де M – кількість вологи, кг, що проходить за час τ , с, крізь ділянку поверхні зразка матеріалу площею S , м², і товщиною h , м, під дією різниці тисків P_1 і P_2 , Па з обох сторін. Величина M є різницею ваг посудини із вологопоглиначем до випробування й через час τ (рис. 8.8). В одиницях СІ Π вимірюється в секундах.

Рівняння (8.1) формально подібне закону Ома, при цьому різниця тисків $P_1 - P_2$ аналогічна різниці потенціалів, відношення M/τ – силі струму, $h/(PS)$ – електричному опору тіла; коефіцієнт Π – питомій об'ємній провідності.

У діелектричних матеріалів величина коефіцієнта Π змінюється в дуже широких межах (табл. 8.5). Таким чином, можна зробити висновок, що вологопоглинання, вологопроникність і вплив вологи на електрофізичні характеристики визначаються полярністю та структурою діелектрика. Вода, як найбільш полярна рідина, швидко дисоціює та сприяє дисоціації молекул діелектриків, тому утворення на поверхні діелектрика плівки вологи супроводжується значним зниженням питомого поверхневого опору, а поглинання її об'ємом діелектрика супроводжується ростом питомої об'ємної провідності, релаксаційних і діелектричних втрат, зниженням електричної міцності.

Винятково великий вплив має волога на електрофізичні характеристики волокнистих матеріалів і матеріалів з відкритою пористістю (табл. 8.6, 8.7).

Таблиця 8.5

Найменування матеріалу	Коефіцієнт вологопроникності μ , с
парафін	$1,5 \cdot 10^{-16}$
полістирол	$6,2 \cdot 10^{-15}$
триацетат целюлози	$2,1 \cdot 10^{-13}$

Таблиця 8.6. Поверхнєве зволоження діелектриків

Тип діелектрика	Характер взаємодії з вологою	Зміна ρ
Неполярний	Не змочується і не розчиняється	Практично не змінюється
Полярний	Змочується, але не розчиняється	Зменшується, особливо при наявності поверхневого забруднення
Іонний	Змочується і частково розчиняється	Зменшується тим більше, чим більша розчинність

Таблиця 8.7. Об'ємне зволоження діелектрика

Особливості структури діелектрика	Основний механізм вологовбирання	Вологопроникність	Зміни γ , $\text{tg } \delta$, ϵ	Зміна електричної міцності
Безпористий	Дифузійний	Дуже низька	Практично відсутні	Повільно зменшується
Пористий або волокнистий	При закритій пористості – дифузійний, капілярний	Велика, особливо при відкритій пористості	Зростання: помірне при закритій пористості, велике – при відкритій	Різко знижується
Композиційний	Дифузійний, осмотичний при водорозчинному наповнювачі	Низька	Ріст, особливо при осмотичному зволоженні	Помітне зниження

З проблемою зволоження тісно пов'язана **розчинність**. Ця властивість важлива для підбору розчинників для смол, лаків й ін., а також для оцінки стійкості електроізоляційних матеріалів до дії різних рідин, з якими ці матеріали мають контакт в процесі виготовлення ізоляції (наприклад, при просоченні лаками) і в експлуатації (ізоляція оливнонаповнених трансформаторів і т.п.).

Розчинність твердих матеріалів можна оцінювати за кількістю матеріалу, що переходить у розчин за одиницю часу з одиниці поверхні матеріалу, що контактує з розчинником, або за тією найбільшою кількістю речовини, що може бути розчинена в даному розчиннику (тобто за концентрацією насиченого розчину).

Як правило, тверді матеріали краще розчиняються в тих рідинах, з якими близькі по своїй хімічній природі. Так, полярні речовини краще розчиняються в полярних рідинах (наприклад, каніфоль у спирті, поліметилметакрилат у дихлоретані); неполярні речовини – у неполярних розчинниках (наприклад, парафін і каучук у рідких неполярних вуглеводнях). Лінійні полімери розчиняються краще. Зі збільшенням молекулярної маси і розвитком просторової структури розчинність полімеру знижується, при нагріванні – поліпшується.

ЛЕКЦІЯ 9

9.1 СТАРІННЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ

9.1.1 Теплове старіння

Сучасна тенденція до мінімізації витрат на виготовлення й експлуатацію електротехнічних і радіоелектронних пристроїв веде до підвищення питомої потужності електрообладнання. При цьому спостерігається інтенсифікація нагрівання електричної ізоляції як внаслідок діелектричних втрат, так і Джоулевою теплотою в обмотках електричних машин, жилах кабелів тощо. Це небажане явище, тому що саме нагрівання є одним з головних факторів, що зумовлюють старіння ізоляції та її руйнування.

Практично важливі показники електричної ізоляції, такі як ρ_v , $\operatorname{tg} \delta$, $E_{\text{пр}}$ тощо, при підвищенні температури, як правило, погіршуються. Тому виняткового значення набуває питання про здатність ізоляції тривалий час витримувати підвищену температуру без значного зниження експлуатаційної надійності, тобто питання про найвищу допустиму робочу температуру чи **нагрівостійкість ізоляції**, *що характеризує здатність матеріалу виконувати свої функції при дії робочої температури на протязі часу, порівнянного з часом нормальної експлуатації електрообладнання.*

Матеріал, стійкий до нагрівання, повинен мати значну енергію зв'язку між атомами та молекулами, щоб підвищення температури помітно не змінило його характеристики. Неорганічні діелектрики, як правило, відзначаються високою стійкістю до нагрівання. Із них виділяються ковалентні діелектрики – перспективний матеріал для застосування в екстремальних умовах.

Стійкість до нагрівання полімерних діелектриків значною мірою визначається складом і будовою молекулярних ланцюгів і структурою речовин. Так, карболанцюгові, в яких основний ланцюг молекули складається з атомів вуглецю, полімери, як правило, мають низьку стійкість до нагрівання внаслідок схильності до окислення. Винятком є лише ті полімери, в яких атоми водню заміщуються галогенами, наприклад фторопласт. Зростає стійкість до нагрівання лінійних полімерів із збільшенням довжини макромолекул і ступеня кристалічності полімера. Введення в основний ланцюг макромолекули ароматичних ланок чи інших елементів (гетероланцюгові полімери) також значно підвищує стійкість матеріалу до нагрівання.

Нагрівостійкість композиційних матеріалів значною мірою визначається не тільки природою зв'язувальної речовини, а й наповнювачем. Для підвищення нагрівостійкості компаундів, лакованих матеріалів, шаруватих пластиків, прес-композицій як наповнювачі використовують неорганічні матеріали – слюду, кварц, тальк, скловолокно, азбест, склотканини.

З огляду на значний вплив температури на експлуатаційні характеристики ізоляційних матеріалів, була проведена класифікація найпоширеніших матеріалів за нагрівостійкістю і встановлено **класи нагрівостійкості ізоляції**, кожному з яких відповідає своя найбільша допустима температура, при якій матеріал зберігає свої експлуатаційні властивості в заданих межах протязом заданого часу (близько $2 \cdot 10^4$ год.).

Класи нагрівостійкості позначалися латинськими літерами (табл. 9.1), але з розробкою і дедалі ширшим впровадженням діелектриків з високою нагрівостійкістю, класи, що відповідають температурам вищим за 200 °С, стали позначати просто відповідною температурою через 20–30 °С.

Таблиця 9.1 Класи нагрівостійкості ізоляції

Клас нагрівостійкості	t_{\max} , °С	Матеріали, що відносяться до даного класу нагрівостійкості
<i>Y</i>	90	Матеріали з непросочених і не занурених у рідкий діелектрик волокнистих матеріалів на основі целюлози (деревина, папір, картон, фібра, бавовняне волокно, гідратцелюлозне й ацетилцелюлозне волокно), натурального шовку і поліамідів, а також полівінілхлорид і вулканізований натуральний каучук, а також інші матеріали та їх комбінації, що відповідають даному класу.
<i>A</i>	105	Ті ж волокнисті матеріали, але просочені масляними, масляно-смоляними й іншими лаками або занурені в нафтову оливу або синтетичний рідкий діелектрик, а також ізоляція емальованих проводів на полівінілацеталевих лаках, ефіри целюлози, поліамідні смоли і плівки, деревинношаровий пластик, а також інші матеріали та їх комбінації, що відповідають даному класу.
<i>E</i>	120	Синтетичні волокна, плівки, смоли, шаруваті пластики (гетинакс, текстоліт) і пластмаси на термореактивних зв'язуючих (епоксидні, поліефірні, поліуретанові смоли та компаунди), які забезпечують відповідну нагрівостійкість, ізоляція емальованих проводів на епоксидних лаках, полікарбонатні плівки, а також інші матеріали та їх комбінації, що відповідають даному класу.
<i>B</i>	130	Неорганічні матеріали: поколена слюда, азбест, скловолокно в поєднанні з органічними зв'язуючими та просочуючими речовинами, а також інші матеріали та їх комбінації, що відповідають даному класу (склотканини, склотекстоліти, епоксидні компаунди з неорганічними наповнювачами, міканіти, політрифторхлоретилен й ін.).
<i>F</i>	155	Ті ж матеріали, що й до класу <i>B</i> , але як зв'язуючі використані органічні речовини з підвищеною нагрівостійкістю: кремнійорганічні, епоксидні й термореактивні смоли, а також ізоляція емальованих проводів на поліефірімідних і поліефірціануратних лаках, інші матеріали та їх комбінації, що відповідають даному класу (міканіти на основі скловолокна).
<i>H</i>	180	Матеріали на основі слюди, азбесту та скловолокна, що застосовуються в сполученнях з кремнійорганічними зв'язуючими та просочувальними речовинами, а також кремнійорганічні еластоміри та інші матеріали та їх комбінації, що відповідають даному класу.
200	200	Неорганічні діелектрики, такі як слюда, кварц, азбест, безлужне скло, оксид алюмінію тощо, для просочення або склеювання яких використовуються неорганічні речовини, сюди ж відносяться фторопласт-4 і поліімідні матеріали (плівки, волокна, ізоляція емальованих проводів), а також інші матеріали та їх комбінації, що відповідають даному класу.
220	220	
250	250	

Наведена класифікація певною мірою умовна (хоча і визначається відповідним стандартом), тому що деякі матеріали залежно від умов роботи (доступ вологи, кисню) потрібно відносити до різних класів. Вона може бути покладена в основу при конструюванні високовольтних виробів, якщо при цьому не забувати про умови експлуатації, технологічну й експлуатаційну сумісності матеріалів. Останнім часом ствердилася тенденція характеризувати клас нагрівостійкості ізоляції, що складається з кількох діелектриків, в цілому з врахуванням зазначених факторів. Таким чином, нагрівостійкість зараз часто виступає як характеристика систем електричної ізоляції електроустаткування, що характеризуються складом і умовами використання.

Крім того, зведення електроізоляційних матеріалів у дискретні класи через нерівномірний розподіл нагрівостійкості привело до того, що час, який повинні витримувати матеріали при відповідній температурі відрізняється десь на 25% (від 18400 до 24600 год.), що вносить деяку невизначеність класифікації.

Більш однозначну оцінку нагрівостійкості електроізоляційного матеріалу дає *температурний індекс*, що чисельно дорівнює температурі, за якої строк служби матеріалу становить 20 тисяч годин. Використовують температурний індекс для лакової ізоляції обмоткових проводів.

Ще повніша характеристика нагрівостійкості забезпечується *профілем нагрівостійкості*, який відображається сукупністю трьох температур, що відповідають строкам служби 20000, 5000, 500 годин за ймовірної надійності 0,95. Температурний індекс і профіль нагрівостійкості електроізоляційних матеріалів визначаються звичайно за результатами прискорених, завдяки підвищенню температури, випробувань, шляхом екстраполяції до потрібного значення строку служби, що вимагає незмінності механізму теплового старіння при зниженні температури.

При нагріванні властивості ізоляції звичайно погіршуються: зростають втрати енергії в ній, знижується опір і пробивна напруга. Імовірність електричного або теплового пробою ізоляції при випадкових зовнішніх або комутаційних перенапругах зростає.

Зменшується й механічна міцність. Для термопластичних матеріалів при нагріванні плинність може зрости настільки, що відбудеться зсув струмоведучої частини. При цьому виникне несприятливий розподіл поля і зросте ймовірність пробою.

Неприємні наслідки при нагріванні, зокрема газовиділення в рідких діелектриках, можуть викликати виникнення часткових розрядів.

Однак, найбільш істотним наслідком нагрівання є прискорення хімічних реакцій, що ведуть до незворотного погіршення властивостей електричної ізоляції. Насамперед, це відноситься до окиснювальних процесів. Кислотне число трансформаторної оливи, наприклад, неприпустимо швидко зростає при температурі порядку 100 °С (рис. 9.1, а). Настільки ж швидко зростає провідність трансформаторної оливи (рис. 9.1, б).

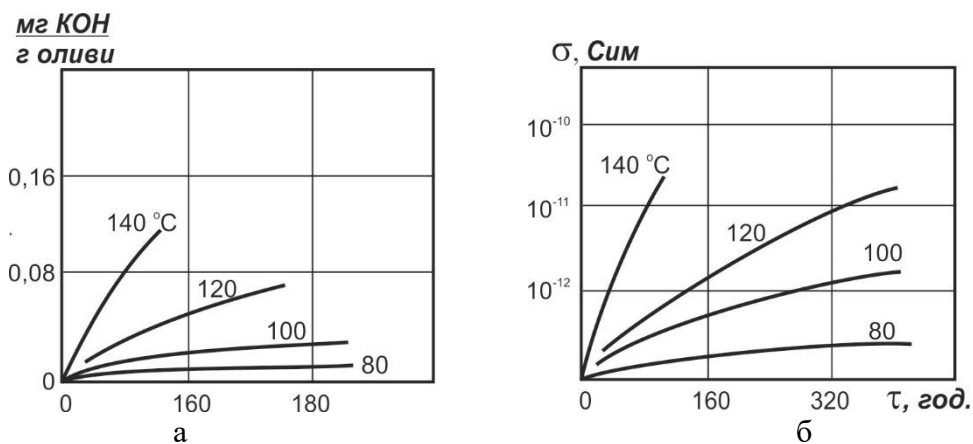


Рис. 9.1. Залежність кислотного числа (а) й провідності (б) трансформаторної оливи від часу старіння при різних температурах

У полімерних матеріалах при нагріванні поряд з окиснюванням розвиваються реакції деполімеризації, зшивання, а, починаючи з деякої температури, піроліз (термічне розкладання при нестачі кисню) стає настільки інтенсивним, що можливе навіть виділення чистого вуглецю.

Найбільше повно вивчене термічне старіння целюлозних матеріалів. Установлено, що основним процесом є молекулярна деструкція. При деструкції виділяються H_2O , CO_2 і CO у пропорції 10:2:1. Інтенсивне розкладання починається при температурах 140–150 °С. Наявність кисню трохи прискорює старіння, але тільки на початковому етапі. Досить незначний вплив кисню в порівнянні із впливом температури для целюлозних матеріалів пояснюється тим, що сам матеріал містить достатню кількість кисню. Це підтверджується порівняльними даними погіршення механічної міцності паперу, просоченого маслом у кисні й азоті при різних температурах (рис. 9.2). У той же час наявність вологи різко прискорює старіння паперу внаслідок гідролізу (рис. 9.3).

Окиснювальна деструкція звичайно переважає у випадку таких матеріалів як гума, кремнійорганічні й фенольні смоли, поліетилен, полістирол, поліетилентерефталат, полікарбонат, поліпропілен. Для деяких матеріалів, в основному, лаків, може спостерігатися окиснювальне структурування (зшивання) – утворення поперечних зв'язків, що супроводжується втратою еластичності. Деполімеризація переважає при термічному старінні поліхлорвінілу, поліметилметакрилату, поліізобутилену, сечовино – і мелаїноформальдегідних і епоксидних смол.

Теплове старіння електричної ізоляції супроводжується, насамперед, зміною механічних характеристик. Сильніше всього змінюються відносно подовження при розриванні й міцність на ударне вигинання. Трохи повільніше – міцність на розривання. Електричні характеристики ізоляції при тепловому старінні залежно від початкового стану ізоляції змінюються частіше в сторону зменшення і рідше – збільшення.

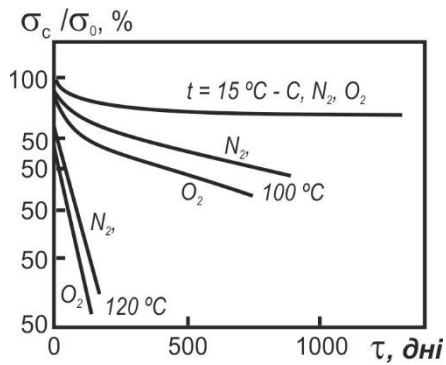


Рис. 9.2. Зміна механічної міцності паперу в процесі теплового старіння

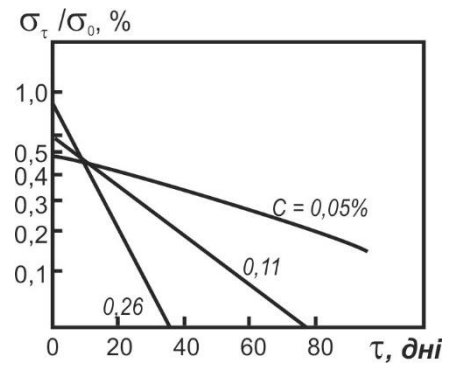


Рис. 9.3. Зміна механічної міцності зволоженого паперу у процесі теплового старіння

Для зволоженої ізоляції може спостерігатися майже сталість величин електричної провідності й $\text{tg } \delta$ із зміною температури або навіть їхнє зменшення, що пов'язане з висиханням ізоляції при нагріванні. Якщо ізоляція суха, то й провідність і $\text{tg } \delta$ ростуть з часом витримки при підвищеній температурі. Електрична міцність з часом змінюється неоднозначно. Іноді може спостерігатися деяке підвищення її зі збільшенням часу витримки ізоляції при підвищеній температурі внаслідок відпалювання механічних напруг в ізоляції, її підсушування, деполімеризації у випадку полімеризаційних лаків і компаундів. При тривалому старінні електрична міцність знижується, хоча іноді й у цьому випадку зниження незначне.

Таким чином, тільки зволоження ізоляції відбивається безпосередньо на її електрофізичних характеристиках. Окиснювальна деструкція й термодеструкція впливають більш істотно на механічні характеристики ізоляції, в порівнянні з електричними. При цьому тривале старіння при підвищеній температурі може привести до настільки значного погіршення механічних характеристик, що стає неминучим повне або часткове руйнування ізоляції при механічних навантаженнях, яким вона піддається в процесі експлуатації. Часткове механічне ушкодження звичайно значно погіршує електричну міцність ізоляції в результаті появи часткових розрядів і утворення слабких до зволоження і в електричному відношенні дефектних місць. Саме виявлення цих слабких місць і є метою широко розповсюджених профілактичних випробувань ізоляції підвищеною напругою.

Для загальної характеристики стійкості електричної ізоляції до термічного старіння використовують поняття довговічності. Довговічність при термічному старінні це час, за який механічна міцність ізоляції знижується до значення, нижчого ніж експлуатаційні механічні навантаження. Звичайно залежність довговічності від температури записується у вигляді емпіричного закону Ареніуса:

$$\tau = A \exp(B/T)$$

а для вузького діапазону температур

$$\tau = a \exp[-b(t - t_0)],$$

де a, b, A, B – константи для даного діелектрика в даних умовах його використання.

Орієнтовний розрахунок довговічності можна провести за формулою Ареніуса, використовуючи середні значення констант для відповідного класу ізоляції (табл. 9.2).

Таблиця 9.2

Значення констант в формулі Ареніуса	Клас нагрівостійкості					
	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>C</i>
$-\ln(A)$	14,1–19,3	14,3–15,1	13,4–15,5	18,9–19,7	23,8–24,2	21,8
$10^{-4} \cdot B$	0,9 – 1,15	0,985–1	0,9–1,02	1,23–1,27	1,53–1,55	1,55

Слід відзначити, що такий розрахунок дає досить приблизне уявлення про ресурс ізоляції, оскільки кожному класу нагрівостійкості відповідає своя довговічність при відповідній даному класу температурі, що може відрізнятися від довговічності інших класів, як уже відзначалося, на 25%–30%.

Щоб одержати уявлення про вплив температури на швидкість старіння, наведемо величину температурного інтервалу, що відповідає зменшенню довговічності вдвічі для деяких класів нагрівостійкості: клас А – 8°, клас В – (8°–10°), клас Н – 12°. Таким чином, чим вищий клас нагрівостійкості матеріалу, тим менш чутливий він до зміни температури. У той же час наведені оцінки свідчать про істотний вплив теплового старіння на експлуатаційну надійність діелектричних матеріалів, що потрібно враховувати при конструюванні електротехнічних виробів.

9.1.2 Старіння під дією механічного навантаження

У процесі експлуатації електрична ізоляція неминуче піддається впливу постійного або знакозмінного механічного навантаження. Це навантаження може мати технологічне походження або виникати внаслідок відцентрових ефектів, електродинамічних зусиль, теплового розширення, вібрації й т.п.

Під дією великого навантаження матеріал може руйнуватися, особливо якщо перед цим він довгий час піддавався впливу кисню або тепловому старінню. При тривалому змінному навантаженні, навіть для настільки еластичних матеріалів, якими є термопластичні полімери, спостерігається ефект втоми. Матеріал втрачає свою механічну міцність, у ньому утворюються тріщини.

Дуже інтенсивно розвиваються тріщини в напружених полімерних матеріалах, якщо одночасно на них впливають часткові розряди в присутності кисню.

Якщо навіть електрична ізоляція не грає одночасно роль механічного елемента конструкції, утворення тріщин супроводжується різким ростом імовірності пробою. Це пов'язане з полегшенням розвитку пробою уздовж тріщин.

Теплові деформації звичайно приводять до розшарування композиційної (твердої просоченої й склеєної лаком) ізоляції електричних машин через невідповідність *ТКІ*. Саме по собі це розшарування, як і обумовлене ним зниження механічної міцності, не є реальною загрозою. Однак розшарування полегшує проникнення кисню й вологи в об'єм ізоляції, а також сприяє розвитку часткових розрядів при високій нарузі. Природно, старіння ізоляції при цьому прискорюється.

Основи статистичної теорії механічної міцності були закладені С.Н. Журковим і А.П. Александровим. В основу цієї теорії покладене уявлення про те, що у твердому тілі є велика кількість дефектів, що у різній степені впливають на механічну міцність. Міцність тіла, при цьому, визначається найвагомими з них.

С.Н. Журковим було показано, що при тривалому навантаженні дефекти можуть утворюватися й у спочатку бездефектних тілах. Утворення дефектів пов'язується з термофлуктуаційними процесами. В результаті випадкової концентрації теплової енергії у певних точках твердого тіла (флуктуацій) постійно відбуваються розриви зв'язків. Під час відсутності механічного навантаження має місце рекомбінація, тобто “заліковування” розривів. Через деформацію тіла при механічному навантаженні рекомбінація розривань ускладнюється, відбувається їхнє нагромадження й утворення із часом макродефектів. Час безвідмовної роботи τ , тобто інтервал часу від прикладення навантаження до руйнування, можна визначити за формулою Журкова:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\delta}{kT}\right),$$

де τ_0 – стала, чисельно рівна періоду теплових коливань атомів ($10^{-12} - 10^{-13}$ с для неорганічних діелектриків і порядку 10^{-8} с – для органічних); U_0 – енергія активації розривання зв'язку під час відсутності навантаження; δ – механічне напруження; $\gamma = k(pT - q)$ – структурно чутливий коефіцієнт матеріалу (p і q – емпіричні параметри матеріалу); k – стала Больцмана.

Величина U_0 близька до енергії сублимації для металів і до енергії термодеструкції для полімерів і не залежить від структурних змін матеріалів, що впливають тільки на величину коефіцієнта γ . Відповідно до положень статистичної теорії міцності час безвідмовної роботи визначається руйнуванням області з мінімальним значенням структурно-чутливого коефіцієнта γ_{min} .

Експериментальні дані (рис. 10.4, 10.5) добре погоджуються з положеннями термофлуктуаційної теорії.

Механічні напруження впливають і на час до пробою полімерних діелектриків при дії часткових розрядів, причому в області підвищених механічних напружень криві часу до пробою поліетилену, що відповідають різним інтенсивностям часткових розрядів, зливаються в одну криву (рис. 64), що говорить про відсутність адитивності швидкості старіння. Введення домішок, що зменшують шкідливу дію часткових розрядів, приводить до утворення зони нечутливості поліетилену до механічних навантажень.

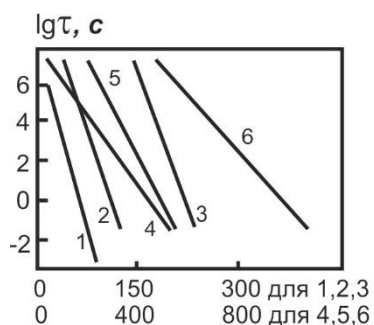


Рис. 9.4. Залежність часу безвідмовної роботи від механічного навантаження для полімерних матеріалів: 1 – поліметилметакрилату; 2 – полістиролу; 3 – триацетатцелюлози; 4 – поліетилену; 5 – віскози; 6 – картону

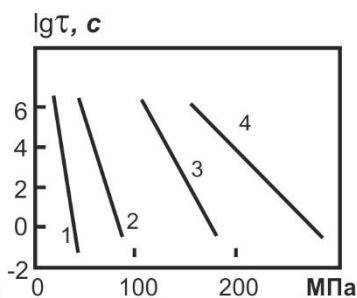


Рис. 9.5. Залежність часу безвідмовної роботи від механічного навантаження для: 1 – паперу; 2 – деревини; 3 – цементу; 4 – склопластику

Рис. 9.6. Залежність часу безвідмовної роботи від механічного навантаження для поліетилену, що піддавався впливу часткових розрядів зростаючої інтенсивності (1 – 3), а також поліетилену з домішками (4,5)

Наведені дані із старіння ізоляції при спільному впливі механічних і електричних навантажень, механічних напружень і часткових розрядів, як і викладені вище результати із електрохімічного старіння при різних температурах, за спільним впливом кисню й температури, вологи й температури й інші, свідчать про те, що швидкість старіння не адитивна, а тому дослідження закономірностей старіння ізоляції при одночасному впливі декількох факторів є першочерговим завданням в області надійності електричної ізоляції.

9.1.3 Електрохімічне старіння ізоляції

Як відомо, електропровідність ізоляції може носити як електронний, так і іонний характер. В останньому випадку протікання струму пов'язане з переносом речовини. Якщо іонна провідність домішкова, то опір діелектрика зростає з часом внаслідок очищення від домішкових іонів. У випадку власної іонної провідності діелектрика перенесення іонів на електроди звичайно пов'язане з порушенням структури твердих тіл і електролізом рідких діелектриків. Внаслідок постійного утворення дефектів електричні властивості діелектриків при цьому погіршуються. Погіршення властивостей ізоляції при впливі статичного електричного поля називається електрохімічним старінням. Для ілюстрації закономірностей електрохімічного старіння, розглянемо старіння просоченого паперу, рутилової і сегнетоелектричної керамік, а також лужно-галоїдних кристалів.

У просоченій паперовій ізоляції іонна електропровідність обумовлена дисоційованою (тобто такою, що розпалась на іони H^+ і OH^-) вологою або іншими дисоційованими домішками. Звичайно електрохімічне старіння просоченої ізоляції стає помітним при температурах вище $50\text{ }^\circ\text{C}$. З ростом напруги старіння також прискорюється.

Вважається, що основну роль при електрохімічному старінні відіграють іони водню, що збираються біля катода при гідролізі, через їх велику хімічну активність. Особливо небезпечні вони у випадку хлорованого просочення, тому що відривають від молекул просочувальної речовини атоми хлору й утворюють із ними соляну кислоту. Соляна кислота викликає корозію електродів і сприяє збільшенню концентрації іонів металу в ізоляції і тим самим погіршення її характеристик.

Крім вологи велику небезпеку для просоченої ізоляції являють флюси для пайки з соляною кислотою, каніфоллю, бітумні компаунди, що застосовуються для герметизації виробів, уражені гниттям волокна електрокартону та інші забруднення. Однак при високій культурі виробництва їхнього впливу на строк служби ізоляції можна уникнути.

Якщо припущення про істотну роль водневих іонів при електрохімічному старінні справедливе, то, при введенні в ізоляцію акцепторів водневих іонів, можна загальмувати його. Дійсно, досліди із введенням азобензолу й антрахінону в просочену хлорнафталіном конденсаторну ізоляцію показали, що при цьому спостерігається підвищення строку служби конденсаторів в 3–10 разів залежно від температури старіння.

Деякі дослідники вважають, що захисна дія цих речовин пов'язана з утворенням захисної плівки на електродах. Плівка усуває корозію й каталітичну дію електродів на піролітичне розкладання ізоляції. Ця гіпотеза менш правдоподібна, ніж попередня.

При електрохімічному старінні монокристалів KCl, KBr, TiO₂, BaTiO₃, SrTiO₃, а також титанвмісних станатних і цирконатних керамік найбільш характерним є зростання струму провідності з часом. Це зростання звичайно закінчується пробоем.

У процесі старіння титановмісних керамік, як і у випадку лужно-галоїдних кристалів, велику роль відіграє інжекція електронів з катода. Про ріст її впливу говорить зміна вольт-амперної характеристики керамічних зразків у процесі старіння відповідно до співвідношення

$$i = A(U - U_0)^n(t),$$

де U_0 – е.р.с. поляризації; $n = 1-2$, що відповідає інжекційній вольт-амперній характеристиці.

На відміну від лужно-галоїдних кристалів, у кераміці на основі BaTiO₃ спочатку розвивається процес у прианодній області (на першому й другому етапах старіння), а потім і в прикатодній (на третьому). Для кераміки з Т-80 приелектродні процеси розвиваються паралельно. Тому третій етап майже відсутній.

Про роль інжекції електронів з катода і дірок з анода в процесі старіння свідчать також результати експериментів із видалення приелектродних шарів зістареної кераміки, але механізми процесів електрохімічного старіння кераміки до теперішнього часу не можна вважати повністю встановленими.

9.1.4 Стійкість до дії радіації

Радіаційна стійкість – це здатність матеріалів працювати, не погіршуючи своїх основних властивостей в умовах інтенсивного іонізуючого випромінювання або після його впливу.

До іонізуючих випромінювань звичайно відносять

- α – частинки, що є насправді ядрами гелію;
- β – частинки, електрони з енергією порядку MeV;
- протони;
- нейтрони;
- γ – частинки, що є високоенергетичними фотонами;
- рентгенівські промені;
- ультрафіолет.

Всі речовини поглинають іонізуюче випромінювання, зменшення його інтенсивності з товщиною відбувається відповідно з законом Бугера-Ламперта $I=I_0\exp(-\kappa h)$, де I_0 – інтенсивність пучка іонізуючого випромінювання, нормального поверхні речовини; I – інтенсивність радіації після проходження шару речовини товщиною h ; κ – лінійний коефіцієнт ослаблення. Очевидно, що при проходженні через шар матеріалу товщиною $h_e = 1/\kappa$, м, інтенсивність іонізуючого випромінювання зменшується в e раз. На практиці при використанні матеріалів для захисту від іонізуючого випромінювання, наприклад робітників атомних електростанцій, користуються товщинами двох- h_2 чи десятикратного h_{10} ослаблення, які знаходять з умов $I/I_0=\exp(-\kappa h_2)$ і $I/I_0=\exp(-\kappa h_{10})$. Зауважимо, що зменшення інтенсивності іонізуючого випромінювання є мультиплікативною (перемножуваною) величиною, так що матеріал товщиною $2h_{10}$ ослаблює інтенсивність іонізуючого випромінювання в 100 раз.

Лінійний коефіцієнт ослаблення іонізаційного випромінювання пропорційний густині матеріалу, тому замість нього можна використати масовий коефіцієнт ослаблення $\kappa_m=\kappa/t$, м²/кг, що не залежить від густини матеріалу і дорівнює долі монохроматичних γ -квантів, що поглинаються шаром товщиною 1 кг/м², але залежність κ_m від енергії іонізуючого випромінювання залишається.

Дію іонізуючого випромінювання на електротехнічні матеріали, що працюють, наприклад, в забрудненій зоні атомної електростанції, характеризують гранично допустимою дозою, одержавши яку діелектричний матеріал знижує хоча б одну зі своїх основних електричних або механічних характеристик на 25% і більше. Радіаційну стійкість для перших чотирьох іонізуючих факторів виражають критичною поглиненою енергією $W_{кр}$, Гр/с (Грей в секунду, що те ж саме, що і Вт/кг), для нейтронів – флюенсом, нейтрон/м², – загальним числом радіоактивних часток, що попадають на одиницю площі матеріалу і викликають погіршення його основних характеристик.

При розгляді питання про стійкість діелектриків до дії радіоактивного опромінювання слід розрізняти ефекти, що спостерігаються тільки у процесі опромінювання внаслідок іонізуючої дії радіації (ріст провідності, створення об'ємних зарядів і т.п.) та пост-ефекти, ті, що залишаються після припинення

опромінювання і визначаються, у першу чергу, ростом дефектності матеріалу, тобто його старінням.

З діелектриків найбільшу стійкість мають неорганічні матеріали: кварц, слюда й т.п., найменшу – органічні полімери. Радіація особливо небезпечна для тих полімерів, в яких при опромінюванні переважають процеси деструкції. Але й у зшивних полімерів при перевищенні певних доз опромінювання властивості погіршуються.

Найчутливіші до радіації у процесі опромінювання електрофізичні характеристики, а пост-ефекти супроводжуються значним погіршенням механічних характеристик. І тільки, коли механічно діелектрик починає руйнуватися, спостерігаються незникаючі зміни ρ , ϵ_r , $\text{tg}\delta$, E_{np} . Якщо взяти за критерій 25% погіршення механічних характеристик, то радіаційна стійкість полістиролу складає $4 \cdot 10^7$ Гр, поліетилену – $1,5 \cdot 10^5$ Гр, а політетрафторетилену (фторопласту-4), який у інших відношеннях майже ідеальний діелектрик, всього $4 \cdot 10^3$ Гр, тобто радіаційна стійкість фторопласту-4, що відноситься до деструкційних полімерів, в 10^4 раз менша, ніж полістиролу, що структурується.

9.1.5 Старіння діелектриків під впливом навколишнього середовища

Ізоляція в залежності від її агрегатного стану може працювати в повітрі, в ґрунті, в атмосфері різних газів, у рідкому діелектрику. Найбільш несприятливі умови при роботі у відкритій атмосфері. При цьому на ізоляцію діють кисень та інші агресивні гази (озон, аміак, окисли азоту, сірки), що з'являються в атмосфері в результаті забруднення її виробничою діяльністю людини, тверді частки (зокрема промисловий пил), волога, ультрафіолетові й космічні промені, радіоактивне випромінювання Землі, гризуни, бактерії, цвіль і т.п.

Агресивні газові компоненти навколишнього середовища особливо небезпечні в сполученні з вологою, коли вони утворюють кислоти або луги. Тому в районах із сильно розвинутою промисловістю доводиться удаватися до захисту ізоляції від таких впливів (фарбування, захисні покриття й т.п.).

На властивості оливи особливо впливає окиснювання внаслідок дифузії кисню в оливу в процесі експлуатації. У результаті окиснювання ізоляційного масла утворюються нестабільні перекиси, що каталітично діють на процес окиснювання. В ролі каталізатора окиснення може виступати також метал електродів. При окиснюванні утворюється **вода**, що різко погіршує характеристики оливи. При великій концентрації продуктів окиснювання оливи спостерігається їх полімеризація й утворення **твердого шламу** (засмолення оливи). Для кількісної характеристики ступеня окиснювання оливи використовують **кислотне число** (кількість міліграмів КОН, необхідна для нейтралізації вільних кислот в 1 г оливи). Для свіжої трансформаторної оливи воно повинне бути $\leq 0,05$ мг КОН/г, кабельної й конденсаторної $\leq 0,02$ мг КОН/г, для оливи в експлуатації до 0,4 мг КОН/г.

Однак, зараз встановлено, що окиснювальний процес у оливі насичується, і виміряне кислотне число не дає уявлення про ступінь засмолення оливи. Враховуючи, що наявність твердих домішок також істотно впливає на величину U_{np} ,

введений прямий контроль засмолення. Кількість шламу повинна бути $\leq (0,15 - 0,2)\%$. Але і контроль засмолення не дає повного уявлення про стан оливи, бо, хоча кількість шламу й збільшується в процесі експлуатації, неясно, як ураховувати шлам, що випав в осад.

Іноді для оцінки якості оливи застосовують дані про величину $tg\delta$ або γ . Однак, якщо підвищені значення цих характеристик однозначно свідчать про погіршення електроізоляційних властивостей оливи, то малі – не засвідчують її високої якості. Таким чином, повністю об'єктивний критерій для оцінки стану оливи в процесі експлуатації ще не вироблений.

Для твердої органічної ізоляції найбільш чутливими до окиснювання є механічні властивості. Зі збільшенням ступеня окиснювання відносно подовження при розриванні для більшості органічних матеріалів зменшується на порядок і більше. Збільшення твердості при окисненні матеріалу загрожує розриванням ізоляції при нагріванні або охолодженні в результаті виникнення термомеханічних зусиль. Крім того, механічна міцність полімерів в результаті окиснювання також істотно знижується. Для целюлозних і поліамідних (капрон) матеріалів може спостерігатися повна втрата міцності. Чутливі до окиснювання також поліпропілен і поліізобутилен. Найбільшу стійкість мають поліефірні матеріали, фторопласти, полівінілфторид, полістирол, поліметилметакрилат, кремнійорганічні матеріали.

Електричні характеристики полімерів менше залежать від ступеня окиснювання. Найбільш чутливою характеристикою у випадку неполярних полімерів є $tg\delta$, величина якого пропорційна кількості полярних груп ($C = O$). Для деяких полімерів (поліолефіни) при окиснюванні спостерігається значний ріст провідності. Для інших електричні характеристики змінюються незначно.

Практично всі діелектричні матеріали здатні тією чи іншою мірою **поглинати гази** при експлуатації в умовах дії навколишнього середовища. Звичайно навіть дегазований матеріал із часом внаслідок дифузії насичується газом. Якщо газ інертний по відношенню до даного діелектрика, то насичення газом істотно не позначається на властивостях матеріалу. Наявність газу починає проявлятися тільки при наявності порожнин в матеріалі, або тоді, коли він, наприклад, у результаті зміни температури рідких діелектриків, збирається в бульбашки, у яких можуть виникнути часткові розряди. При цьому може спостерігатися значне прискорення старіння й зниження пробивної напруги ізоляції. Якщо порожнини відсутні, то дифузія газу в діелектрик небезпечна тільки при наявності в його складі агресивних складових і, насамперед, кисню. Вплив кисню визначається температурою й складом діелектрика й найбільш істотний у випадку органічних матеріалів. У середовищі, що містить кисень, можуть протікати реакції дегідратації з виділенням води, утворення карбонільних і карбоксильних ($C = O$) груп, наслідком чого є зростання $tg\delta$, і утворення просторової структури за допомогою перекисних ($-C-O-C-$) містків. Реакції карбонізації можуть супроводжуватися деструкцією (розривом молекулярних ланцюжків).

Для твердих діелектриків швидкість окиснювання часто крім реакційної здатності обмежена дифузією кисню в об'єм. Тому зі зменшенням товщини ізоляції швидкість окиснювання зростає. Різко зростає швидкість окиснювання з

підвищенням температури за рахунок зростання коефіцієнта дифузії кисню в діелектрик.

Зі шкідливим впливом кисню на органічну ізоляцію при експлуатації у відкритій атмосфері можна боротися введенням у матеріал так званих антиоксидантів. За звичай це – аміни й феноли. Окисляючись самі, вони захищають основний матеріал від окиснювання. Найбільш ефективними антиоксидантами є NN' -дифеніл- n -фенілендіамін, 4-трет-бутилпірокахетин, n -оксидифеніламін, феніл- β -нафтиламін і ін.

Поряд з киснем важливе місце серед атмосферних факторів займає *волога*. Волога з повітря може адсорбуватися на поверхні ізоляції, а також дифундувати в її об'єм. Із часом устанавлюється рівноважне зволоження ізоляції, величина якого залежить від властивостей матеріалу й вологості навколишнього середовища.

Сильному впливу вологості піддається *трансформаторна олива*. $tg\delta$ оливи зростає при зволоженні більш ніж на порядок, ρ на 6–7 порядків, ε – приблизно в 2 рази, $E_{пр}$ – на порядок.

При наявності твердих гігроскопічних домішок вплив вологи на властивості оливи ще більший.

Деякі *тверді матеріали* (скло, порцеляна, слюда, азбест, фторопласт, полістирол, поліетилен та ін.) звожуються при експлуатації в навколишньому середовищі надзвичайно мало, інші (особливо волокнисті целюлозні й поліамідні, а також більшість лаків) – дуже сильно.

Зволоження супроводжується різким погіршенням електричних характеристик ізоляції. $tg\delta$ целюлозних і поліамідних матеріалів при збільшенні кількості вологи до 2% збільшується на півтора-два порядки, провідність зростає на 5–7 і більше порядків, ε зростає в 2–3 рази, $U_{пр}$ знижується в 5–7 разів. При зволоженні знижується в кілька разів і механічна міцність цих матеріалів. Але для деяких, наприклад для паперу, спостерігається максимум механічної міцності в залежності від ступеня зволоження.

При зволоженні можна констатувати, що, в загальному випадку, об'єм кристалічних матеріалів змінюється мало, в той же час для деяких аморфних діелектриків спостерігається набухання, тобто збільшенням об'єму.

У загальному випадку можна зробити висновок, що фізична абсорбція води супроводжується зміною електричних характеристик ізоляції. Якщо вода вступає в хімічну взаємодію, то має місце погіршення і механічних властивостей.

Для захисту твердих ізоляційних матеріалів від вологи, що міститься у навколишньому середовищі, звичайно використовують просочення їх оливами, парафіном, лаками й т.п. Просочувальні речовини заповнюють великі порожнечі й зменшують поверхню проникнення вологи в об'єм. Швидкість зволоження ізоляції при цьому зменшується. Але із часом встановлюється той же рівноважний ступінь зволоження, що й без просочення. Інші конструктивні заходи (наприклад, герметизація) також не завжди приводять до повного усунення впливу вологи, тому що досить часто вода є продуктом розкладання ізоляційного матеріалу в процесі старіння. Однак швидкість зволоження при цьому сильно знижується, що дозволяє суттєво підвищити термін служби ізоляції.

Пилові частинки, що містяться в забрудненій атмосфері, при осіданні на поверхню ізоляції збільшують поверхневу провідність, особливо при наявності вологи, різко спотворюють розподіл поля, сприяють руйнуванню поверхні ізоляції струмами провідності й поверхневими розрядами. Виявити забруднення порівняно легко, хоча видалити їх не завжди просто, особливо при наявності цементного пилу й інших забруднень, що міцно зчіплюються з поверхнею. Тому для зовнішньої ізоляції застосовуються спеціальні конструктивні заходи, що дозволяють зменшити вплив забруднень на працездатність конструкції.

Під дією частинок піску можлива абразивна дія на тверді електроізоляційні матеріали, що також необхідно враховувати при конструюванні зовнішньої ізоляції.

Роль природних випромінювань, особливо ультрафіолетового, зводиться, в основному, до активації окиснювальних процесів. Окиснювальна деструкція еластомерів (гум) і полімерів при впливі сонячної радіації прискорюється в кілька разів. Найбільш простий спосіб захисту складається в додаванні до матеріалу барвних пігментів, що поглинають ультрафіолетове випромінювання. Найчастіше застосовується газова сажа.

Вплив природних іонізуючих випромінювань на діелектрики незначний.

З **біологічно активних факторів** навколишнього середовища найбільшу небезпеку являють цвіль і бактерії. Грибки в процесі життєдіяльності виділяють кислоти, що шкідливо впливають особливо на целюлозну та поліамідну ізоляцію. Бактерії іноді вживають ізоляцію як харчовий продукт. Поїдають ізоляцію, особливо на основі целюлози, і деякі комахи, серед яких найнебезпечнішими є терміти.

ЛЕКЦІЯ 10

10.1 ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

Традиційна побудова розділу "Діелектричні матеріали" ґрунтується на загальній класифікації діелектриків за агрегатним станом, складом (органічні, неорганічні, композиційні) та призначенням (електроізоляційні, конденсаторні, активні).

При розгляді основних властивостей газоподібних діелектриків необхідно звернути увагу на взаємозв'язок між будовою молекули газу (полярністю) та електричною міцністю, ознайомитися з електроізоляційними властивостями найбільш широко застосовуваних газоподібних діелектриків.

У процесі вивчення рідких діелектриків необхідно засвоїти їхню класифікацію на природні та штучні, знати особливості їхніх властивостей, вміти за числовими значеннями діелектричних характеристик – установити належність рідкого діелектрика до нейтральних або полярних, а також оцінити можливості та специфіку їх практичного застосування. Основну увагу слід приділити вивченню властивостей трансформаторної, кабельної та конденсаторної оливи, кремнійорганічних і фторорганічних рідин.

Значні ускладнення виникають при вивченні твердих діелектриків через різноманітність матеріалів, які належать до них, і великих відмінностей хімічної будови, структури та властивостей цих матеріалів.

Потрібно звернути увагу на відмінність властивостей електричної ізоляції, виготовленої з одного й того самого матеріалу, що пов'язана:

а) з розмірними ефектами (плівкова ізоляція конденсаторів має значно вищу електричну міцність порівняно з електричною міцністю об'ємного матеріалу – екструдованої ізоляції проводів і кабелів; механічна міцність полімерних волокон у багато разів перевищує міцність листового або блочного матеріалу і т.п.,

б) з термообробкою, що супроводжується зміною агрегатного стану та утворенням кристалічної чи просторової структури (покращення діелектричних властивостей лаків, компаундів, емалей при твердненні, каучуків при вулканізації, полімерів при кристалізації та зшиванні і т.п.);

Крім того, необхідно взяти до уваги можливість помітного покращення властивостей полімерних діелектриків:

– шляхом модифікації хімічної будови та структури матеріалу (підвищення стійкості до нагрівання при введенні замісників водню, шляхом утворення привитих або зшитих полімерів),

– створення матеріалів з широкою гамою властивостей способами пластифікації, спінювання, введення наповнювачів, стабілізаторів, антиоксидантів, антирадів і т.п. в поліетилен, полістирол, полівінілхлорид, полікарбонат, поліімід, поліуретан, фторопласт та інші полімери,

– надання потрібних технологічних, технічних і експлуатаційних властивостей компаундам шляхом добору в'язучого, затверджувачів, наповнювачів, прискорювачів, пластифікаторів і т.п.

При вивченні окремих діелектричних матеріалів необхідно засвоїти інформацію про склад, будову та структуру основних різновидів матеріалу, його

електрофізичні, теплові, механічні й фізико-хімічні властивості, способи та сфери застосування.

Слід зазначити, що можливості чистих матеріалів вже значною мірою використані і задовольнити зростаючі вимоги науково-технічного прогресу в нових матеріалах можна тільки шляхом створення композиційних матеріалів, які поєднують задані, часто суперечні, властивості.

Тому особливу увагу слід приділити композиційним матеріалам, утвореним при механічному перемішуванні органічних і неорганічних компонентів з наступною технологічною обробкою. До композиційних матеріалів можна віднести більшість використовуваних на практиці діелектричних матеріалів на основі органічних в'язучих: пластмаси, лакотканини та шаруваті пластики, компаунди, лаки, емалі тощо. Останнім часом як в'язучі все ширше використовуються елементоорганічні та неорганічні речовини.

Для ознайомлення наведемо приблизну класифікацію електротехнічних матеріалів за призначенням.

1. Матеріали для електротехнічних машин та апаратів:

- газоподібні – повітря, азот, елегаз, водень;
- рідкі – нафтові та рослинні оливи, кремнійорганічні та фторорганічні рідини;
- тверді органічні і композиційні – полііміди, папір, електрокартон, гетинакс, текстоліт, прес-матеріали, лакотканини, просочувальні та заливальні компаунди, лаки;
- тверді неорганічні та композиційні – фарфор, скло, слюда та матеріали на її основі – слюдопапери, міканіти, слюдопласти, мікалекс та ін.

2. Електроізоляційні матеріали для ліній передач електроенергії та інформації:

- матеріали для повітряних ліній електропередач – дерево, бетон, повітря, порцеляна, скло, ситали, склопластики;
- матеріали для кабельних ліній електропередач – поліетилен, полівінілхлорид, гума, кабельний папір, кабельні оливи, елегаз, азот, бітумні компаунди;
- матеріали для ізоляції проводів та кабелів – поліетилен, полівінілхлорид, полістирол, політетрафторетилен, поліізобутилен, поліетилентерефталат, поліуретани, гуми, папір, лаки, емалі, волокна;
- матеріали для підкладок друкованих плат – фольговані гетинакс, текстоліт, склотекстоліт, керамічні матеріали, ситали.

3. **Матеріали для установочної ізоляції** – пластмаси, установочна кераміка, скло, ситали, мікалекс, фторопласт, шелак, ебоніт, бурштин.

4. **Матеріали для роботи в екстремальних умовах** – оксидна (MgO , Al_2O_3 , BeO та ін.) та безкиснева (Si_3N_4 , AlN та ін.) кераміка.

5. Матеріали для конденсаторів:

- електролітичних – папір, оксидна ізоляція;
- низькочастотних – папір, конденсаторна олива, слюда, полімерні плівки, титановмісна кераміка;
- високочастотних – конденсаторна кераміка.

6. Активні діелектрики:

- п'єзоелектрики для резонаторів, п'єзоелектричних фільтрів, двигунів – кварц, поляризована сегнетокераміка (цирконат – титанат свинцю, ніобат свинцю, ніобат барію, кераміка Т-1700);
- сегнетоелектрики для управління високочастотними і надвисокочастотними сигналами – сегнетова сіль, дигідрофосфат калію, титанат барію та його тверді розчини з іншими титанатами;
- піроелектрики, як датчики для вимірювання температури на відстані;
- електрети для мікрофонів, датчиків – віск, полімери (фторопласт, поліетилентерефталат та ін.);
- оптичні матеріали для активних елементів лазерів: рубін, ітрійалюмінієві гранати, алюмінат ітрію, натрійлантанмолібдат, молібден та шесліт, леговані неодимом, флюорит з диспрозієм та ін.;
- люмінофори в системах індикації – сульфід цинку, вілеміт, воластоніт;
- рідкі кристали в системах індикації і відображення.

10.2 ГАЗОПОДІБНІ ДІЕЛЕКТРИКИ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

Газоподібні діелектрики використовують, звичайно, як електроізоляційні матеріали.

До їх переваг відносяться надзвичайно високі значення електрофізичних властивостей при низьких (до 1000 В) напругах:

- дуже високий питомий електричний опір ($10^{15} - 10^{17}$ Ом·м);
- мале значення відносної діелектричної проникності (~ 1) і дуже малий $\text{tg}\delta$ ($<10^{-5}$);
- мала густина, що особливо важливо для бортової апаратури.
- До основних недоліків газоподібної ізоляції можна віднести:
- низьку електричну міцність (3 – 7,8 кВ/мм);
- відсутність конструкційних властивостей, тобто можливостей сприймати і витримувати механічні навантаження;
- необхідність герметизації (крім повітря при атмосферному тиску);
- підвищена вартість (крім повітря, яке практично безкоштовне).

Основні характеристики газів, що використовуються як електротехнічні матеріали, наведені в табл. 11.1.

Таблиця 10.1 Порівняльна таблиця властивостей газів

Газ	Відносна густина	Діелектрична проникність	Відносні до характеристик повітря значення			
			Електрична міцність	Теплопровідність	Теплоємність	Коефіцієнт тепловіддачі
Повітря	1,0	1,00057	1,0	1,0	1,0	1,0
Азот	0,97	1,00058	1,0	1,08	1,05	1,03
Водень	0,069	1,00026	0,6	6,69	14,35	1,51
Елегаз	5,03	1,00191	2,4	1,25	0,6	–
Фреон	–	–	2,6	–	–	–

Повітря – створює супутню ізоляцію в лініях електричних мереж, що діє паралельно з твердою ізоляцією, яка представлена підвісними або штирьовими

ізоляторами. На властивості повітря і його взаємодію з твердою ізоляцією електричних мереж найбільше впливає волога. Повітря завжди супроводжує роботу електротехнічного та електроенергетичного обладнання, і тут основним недоліком повітря є його хімічна активність, зумовлена наявністю кисню.

Основні властивості повітря: густина – 1.293 кг/м^3 , електрична міцність – 3 кВ/мм ; теплопровідність – $0.0257 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; теплоємність $1.01 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; коефіцієнт розвиненої конвективної тепловіддачі $10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$.

Азот має властивості, близькі до властивостей повітря, але відзначається хімічною інертністю, а тому використовується для „азотного захисту” трансформаторної оливи, що попередньо вакуумується і знекиснюється, та для заповнення газових конденсаторів.

Водень, незважаючи на те, що його електрична міцність складає всього $0,54$ від електричної міцності повітря, має надзвичайно високі теплофізичні характеристики – його теплоємність в $14,35$ раз, а теплопровідність в $6,8$ раз більші, ніж у повітря. Враховуючи збільшення пробивної напруги твердої ізоляції при тепловому пробі при збільшенні коефіцієнта тепловіддачі, водень використовують для охолодження в електричних машинах великої потужності. Крім того, використання водню зменшує втрати потужності на тертя ротора в газі і внаслідок відсутності кисню приводить до уповільнення теплового старіння органічних складових ізоляції. Але враховуючи горючість і можливість утворення гримучого газу, в машині весь час необхідно підтримувати надлишковий тиск, що можна віднести до недоліків водню.

Елегаз (електричний газ) – шестифториста сірка має електричну міцність в $2,9$ рази вищу ніж повітря, як і інші фторовмісні гази, що переважають повітря за електричною міцністю до 10 раз. На відміну від інших сполук фтору він не токсичний, витримує дію дуги і має хороші дугогасні властивості, витримує без розкладання температуру до $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Елегаз використовують, приймаючи до уваги обов'язкову необхідність герметизації, при надлишковому тискові до 2 МПа в високовольтних конструкціях, особливо в неоднорідних полях, у вимикачах, в герметизованих розподільних пристроях, в газонаповнених високовольтних кабелях.

Фреон – випаровувальний охолоджувач в малогабаритних бортових трансформаторах, в холодильних машинах. При використанні фреону необхідно враховувати, що він викликає корозію деяких твердих органічних діелектриків.

10.3 РІДКІ ДІЕЛЕКТРИКИ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

Рідкі діелектрики забезпечують ізоляцію трансформаторів, масляних вимикачів, реакторів, реостатів, конденсаторів, оливонаповнених кабелів та ін. Їх також застосовують як просочувальний матеріал. Вони мають електричну міцність, що в 3 і більше разів перевищує електричну міцність газоподібних діелектриків, і до 30 разів вищу теплопровідність в порівнянні з газами. Просочення паперової ізоляції конденсаторів і кабелів рідкими діелектриками значно підвищує її електричну міцність.

Рідкі діелектрики поділяються на:

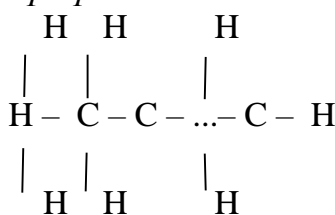
- природні вуглеводневі: нафтові оливи, що використовуються як ізоляційні, охолоджувальні та просочувальні рідини, та обмежено застосовувані в наш час рослинні олії – рицинова (для просочування паперових конденсаторів);
- синтетичні: кремній – та фторорганічні рідини, а також штучно синтезовані вуглеводневі органічні рідини.

10.3.1 Нафтові електроізоляційні оливи

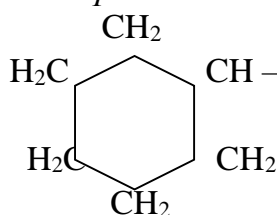
Нафтові оливи отримують в результаті фракційної перегонки нафти і наступного очищення першої масляної фракції шляхом послідовної обробки сірчаною кислотою, лугом, водою, адсорбентами і висушування. Чим глибше очищення оливи, тим світліший колір вона має – від темно-жовтого до майже безбарвного.

В залежності від родовища нафтові оливи складаються із суміші різних вуглеводнів парафінового (метанового), нафтенового та ароматичного рядів, для покращення експлуатаційних властивостей до них додається до 1% присадок, що підвищують їх стійкість до теплового та електричного старіння під дією часткових розрядів.

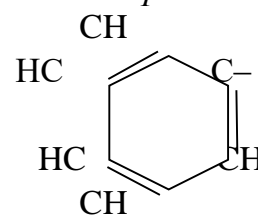
парафінові



нафтенові



ароматичні



Парафінові оливи мають добру хімічну стабільність (мало окиснюються), є насиченими сполуками, вміст нафтенових оливи в нафтових – до 85%, а ароматичних, наявність яких знижує окиснюваність нафтових оливи, до 15%.

За характером використання нафтові мінеральні оливи поділяють на такі:

- оливи для високовольтних трансформаторів і вимикачів;
- кабельні оливи;
- конденсаторні оливи.

10.3.2 Мінеральні трансформаторна, кабельна та конденсаторна оливи

Нафтова трансформаторна олива, що є неполярною речовиною, до заливання в електрообладнання має такі технічні показники.

Густина трансформаторної оливи 0,850...0,900 кг/м³ при 20 °С (не нормується, зростає зі вмістом ароматичних вуглеводнів), температурний коефіцієнт густини 0,00065 К⁻¹.

Кінематична в'язкість, маючи мале значення, сприяє конвективному відведенню теплоти від обмоток і магнітопроводу трансформатора, а також

гасінню дуги у високовольтних вимикачах. Вона становить 17 – 18,5 мм²/с при 20 °С і 6,5 – 6,7 мм²/с при 50 °С.

Температура спалаху визначає пожежонебезпечність трансформаторної оливи і становить 135 – 150 °С для сухої свіжої оливи. При експлуатації вона не повинна знижуватись більш, ніж на 5 °С від початкового значення, і залишатися на рівні не нижче 135 °С.

Температура застигання трансформаторної оливи важлива при роботі обладнання в районах з низькою температурою взимку. Для звичайних марок вона становить –45 °С. Для арктичних марок Тап, Т-750, АГК і МВ – мінус 50, 55, 60 і 70 °С відповідно.

Теплопровідність трансформаторної оливи складає 1 Вт/м·К, що в 25...30 раз більше, ніж для повітря (при вільній конвекції), теплоємність 1,5 Дж/кг·К.

Вологовміст (%), г/т) у свіжій оливі допускається до 0,001% для трансформаторів з плівковим або азотним захистом і 0,002% – без спеціального захисту.

Кислотність. Кислотне число свіжої оливи повинно бути не більше 0,02 мг КОН / 1г оливи для обладнання на напруги до 500 кВ включно і 0,01 мг КОН / 1г оливи на вищі напруги. Для масла, що знаходиться в експлуатації кислотне число не повинне перевищувати граничне допустиме значення 0,25 мг КОН/1г оливи, при його досягненні олива регенерується (див. нижче).

Механічні домішки. Речовини у вигляді осаду або в завислому стані в трансформаторній оливі візуально повинні бути відсутніми при робочій напрузі обладнання до 750 кВ включно.

Діелектрична проникність трансформаторної оливи дорівнює 2,2...2,3. З ростом температури вона повільно зменшується внаслідок розширення оливи.

Питомий об'ємний опір знаходиться в межах 10¹⁰...10¹³ Ом·м. В експлуатації трансформаторна олива вважається непридатною при питомому опорі менше 2·10¹⁰ Ом·м.

Тангенс кута діелектричних втрат для свіжої оливи при температурі 90°С $tg\delta \leq 0,022$ для обладнання на робочу напругу до 500 кВ включно, на 750 кВ – 0,005. В експлуатації гранично допустимі значення $tg\delta$ 0,026 і 0,007 відповідно.

Електрична міцність трансформаторної оливи визначається в стандартному оливному розряднику з відстанню між електродами 2,5 мм. Вимоги до її пробивної напруги в стандартному оливному розряднику в залежності від робочої напруги електрообладнання наведені в табл. 11.2 (перше значення – пробивна напруга оливи до заливання в обладнання, в дужках – після заливання).

Таблиця 10.2

Робоча напруга обладнання, кВ	До 15	15	35 – 150	220 – 500	750 – 1150
U _{пр} оливи в стандартному розряднику	30 (25)	35 (30)	60 (55)	70 (65)	70

Старіння оливи. Методи очищення та регенерації

В процесі експлуатації трансформаторна олива старіє, тобто поступово втрачає свої експлуатаційні властивості, що може привести до відмови оливних трансформаторів чи апаратів. Старіння оливи багатофакторний процес. Це перш за все процеси теплового старіння, внаслідок якого олива окиснюється, зростає її кислотне число, в'язкість, температура застигання, $tg\delta$, утворюються перекисні зв'язки, що роблять можливим полімеризацію оливи з утворенням колоїдних частинок і твердої фази – шламу, що осідаючи на обмотках і стінках бака зменшує відведення тепла, знижується температура спалаху, а також внаслідок спотворення поля колоїдними частинками і шламом зменшується електрична міцність, можуть утворюватися вода і гази, що слабо впливають на характеристики оливи поки знаходяться в розчиненому стані і різко знижують її характеристики, коли виділяються в окрему дисперсну фазу. Підвищення температури на 10 °C пришвидшує старіння в залежності від марки оливи в 2 – 4,5 рази. При цьому варто пам'ятати, що прямий контакт оливи з міддю небажаний, бо мідь виступає у ролі каталізатора окислення. Таку ж роль можуть відігравати солі органічних кислот і металів змінної валентності (Fe, Co та інші), розчинені в оливі.

Другим фактором старіння є зовнішнє середовище, що містить кисень і вологу і сприяє тепловому старінню і зволоженню оливи. Для захисту від дії зовнішнього середовища використовують азотний або плівковий захист оливи.

Третій фактор – електричне поле і часткові розряди, які зумовлюють розкладання трансформаторної оливи з виділенням води і газоподібних продуктів, в зв'язку з чим введена така характеристика оливи як газостійкість. Газостійкість зростає з вмістом ароматичних вуглеводнів, однак вони знижують вологостійкість, а тому їх концентрація повинна бути оптимальною.

Для захисту від старіння трансформаторної оливи використовують присадку іонолу, не менше ніж 0,2 мас.%. Враховуючи, що іонол є захистом типу "жертва", тобто витрачається в процесі захисту, реагуючи з киснем, доводиться контролювати його витрати і поповнювати його кількість, коли вона стає менше 0,1 мас.%.

При старінні масло стає більш темним за рахунок продуктів хімічних реакцій, збільшується його в'язкість.

Однією з переваг нафтових олив є можливість відновлення їх електрофізичних і інших характеристик. Для цього проводять періодичний контроль технічного стану оливи шляхом визначення пробивної напруги у стандартному оливному розряднику, однак в силових трансформаторах потужністю до 63 кВА напругою 10 кВ масло не випробовують, а замінюють за бракувальними показниками, що контролюються в процесі експлуатації, та за результатами профілактичних випробувань ізоляції.

Для безперервної регенерації ізоляційної оливи служить *термосифонний фільтр*, що застосовується на трансформаторах з потужністю не менше 100 кВА, а також в сільських електромережах (друга назва –поглинальні патрони).

Для трансформаторів, що не мають термосифонних фільтрів, масло випробовують не рідше одного разу на рік; в інших випадках масло береться на аналіз під час капітального та поточного ремонтів. При випробуваннях трансформаторної оливи визначають діюче значення пробивної напруги при частоті

50 Гц, $tg\delta$ і інші характеристики. Трансформаторну оливу, один з бракувальних параметрів якої вийшов за допустимі межі, піддають відновленню за одним з трьох способів.

Способи очищення:

1. Відстій здійснюється в сухому опалюваному приміщенні з чистим повітрям для зменшення концентрації колоїдних частинок та шламу.

2. Центрифугування. Центрифуга відокремлює воду та домішки тільки в теплій оливі (+45...+55 °С). При +70 °С починається пароутворення води та інтенсивне старіння масла.

3. Фільтрування. Проводиться при температурі +20 °С. При більшій температурі падає гігроскопічність фільтруючого картону. Фільтрування використовується після центрифугування. Застосування у фільтрпресах силікагелю або відбілюючих глин також різко зменшує кислотність масла.

Способи сушіння.

Найдосконаліший спосіб сушіння – *розпилення* при температурі 60...70 °С в бак, в якому підтримується вакуум 60...100 мм рт.ст. Можна сушити оливу в *атмосфері азоту* при вакуумі 150...180 мм рт.ст.

При необхідності трансформаторну оливу сушать у власному баку трансформатора *нагріванням* до температури 70...80 °С струмами нульової послідовності або за рахунок втрат у трансформаторі.

Регенерація.

Найбільш повне відновлення показників якості оливи здійснюється *регенерацією* (глибоким очищенням). Розрізняють такі види регенерації:

Адсорбентна: нагріту до температури 80...90 °С оливу перемішують з адсорбентом, потім проводять відстій, фільтрування. Цей спосіб називають *контактним*.

Перколяційна: при цьому способі нагріту оливу (80...100 °С) пропускають через товстий шар адсорбенту (аморфне вугілля, силікагель, відбілюючі глини, активованій окис алюмінію).

Нафтова конденсаторна олива, більш ретельно очищена і дегазована, служить для просочування паперових конденсаторів, що дозволяє збільшити електричну міцність паперу, його відносну діелектричну проникність, а значить збільшити питому ємність паперових конденсаторів. У просоченого конденсаторною оливою паперу зараз практично немає конкурентів у якості ізоляції силових конденсаторів. Її характеристики дещо кращі, ніж трансформаторної: $\epsilon = 2,1...2,3$; $tg\delta = 0,002$ (при температурі 20 °С і частоті 1кГц); $t_{застиз} = -45$ °С, пробивна напруга в стандартному оливному розряднику більше 50 кВ.

Вазелінова олива має характеристики, близькі до характеристик нафтової оливи, але з температурою застигання – 5 °С Її інколи використовують для просочення паперових конденсаторів, що працюють в опалюваних приміщеннях.

Хлоровані продукти дифенілу, такі як совол і совтол з $\epsilon = 5$, що використовувалися для просочення паперових конденсаторів з підвищенням ємності на 50%, виявилися канцерогенними речовинами, зараз заборонені і не

використовуються в електротехніці, хоча конденсатори з ними досі знаходяться в експлуатації.

Нафтова кабельна олива ще до недавнього була одним з основних компонентів ізоляції високовольтних силових кабелів, але зараз витісняється зшитим поліетиленом. Вона відрізняється від попередніх більшою в'язкістю, яку забезпечує додавання каніфолі або синтетичного загущувача. Нафтова кабельна олива повинна мати U_{np} не менше 50 кВ, $tg \delta$ при 100 °С не більше 0,003, температуру спалаху не нижче 200 °С і температуру застигання не вище 30 °С.

Для просочення паперової ізоляції силових кабелів напругою до 35 кВ використовують кабельну оливу з кінематичною в'язкістю при 20 °С не більше 37 мм²/с (<9,6 мм²/с при 50 °С), а для оливонаповнених кабелів високого тиску (до 1 МПа) напругою від 110 до 500 кВ – не більше 800 мм²/с при 20 °С і не більше 50 мм²/с при 50 °С.

10.3.3 Синтетичні рідини, характеристики та застосування

У тих випадках, коли потрібна висока пожежонебезпечність, використовують синтетичні діелектрики – кремнійорганічні, фторорганічні та вуглеводневі.

Кремнійорганічні рідини, що належать до елементоорганічних речовин, в основному молекулярному ланцюзі мають послідовно з'єднані атоми кремнію і кисню (силоксановий зв'язок). В залежності від радикалу (бокової групи), що приєднаний до атому кремнію розрізняють поліметилсилоксанові (ПМС, група – CH₃), поліетилсилоксанові (ПЕС, група – C₂H₅) і поліметилфенілсилоксанові (ПМФС, групи –CH₃ і –C₆H₅) кремнійорганічні рідини.

За рахунок високої енергії зв'язку кремній–кисень (374 кДж/моль) кремнійорганічні рідини можуть працювати до температур 250 °С. Вони мають порівняно високий питомий опір $\rho = 10^{12}$ Ом·м, малий $tg \delta = 0,0001...0,0003$, практично неполярні – при частоті 1 кГц $\varepsilon = 2,5...3,3$, низьку гігроскопічність, малу залежність в'язкості від температури, але одночасно не дуже високу електричну міцність $E_{np} = 14 - 18$ кВ/мм. Через високу вартість використовують їх обмежено для просочення конденсаторів, що призначені працювати при підвищених температурах, і поляризації п'єзоелектриків.

Торгова марка, під якою випускаються кремнійорганічні рідини – "калорія". До недоліків, крім високої вартості, що в десятки – сотні раз вища, ніж вартість нафтових оливок, можна віднести легку займистість кремнійорганічних рідин.

Фторорганічні рідини відносяться до карбонланцюгових сполук з фтором у бокових відгалуженнях. Вони неполярні $\varepsilon = 2,2...2,5$, мають малий $tg \delta = 0,0001 - 0,0002$, питомий опір $\rho = 10^{12} - 10^{14}$ Ом·м, електричну міцність $E_{np} = 12 - 19$ кВ/мм, гранично малу гігроскопічність, високу нагрівостійкість (до 300 °С), малу в'язкість, повну негорючість, високу дугостійкість, але також високу (в тисячу раз дорожчі за нафтові оливи) вартість. При використанні фторорганічних рідин необхідно враховувати також їх дію на гуму і взаємодію з міддю і окисом заліза, що приводить до їхнього забруднення і знижує характеристики.

Синтетичні рідини вуглеводневого складу, наприклад поліізобутилен з низьким ступенем (10 – 20) полімеризації, що мають кращі електрофізичні характеристики, підвищену стійкість до теплового старіння і газостійкість, ніж нафтові оливи, починають все ширше використовуватися для просочування паперових конденсаторів.

10.4 ТВЕРДІ ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

Всі тверді діелектрики мають над газоподібними та рідинними ту перевагу, що поряд з електричним навантаженням вони можуть витримувати і механічні напруження, тобто виконувати паралельно роль конструкційних матеріалів, що суттєво спрощує виконання електроізоляційного обладнання. З іншого боку їм притаманний і дуже серйозний недолік – повна втрата електричної міцності при електричному пробі, в той час як газоподібні та рідкі діелектрики дуже швидко відновлюють її. Внаслідок цього потрібно при використанні твердих діелектриків дуже відповідально відноситися до вибору робочої напруги і напруженості поля.

Тверді діелектричні матеріали можна розділити на три великі групи:

- органічні;
- неорганічні;
- композиційні.

Органічні тверді діелектрики перш за все є ковалентними неполярними або слабополярними вуглеводневими ланцюжковими, розгалуженими або кільчастими сполуками. До їх складу можуть входити атоми водню –H, вуглеводневі групи –CH₃, –C₂H₅, бензольні кільця –C₆H₅ та їх похідні, п'яти- і шестичленні кільця –C₅H₉, –C₆H₁₁, а також атоми хлору, фтору, кисню, азоту, фосфору тощо. Низькомолекулярні органічні речовини, що мають в молекулі від 2 до 50 атомів вуглецю і можуть перебувати в газоподібному, рідинному та твердому стані, називаються мономерами. Рідкі та тверді органічні речовини, молекули яких мають у своєму складі десь до 1000 атомів вуглецю і для яких, коли вони знаходяться у твердому стані, характерна тільки пружна деформація, яка зникає при знятті навантаження, називаються олігомерами. Якщо молекули органічних речовин складаються з більшої кількості атомів вуглецю (до 10⁶) і для них має місце крім пружної ще й пластична (залишкова) деформація – це полімери. Більшість полімерних діелектриків відносяться до штучно синтезованих сполук.

В залежності від складу і структури органічні діелектрики можна поділити на воскоподібні, електроізоляційні смоли і бітуми, лаки і емалі, полімери, еластомери, пластмаси.

Крім органічних полімерних діелектриків як діелектрики використовують чисто синтетичні елементоорганічні, наприклад кремнійорганічні, і неорганічні сполуки.

До неорганічних діелектриків відносяться окисли і системи окислів металів та металоїдів з полярним ковалентним або іонним зв'язком. Вони можуть бути в кристалічному (слюда) і аморфному (стекла) стані, а також представляти собою багатofазний матеріал – кераміку. За стійкістю до дії більшості зовнішніх факторів

неорганічні діелектрики переважають органічні, але вони крихкі і технологія виготовлення ізоляції з них більш складна.

Композиційні діелектрики складаються з кількох речовин, що зберігають свої властивості, але в сумі дають проміжний варіант. Часто в композитах для склеювання компонентів використовують смоли, полімери і скло.

10.4.1 Органічні діелектричні матеріали

Воскоподібні діелектрики

До воскоподібних діелектриків відносяться органічні кристалічні речовини, молекули яких включають кілька десятків атомів вуглецю. Вони легкоплавкі, мають добрі електричні властивості, високу вологостійкість, але низькі механічні параметри. При переході з рідкого стану в твердий дають велику усадку (до 15...20%), тому більша частина об'єму залишається у вигляді порожнин, заповнених повітрям, що приводить при високій напрузі до виникнення часткових розрядів та зниження електричної міцності матеріалу. До особливостей більшості восків відноситься нездатність до плівкоутворення.

Воскоподібні діелектрики мають обмежене застосування в електроізоляційній техніці, зокрема при виготовленні конденсаторів постійної напруги до 1000 В і змінної до 300 В, а також у кабельному виробництві. У високовольтній техніці вони витісняються рідкими на напіврідкими просочувальними оливами.

Віск буває *природний* та *штучний*.

Озокерит (гірський віск). Природна копалина з нафтовим запахом схожа на бджолиний віск. З початку XIX століття широко застосовується в медицині і його запаси в даний час у світі практично вичерпані. Озокерит є сумішшю твердих вуглеводнів парафінового ряду з деяким вмістом смолистих речовин, а тому може мати до десятка модифікацій в залежності від родовища. Розчиняється в бензолі, толуолі, хлороформі, сірковуглеці, змішується з лаками, смолами та воском. В електротехніці застосовувався для просочування бавовняно – паперових обплетень проводів та кабелів. Електричні властивості: $\rho = 10^{14}$ Ом·м; $\text{tg} \delta = 0,01$; $E_{np} = \geq 25$ кВ/мм; $\varepsilon = 2,7...2,8$. Зараз витіснений парафіном.

Парафін (неполярний діелектрик). Отримують з дистилляту парафінистої нафти шляхом нагрівання та виморожування. Трохи жирний на дотик. На зламі має кристалічну структуру. Розчиняється в бензолі, бензині, мінеральних маслах, але в спирті та у воді не розчиняється. Практично не гігроскопічний. При нормальній температурі має високу хімічну стабільність, але при 130...140 °С в повітрі легко окислюється (опір знижується в 100 і більше раз). Не утворює плівки, тому не придатний для виготовлення лаків.

Застосовують для просочування паперових конденсаторів низької напруги, дерев'яних деталей, електрокартонів. Просочують методом проварювання або під вакуумом. Для кабелів, з метою захисту від гниття,

використовують в суміші з озокеритом. Електричні та фізико-хімічні властивості: $\rho = 10^{15}$ Ом·м; $\text{tg}\delta = (3...7)10^{-4}$; $E_{np} = 20...30$ кВ/мм; $\varepsilon = 1,9...2,2$; $d = 0,85...0,92$ г/см³; $t_{плав} = 49...54$ °С.

Церезин. Суміш твердих вуглеводнів метанового ряду. Від парафінів відрізняється сильно розвинутими ланцюжками вуглецевих атомів. Розрізняють:

– озокеритовий – продукт очистки озокериту. Електричні властивості: $\rho = 10^{15}$ Ом·м; $\text{tg}\delta = (7...8)10^{-4}$; $E_{np} = 15...20$ кВ/мм; $\varepsilon = 2,1...2,3$; $d = 0,88...0,92$ г/см³; усадка 5...7%; $t_{плав} = 57...80$ °С;

– синтетичний – продукт, що отримують при виробництві синтетичного бензину. Електричні властивості: $\rho = 10^{13}$ Ом·м; $\text{tg}\delta = (5...9)10^{-4}$; $E_{np} = 14...18$ кВ/мм; $\varepsilon = 2,3...2,5$; $d = 0,89...0,9$ г/см³; усадка 5...7%; $t_{плав} = 95...103$ °С;

Церезин, завдяки дрібнокристалічній структурі, утворює з олівами стійкі нероздільні суміші, утворює тонку плівку, що не тріскається. Застосовується для просочування металопаперових конденсаторів, волокнистої ізоляції кабелів зв'язку. Надає гумі стійкості до сонячного світла.

Галовакс. Синтетичний полярний діелектрик, що синтезується шляхом хлорування нафталіну (C₁₀H₈), для чого через розплав нафталіну в присутності хлорного заліза (каталізатор) пропускають хлор.

Розчиняється в бензині, не розчиняється в спирті та воді. Дає можливість на 20...25% збільшити ємність паперових конденсаторів. Електричні властивості: $\rho = 10^{14}$ Ом·м; $\text{tg}\delta = 0,03$; $E_{np} = 8...10$ кВ/мм; $\varepsilon = 4,5...5,5$; $d = 1,55...1,7$ г/см³; кислотне число 0,02 мг КОН/г; $t_{плав} = 110...130$ °С;

Недолік: токсичність, особливо в розігрітому стані.

Вазелін. Суміш твердих і рідких вуглеводнів, подібних до парафіну, що отримані із нафти. При нормальній температурі – напіврідка маса. Застосовується для просочування паперових конденсаторів. Електричні властивості: $\rho = 5 \cdot 10^{12}$ Ом·м при $t = 20$ °С, $5 \cdot 10^9$ Ом·м при $t = 100$ °С.; $\text{tg}\delta = 0,002$ при $t = 20$ °С; $E_{np} = 20$ кВ/мм, $t_{плав} = 27 - 60$ °С.

Характеристики восків наведені в таблиці 10.3.

Таблиця 10.3

Характеристика	Діелектрик					
	Озокерит	Парафін	Церезин		Галовакс	Вазелін
			озокеритовий	синтетичний		
ρ , Ом·м (20°С)	10^{14}	10^{15}	10^{15}	10^{13}	10^{14}	$5 \cdot 10^{12}$
ε_r	2,7–2,8	1,9–2,2	2,1 – 2,3	2,3 – 2,5	4,5 – 5,5	
$\text{tg}\delta$ (20°С)	0,01	$(3-7) \cdot 10^{-4}$	$(7-8) \cdot 10^{-4}$	$(5-9) \cdot 10^{-4}$	0,03	0,02
E_{np} , кВ/мм	25	20–30	15 – 20	14 – 18	8 – 10	20
$t_{пл}$, °С		49–54	57 – 80	95 – 103	110 – 130	27 – 60
d , г/см ³		0,85–0,9	0,88–0,92	0,89 – 0,9	1,55 – 1,7	
КЧ, мг КОН/г					0,02	
Усадка при твердінні, %			5 – 7	5 – 7		

10.4.2 Електроізоляційні смоли

Речовини органічного походження, що мають аморфну будову. Вони поділяються:

- за походженням: на природні та синтетичні;
- за властивостями на термопластичні (при нагріванні та наступному охолодженні властивості їх не змінюються і вони зберігають плавкість і розчинність в тих чи інших розчинах) та термореактивні (при нагріванні до досить високої температури протягом тривалого часу, вони втрачають властивість плавкості та розчинності).

Природні смоли:

Каніфоль. Одержують термічною обробкою смол хвойних дерев після відгонки води та скипидару. Аморфна речовина від світло-лимонного до темно-помаранчового кольору (чим темніше, тим більше домішок, тим гірші електричні властивості). Розчинна в спирті, ацетоні, скипидарі, бензині, нафтових і рослинних оливах, але нерозчинна у воді. Застосовують для просочування паперової ізоляції кабелів, у виробництві лаків, масло-каніфольних компаундів. Каніфоль, що при температурі 150 °С і вище добре розчиняє окисли міді, використовують як флюс для паяння міді та її сплавів. Електричні властивості: $\rho=10^{13}$ Ом·м; $\operatorname{tg}\delta=0,05$; $E_{np}=10\ldots12$ кВ/мм; $\varepsilon=2,7\ldots3,5$; $d=1,09$ г/см³; $t_{плав}=50\ldots70$ °С;

Шелак. Одержують при очищенні гумілаку, що виділяють комахи на гілках тропічних дерев. Розчиняється в етиловому спирті. Застосовується як просочувальний матеріал у виробництві слюдяних виробів. Використання в електротехніці на сьогодні обмежене. Електричні властивості: $\rho=10^{14}$ Ом·м; $\operatorname{tg}\delta=0,008\text{--}0,01$; $E_{np}=20\ldots30$ кВ/мм; $\varepsilon=3,5$; $d=1,04$ г/см³; $t_{плав}=100\ldots120$ °С;

Бурштин. Тугоплавкі смоли, вкопні продукти дерев-смолоносців. Розчинні тільки у розплавленому вигляді, питомий об'ємний опір бурштину $10^{15}\text{--}10^{17}$ Ом·м, питомий поверхневий – 10^{17} Ом. Через високу вартість застосовують обмежено для введів в електровимірювальних пристроях, а також як додаток до олійних лаків.

Термореактивні і термопластичні синтетичні смоли.

В термореактивних полімерах, як вже згадувалося, при першому нагріванні в присутності речовини-отверджувача утворюються поперечні зв'язки і весь об'єм матеріалу перетворюється в одну молекулу. В деяких смолах процес зшивання може проходити також за рахунок реакції власних бокових груп. Таке зшивання молекулярних ланцюгів при підвищеній температурі називається гарячим твердінням. В той же час є смоли які можуть зшиватися при кімнатній температурі, тобто для них характерне холодне твердіння.

Як правило, всі термореактивні синтетичні смоли полярні. Для надання термопластам певних властивостей в них вводять спеціальні добавки, такі як стабілізатори, пластифікатори, наповнювачі, пігменти.

Фенолоформальдегідні смоли – продукт поліконденсації (реакції утворення з виділенням побічного продукту – води) фенолу C_6H_5OH і формальдегіду

(мурашиного альдегіду) $\text{C}_6\text{H}_4\text{CHO}$ з молекулярною масою 1500 – 2000. Утворення полімеру з олігомеру відбувається в процесі виготовлення виробу. Застосовують фенолоформальдегідні смоли при виробництві прес-порошків, волокнітів, шаруватих пластмас, компаундів, клеїв і лаків. Вироби з них відзначаються механічною міцністю, теплостійкістю, водо- і кислотостійкістю, а клеї хорошою адгезією до металів, скла, деревини тощо.

В залежності від режиму і каталізаторів фенолоформальдегідні олігомери можуть давати на виході *терморективні резольні (бакелітові)* при наявності не менше 1 моля формальдегіду на 1 моль фенолу і лужному каталізаторі (аміак, оксид барію та амонію) або *термопластичні новолачні*, якщо фенол брати у надлишку і застосувати кислотний каталізатор (HCl), смоли.

Електричні властивості *резольної смоли (бакеліту)*: $\rho = 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\text{tg}\delta = 0,025 - 0,05$; $E_{\text{пр}} = 10 \dots 16 \text{ кВ/мм}$; $\varepsilon = 4,5 \dots 6,0$;

Резольні смоли застосовують як додаток при виробництві пластмас і бакелітових лаків. Не рекомендується використовувати резольні смоли в електричних апаратах, тому що вони легко обвуглюються і утворюють на поверхні ізоляції струмопровідні містки при дії поверхневих розрядів.

Новолачні смоли мають діелектричні властивості нижчі від резольних через наявність залишків кислотного каталізатору. Застосовують для виробництва пластмасових виробів в низьковольтній апаратурі. Електричні властивості: $\rho = 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\text{tg}\delta = 0,05 - 0,1$; $E_{\text{пр}} = 10 \dots 12 \text{ кВ/мм}$; $\varepsilon = 4,5 \dots 6,0$.

Крезолоформальдегідні смоли, що менш полярні, ніж бакелітові і новолачні, внаслідок наявності вуглеводневої бокової групи, отримують аналогічно фенолоформальдегідним, але замість фенолу як вихідну речовину беруть крезол $\text{C}_6\text{H}_3\text{OH}$.

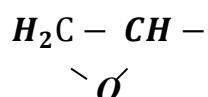
Аніліноформальдегідні смоли – продукт конденсації аніліну $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$ і формальдегіду ще менш полярні ніж феноло- і крезолоформальдегідні смоли внаслідок меншої полярності групи – NH_2 в порівнянні з групою –OH, більш оливо- і дугостійкі. В результаті для аніліноформальдегідних смол $\text{tg}\delta = 0,004$ при частоті 1 МГц, питомий опір $\rho = 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ і водопоглинання 0,01 – 0,08% за 24 години. До недоліків аніліноформальдегідних смол відносяться низька нагрівостійкість (90 °С) і труднощі з переробкою у вироби.

Гліфталеві смоли (поліефірні) – результат реакції поліконденсації гліцерину $\text{HOCH}_2\text{—CH(OH)—CH}_2\text{OH}$ та фталевого ангідриду $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2\text{O}$ при температурі 220 °С. Використовуються з сикативами або лляною оливою як основа лаків для виробництва шлюдяної ізоляції. Електричні властивості: $\rho = 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\text{tg}\delta = 0,003 \dots 0,03$; $E_{\text{пр}} = 15 \dots 20 \text{ кВ/мм}$; $\varepsilon = 4 \dots 7$; $d = 1,38 \text{ г/см}^3$; кислотне число 12 мг KOH/г смоли.

Пентафталеві смоли – продукт конденсації пентаерітриту $\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_4$ з фталевим ангідридом. Можна модифікувати не тільки висихаючими, а і напів- і невисихаючими оливами, що надають лакам і емалям на основі пентафталевих смол високу еластичність.

Полівінілацеталеві смоли. Полярні діелектрики, результат реакції поліконденсації полівінілового спирту з альдегідами (формальдегідом) в присутності сірчаної або соляної кислоти. Використовують для виробництва емальлаків для обмотувальних проводів. Електричні властивості: $\rho=10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\text{tg}\delta=0,008\dots0,01$; $E_{np}=80\dots100 \text{ кВ/мм}$; $\epsilon=3,4\dots3,8$.

Діанові епоксидні смоли одержують шляхом поліконденсації епіхлоргідрину з диоксидифенілпропаном у присутності луку. Характерною ознакою епоксидних смол є наявність в матеріалі епоксидних груп



До діанових епоксидних смол відносяться смоли марок від ЕД-24 (рідина з невисокою в'язкістю і молекулярною масою 350 – 400) до ЕД-4 (тверда речовина з молекулярною масою $(15-70)\cdot 10^3$). Застосовуються як основа заливальних компаундів з додаванням затверджувачів гарячого (ангідриди малеїнової та фталевої кислот) та холодного (гексаметиленамін, діетилентриамін, поліетиленполіамін тощо) твердіння. Об'ємна усадка при твердінні епоксидних смол сягає 0,5...1,5%. Електричні властивості: $\rho=10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\text{tg}\delta = 0,001\dots0,004$; $E_{np}=16\dots28 \text{ кВ/мм}$; $\epsilon = 3,5\dots3,9$; $d=1,2 \text{ г/см}^3$; працюють при температурі від -60 до $+130 \text{ }^\circ\text{C}$.

Епоксидні смоли використовуються як електроізоляційні та герметизуючі матеріали, для виготовлення клеїв, лаків і компаундів з високою механічною міцністю, хімічною стійкістю і стійкістю до дії зовнішнього середовища. Слід мати на увазі, що епоксидні смоли з отверджувачами можуть викликати шкірні захворювання. В затверділому стані вони втрачають токсичність.

Крім діанових інколи використовують циклоаліфатичні епоксидні смоли, які мають кращі характеристики, особливо стійкість до часткових розрядів. Але циклоаліфатичні смоли на порядок дорожчі діанових.

Ефіри целюлози відносяться до термопластичних синтетичних матеріалів. Сама молекула целюлози містить три гідроксильні групи, а тому є дуже полярним і гігроскопічним діелектриком.

В простих ефірах целюлози атоми водню в гідроксильних групах заміщуються вуглеводневими залишками, наприклад, в *етилцелюлозі* на етильну групу $-\text{C}_2\text{H}_5$. Етилцелюлоза має високі електроізоляційні властивості і хорошу холодостійкість (зберігає гнучкість до $-50 \text{ }^\circ\text{C}$).

Складні ефіри целюлози містять кислотні залишки: нітроцелюлоза – залишки азотної кислоти $-\text{NO}_2$, ацетилцелюлоза – залишки оцтової кислоти $-\text{CO}-\text{CH}_3$. Нітроцелюлоза сильно горюча і може бути навіть вибухонебезпечною. Завдяки заміні сильно полярних гідроксильних груп на менш полярні кислотні залишки ефіри целюлози мають кращі електроізоляційні властивості і меншу гігроскопічність, ніж целюлоза. Їх недоліком є низька нагрівостійкість.

Бітуми

Група слабо полярних аморфних діелектриків з суміші вуглеводів з домішками. Розрізняють:

– природні бітуми (асфальти), з яких застосовують *печерський* та *садкинський* бітуми для виготовлення електроізоляційних покривних лаків ($t_{розм} = 150...220\text{ }^{\circ}\text{C}$);

– штучні (нафтові), що є важкими продуктами перегонки нафти. Застосовують для виготовлення просочувальних лаків.

Електричні властивості: $\rho = 10^{13} - 10^{14}\text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\text{tg}\delta = 0,008...0,2$; $E_{пр} = 10...25\text{ кВ/мм}$; $\varepsilon = 2,2...3,0$;

10.4.3 Електроізоляційні лаки і емалі

Лаки виготовляються на основі органічних розчинів смол, бітумів та висихаючих рослинних олів, що є плівкоутворюючими речовинами, які після звітрювання розчинників і хімічних реакцій утворюють еластичну плівку. Для досягнення більшої еластичності плівки в лак додають *пластифікатори*, для прискорення сушіння – *сикативи* (каталізатори хімічних процесів твердіння). Для розбавлення лаків, що загустіли, вводять *розчинники*, що відрізняються від первісних *розчинників* більш повільним випаровуванням. Зверніть увагу, що лаки використовують у рідкому стані, а експлуатують у твердому, тобто при використанні агрегатний стан матеріалу змінюється.

Лаки поділяються на групи за такими критеріями:

1. За призначенням:

- просочувальні;
- покривні;
- клеючі;
- спеціальні (для емалювання обмоточних проводів).

Це не строгий поділ, так як один і той же лак може використовуватись як просочувальний і покривний, або як покривний і клеючий.

2. За складом:

- олійні;
- олійно-бітумні;
- смоляні;
- кремнійорганічні та ін.

3. За способом сушіння:

– холодного (повітряного) – утворення плівки при кімнатній температурі (шелачні, ефір целюлозні). Застосовуються при ремонтних роботах;

– гарячого (пічного) – процес проходить при температурі від 70°C і вище. В цих лаках застосовують термореактивні плівкоутворюючі речовини (гліфталеві, резольні та інші смоли), тому вони вимагають умов для полімеризації. У них вищі механічні та електричні характеристики ніж у лаків холодного сушіння.

Просочувальні лаки – для просочування пористої та волокнистої ізоляції (паперу, картону, тканини, ізоляції обмоток електроапаратів і електромашин). Після просочування пори заповнюються лаком, а не повітрям, що збільшує електричну

міцність, нагрівостійкість, вологостійкість та теплопровідність ізоляції, а також емність паперових конденсаторів.

Вимоги для просочувальних лаків:

- добра просочувальна здатність (визначається за кількістю просочених шарів батисту за 15 хвилин);
- відсутність шкідливого впливу на ізоляцію провідникових матеріалів;
- високі електроізоляційні властивості;
- добра вологостійкість, хімічна стійкість, нагрівостійкість;
- достатня механічна міцність;
- додаткові вимоги щодо розчинників, олив, стійкості до мікроорганізмів.

До просочувальних лаків відносяться кремнійорганічні (КО-921, КО-910), оливно-бітумні (БТ-980, БТ-987), оливно-гліфталеві (ГФ-95). Букви визначають основу лаку, перша цифра 9 говорить про те, що лак електроізоляційний, інші цифри – порядковий номер лаку у групі.

Покривні лаки служать для утворення механічно міцної, гладкої, блискучої, вологостійкої плівки на поверхні твердої (або попередньо просоченої пористої) ізоляції. Вони підвищують поверхневий опір ізоляції, захищають її від вологи, хімічних речовин. Повинні мати високу липкість – *адгезію*.

До покривних відносять кремнійорганічні лаки (КО-928, КО-938В тощо), поліуретановий (УЛ-1), оливний (масляний) (МЛ-1) поліамідний (АД-9113), поліімідний (ПАК-1) лаки, а також емаль-лак на полівінілацеталевій основі (ВЛ-941).

Клеючі лаки застосовують для склеювання між собою твердих електроізоляційних матеріалів або для приклеювання їх до металу, а також при виробництві міканітів (електроізоляційний матеріал на основі слюди). Вони повинні мати добру адгезію, не розм'якшуватись при робочій температурі, бути вологостійкими та мати високі електроізоляційні властивості.

До клеючих лаків відносяться клеї на основі фенолоформальдегідної смоли (БФ-2, БФ-4 і БФ-6), поліуретановий клей (ПУ-2), епоксидний гарячого (ЕП, ЕПР) і холодного (ВР) твердіння, епоксидно-кремнійорганічний холодного твердіння (КО-400) тощо.

Основа лаку – смоляна, оливна, бітумна, оливно-смоляна, оливно-бітумна, ефіроцелюлозна тощо – визначає його електроізоляційні і інші властивості. В залежності від сукупностей властивостей лаки використовують для тих чи інших потреб. Розглянемо більш детально процеси твердіння та використання лаків в залежності від їх основи.

Смоляні лаки фактично є колоїдними розчинами природних або синтетичних смол. Твердіння смоляного лаку полягає у випаровуванні розчинника і формуванні лакової плівки. Основні типи смоляних лаків наступні:

- бакелітові – розчин бакеліту в спирті використовують як просочувальні та клеючі лаки. Застосовують при виробництві гетинаксу, текстоліту, ізоляції для високовольтної апаратури. Схильні до теплового старіння;

– гліфталеві – розчин гліфталевих смол в спирті та рідких вуглеводах. Терморективні. Використовують для клеєння міканітів. Вологостійкість нижча ніж у бакелітових;

– кремнійорганічні – вимагають гарячого сушіння, утворюють нагрівом – та вологостійкі плівки;

– полівінілхлоридні – стійкі до дії бензину, масла та хімічно активних речовин.

Бітумні лаки холодного сушіння є просто розчином *бітумів* в органічних розчинниках. Вони дешевші і менш гігроскопічні в порівнянні з оливними лаками, але менш еластичні, розм'якшуються при нагріванні, легкорозчинні, а тому не придатні як електроізоляційний матеріал. Їх використовують як антикорозійні засоби.

Ефіроцелюлозні лаки холодного сушіння це розчини ефірів целюлози, з яких найбільше значення має розчин нітроцелюлози в ацетоні чи етилацетаті – нітроцелюлозний лак, який дає при наявності пластифікаторів (рицинова олія, дибутилфталат) механічно міцні, вологостійкі, з поганою адгезією до металу плівки. Застосовуються для захисту гумової ізоляції від озону, масел, бензину.

Олійні лаки мають основою висихаючі олії – лляну, тунгову. Висихання олійних лаків полягає не у видаленні розчинника, а є результатом полімеризації, що зумовлена розкриванням подвійних зв'язків в молекулах олії, чому сприяє кисень, що є у повітрі, температура, сикатив (каталізатор) та дія інфрачервоного випромінювання. Швидкість сушіння залежить від вмісту сикативу. Підвищена кількість його дозволяє застосовувати холодне сушіння, але отримана таким способом плівка швидко старіє, розтріскується. Для високоякісної електроізоляції лаки виготовляють з малою кількістю сикативів і проводять гаряче сушіння. Застосовують для виготовлення світлих лакотканин, лакопаперів, просочування обмоток машин і апаратів, ізоляції листів магнітопроводу електромашин (гаряче сушіння $\approx 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Олійно-смоляні лаки – це лакові композиції на основі висихаючих олій і природних та синтетичних смол. Широко застосовуються для просочування обмоток оливонаповнених трансформаторів, обмоток апаратів, що зазнають дії парів кислот і хлору, для покриття ізоляції, що має фенолоформальдегідні смоли, для захисту друкованого монтажу радіоблоків. Можна відзначити оливно-гліфталевий лак, що має нагрівостійкість до $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ і характеризується зниженою гігроскопічністю і маслостійкістю.

Олійно-бітумні (чорні) лаки крім бітуму мають в своїй основі висихаючі олії. Займають проміжне положення між чисто бітумними і чисто олійними лаками. Порівняно з олійними лаками мають кращі електричні властивості, але менш еластичні та нагрівостійкі, розчиняються в оліях, хоча і менше, ніж чисто бітумні.

Якщо в покривний лак ввести пігмент (барвник), то отримаємо *емаль пічного чи повітряного сушіння*. Як пігменти використовують неорганічні речовини, головним чином, оксиди цинку, титану, залізний сурик. У процесі висихання емалей, пігмент вступає в хімічну реакцію з лаковою основою і утворює щільні покриття. Введення пігменту збільшує твердість покриття, нагрівостійкість, вологостійкість та лугостійкість.

Емаль-лаки використовують для ізоляції емальованих проводів та листової електротехнічної сталі; пігментовані емалі (пігмент – вуглець (сажа)) застосовують в лобових частинах високовольтних електричних машин для покращення форми електричного поля шляхом вимушеного його перерозподілу.

Компаунди

За складом компаунди можуть бути *термопластичними* на основі бітумів, воскоподібних діелектриків та термопластичних смол і полімерів, а також *терморективними*, якщо для їх виготовлення використовують епоксидні, поліефірні та інших синтетичні терморективні смоли. Основною відмінністю компаундів від лаків є відсутність розчинників. Монолітність компаундів після твердіння забезпечується тим, що термопластичні компаунди у вихідному стані і в складі ізоляції тверді речовини, але при використанні розігріваються до плавлення, а терморективні полімеризуються в процесі виготовлення ізоляції. Таким чином, компаунди перед використанням спочатку потрібно нагріти, щоб розплавити тверду основу компаунда. При охолодженні всі компаунди переходять в твердий агрегатний стан.

Компаунд може мати в своєму складі отверджувач, якщо для його полімеризації потрібен зшиваючий компонент, неорганічні наповнювачі (кварцове борошно, тальк, мелена слюда тощо) для підвищення електрофізичних і механічних властивостей, пластифікатори та інші речовини в залежності від типу компаунда і його використання.

За призначенням компаунди поділяються на:

– *просочувальні*, основним застосуванням яких є просочення обмоток електромашин з метою цементації витків і захисту від вологи та іонізації повітря між витками;

– *залівні* – для заливання високовольтних вводів, кабельних муфт та воронок;

– *обмазувальні* – для обмазування лобових частин обмоток електричних машин;

– *кабельні*, що використовуються для просочування паперової ізоляції електрокабелів (застосовують суміш мінеральної оливи з каніфоллю, що додається для збільшення в'язкості оливи).

До компаундів висувають такі вимоги:

а) широкий температурний діапазон роботи ($-45\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +60\text{ }^{\circ}\text{C}$);

б) добра адгезія;

в) вологонепроникність;

г) висока електрична міцність і малі діелектричні втрати;

д) мала усадка в діапазоні $-45\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В результаті компаундування збільшується електрична міцність ізоляції, зменшуються діелектричні втрати, ізоляція стає більш стійкою проти дії оточуючого середовища, підвищується теплопровідність, і відповідно тепловіддача.

При просоченні ізоляції компаундом часто доводиться використовувати вакуумування та компресію. Як приклад, розглянемо процес компаундування обмоток електромашин високої напруги, що складається з таких технологічних операцій:

– сушіння обмоток при атмосферному тиску в котлі;

- сушіння обмоток у вакуумі (45...50 мм рт.ст.);
- сушіння обмоток при атмосферному тиску, але при підвищеній температурі;
- впуск компаунду при вакуумі 15...20 мм рт.ст. протягом 1...2 годин;
- компаундування при тиску 7...8 атм 3...5 годин;
- випуск компаунду з робочого котла.

Тривалість компаундування обмоток електромашин високої напруги становить від 6 до 26 годин в залежності від роду ізоляції. Такий технологічний процес забезпечує незначну усадку компаунда, що забезпечує можливість більш точного виготовлення ізоляції, і незначну пористість, що підвищує стійкість до часткових розрядів.

Для нанесення тонкого ізоляційного шару на поверхню використовують *вихрове наплення* подрібненого компаунда в посудині з пористим дном, через яке продувається стиснене повітря, що піднімає і завихрює порошок, утворюючи так званий киплячий шар. В цей шар вносять нагрітий виріб. Частинки порошку прилипають до гарячої поверхні, утворюючи покриття. При необхідності нанесений шар може бути підданий термообробці.

ЛЕКЦІЯ 11

11.1 ВИСОКОМОЛЕКУЛЯРНІ ОРГАНІЧНІ ДІЕЛЕКТРИКИ

11.1.1 Загальна характеристика

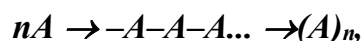
До високомолекулярних органічних діелектриків відносяться полімери, пластмаси (полімери з добавками), еластомери. Для підвищення характеристик, необхідних для використання високомолекулярних органічних діелектриків як ізоляційних чи конденсаторних матеріалів, в них вводять у невеликих кількостях відповідні добавки: стабілізатори, пластифікатори, барвники тощо. Враховуючи різноманітність характеристик і напрямків використання високомолекулярних органічних діелектриків їх класифікація досить широка. Розглянемо її більш детально, враховуючи критерії класифікації.

За походженням розрізняють:

- природні речовини, які людина бере у природи, доочищаючи їх, такі як деревина, бавовна, шовк і т.п.
- штучні матеріали, що отримують шляхом хімічної обробки природних високомолекулярних речовин, як наприклад, ефіри целюлози;
- синтетичні високомолекулярні діелектрики, куди відносяться матеріали, які в природі не існують, а синтезовані людиною штучно, наприклад полімери, пластмаси, еластомери тощо.

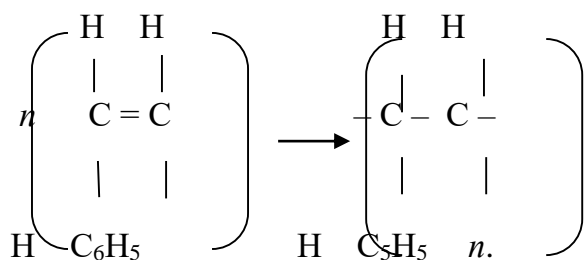
За характером технологічного процесу:

полімеризаційні, що утворюються в процесі об'єднання молекул мономера в молекулу полімера за рахунок розкриття подвійних зв'язків без утворення побічних продуктів. Схематично процес полімеризації може бути відображений такою схемою



де n – ступінь полімеризації.

Полімеризація – процес з'єднання молекул газоподібного чи рідкого мономера в велику молекулу, в результаті якого елементарний склад речовини не змінюється. Як приклад розглянемо утворення полістиролу із стиролу (C_8H_8), що є рідкою речовиною:



Кількість молекул мономера, що об'єдналися при утворенні полімера називають ступенем полімеризації. Для полістиролу вона може сягати 6000, для поліетилену – до 10^6 .

Поліконденсація – процес утворення високомолекулярної речовини із мономерів з одночасним виділенням води, вуглекислого газу, кислоти та інших побічних продуктів. Поліконденсаційні діелектрики мають електроізоляційні властивості нижчі, ніж полімерні, внаслідок залишків мономерів при локальній нестехіометричності компонентів та пористості структури, що зумовлена виходом побічних продуктів з діелектрика в процесі його отримання.

Полімерний стан з термодинамічної точки зору нерівноважний. При певних умовах (підвищена температура) може виникати обернена реакція, полімер може деполімеризуватися – розкластись на речовини з меншим ступенем полімеризації. Цей процес відбувається при тепловому старінні полімерів.

За будовою полімери поділяють на три групи:

- лінійні – молекули мають вигляд ланцюжків (відношення довжини молекули до її поперечного розміру $\sim > 1000$);
- розгалужені – від основного молекулярного ланцюга відходять бокові ланцюжки того ж складу, що і основний ланцюг;
- просторові (трьохвимірні) – мають розвинуту систему внутрішніх зв'язків (зшивань) між частинами однієї і тієї ж і іншими молекулами, внаслідок чого матеріал перетворюється фактично на одну величезну молекулу.

Властивості лінійних і просторових полімерів суттєво різні. Лінійні полімери – аморфні або аморфно-кристалічні термопластичні речовини, гнучкі та еластичні, при підвищеній температурі розм'якшуються і плавляться, здатні розчинюватися у близьких за полярністю розчинниках, але не у воді, мало гігроскопічні, мають, як правило, низьку температуру склування, всі лінійні полімери, крім політетрафторетилену і поліімідів горять.

Для виробництва негорючої ізоляції в них вводять *антипірени*, речовини, що при горінні виділяють велику кількість негорючих газоподібних продуктів, що знижують концентрацію кисню в зоні горіння до таких значень, при яких горіння стає неможливим.

Просторові – жорсткіші, розм'якшуються при значній температурі, а частіше обуглюються чи згорають, практично не розчиняються.

За реакцією на нагрівання:

- термопластичні – плавляться при нагріванні, при охолодженні знову твердіють, але не втрачають цієї властивості при повторних операціях.
- терморективні (реактопласти) – при нагріванні полімеризуються в просторовий полімер і втрачають здатність повторно плавитися і розчинятися. До терморективних полімерів відноситься більшість розглянутих раніше смол (крім целюлози).

За характером деформації: склоподібні, високоеластичні та в'язкоплинні.

За реакцією на електричне поле високомолекулярні діелектрики діляться на полярні і неполярні.

Розглянемо властивості найбільш вживаних високомолекулярних діелектриків. Слід розуміти, що кожному матеріалу присвячують монографії, а тому буде наведено тільки той мінімум інформації, який дає уявлення про використання матеріалу в електротехніці.

11.1.2 Неполлярні полімеризаційні термопластичні синтетичні діелектрики

Поліетилен – безбарвний, частково прозорий термопластичний матеріал, що отримують полімеризацією газоподібного мономера – етилену. Молекулярна маса від $8 \cdot 10^4$ до $3,5 \cdot 10^6$. Має високу водостійкість, не розчиняється при кімнатній температурі, при температурах вище 70°C розчиняється в ксилолі і інших хлорованих і ароматичних розчинниках.

Поліетилен виробляють з чистого етилену при *високих* тисках (ПЕВТ) – 1470...2500 атм, $180 \dots 270^\circ\text{C}$; або з каталізаторами при *середніх* (ПЕСТ) – 34...39 атм і 150°C і *низьких* тисках (ПЕНТ) – 3...5 атм, $70 \dots 80^\circ\text{C}$ і отримують матеріал з низькою ПЕНГ ($910 - 930 \text{ кг/м}^3$) і високою густиною ПЕВГ (від 950 до 960 кг/м^3 для ПЕНТ і від 960 до 970 кг/м^3 для ПЕСТ відповідно).

ПЕВТ має меншу густину, жорсткість, механічну міцність і степінь кристалічності, ніж ПЕСТ і ПЕНТ, через більшу кількість бокових відгалужень (до 36 на 1000 ланок молекули), але кращі електрофізичні характеристики через відсутність залишків каталізаторів і більші питому ударну в'язкість (існуючими методами не визначається) і стійкість до теплового старіння.

Температури склування і крихкості для поліетилену близькі за значенням одна до одної і можуть змінюватися в широких межах від -70°C (ПЕСТ) до -150°C (ПЕНТ). Поліетилен добре горить, тому для ізоляції з поліетилену в залежності від призначення може бути потрібним захист від горіння. Слід відзначити, що температура плавлення ПЕВТ $105 - 108^\circ\text{C}$. Тому для ізоляції високовольтних кабелів застосовують зшитий радіаційно або хімічно, з допомогою перекисів, поліетилен, що має нагрівостійкість 105°C , а короткочасно може витримувати температуру до 200°C .

Електричні властивості поліетилену: $\rho = 10^{14} - 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при 20°C ; $\text{tg}\delta = 0,0001 \dots 0,0005$; $E_{\text{пр}} =$ до 60 кВ/мм при напрузі 50 Гц і товщині 1 мм і до 250 кВ/мм при товщині, меншій 0,1 мм; $\epsilon = 2,2 \dots 2,4$; температурний діапазон від -70°C до $+(55 \dots 60)^\circ\text{C}$, зшитого до 105°C .

Механічні характеристики: межа міцності при розтягуванні 10 – 33 МПа, відносне подовження перед розривом 200 – 800 %.

Застосовують поліетилен для ізоляції високовольтних кабелів і проводів, обкладинок конденсаторів, для виготовлення термоусадних трубок (використовують ефект пам'яті форми, коли деформована радіаційно зшита трубка при нагріванні відновлює попередній розмір).

Полістирол – продукт полімеризації стиролу (вінілбензолу), твердий аморфний прозорий (пропускає до 90% видимого світла) матеріал з високими електроізоляційними властивостями, стійкий до озону, кислот, лугів, солей і спиртів. Розчиняється в чотирихлористому вуглеці і бензолі, нестійкий до дії аліфатичних, ароматичних і хлорованих вуглеводнів. Густина полістиролу $1050 \dots 1070 \text{ кг/м}^3$.

Виготовляють в залежності від особливостей технології блоковий, суспензійний, емульсійний та з використанням каталізаторів ізотактичний полістирол.

До переваг полістиролу відноситься стабільність його електрофізичних характеристик. Вони практично не залежать від частоти напруги в інтервалі від 10^2 до 10^9 Гц, температури – від -80 до 90 °С і від вологості навколишнього середовища. Значення цих характеристик такі: $\rho = 10^{14} - 10^{16}$ Ом·м при 20 °С; $\varepsilon = 2,4 \dots 2,6$; $\text{tg} \delta = 0,0001 \dots 0,0003$; $E_{np} = 25 - 35$ кВ/мм при напрузі 50 Гц і товщині 1 мм; температурний діапазон від -60 °С до $+(65 \dots 80)$ °С.

До основних недоліків полістиролу відносяться невисока нагрівостійкість, схильність до утворення тріщин і крихкість. Ударна в'язкість полістиролу сягає всього $16 - 22$ кДж/м², відносно подовження перед розриванням – $1,5\%$.

Для підвищення нагрівостійкості в полістирол вводять до 30% кварцового або слюдяного борошна, білої сажі (кремнієва кислота), тальку тощо, армують скловолокном. Зниження крихкості досягають сополімеризацією полістиролу з каучуком (до 8%), що дає можливість підвищити ударну в'язкість до $30 - 60$ кДж/м² (удароміцний полістирол).

Застосовують полістирол для ізоляції високочастотних кабелів, виготовлення лаків, компаундів, каркасів котушок індуктивності, панелей електронних ламп, ізоляторів для електровимірювальних приладів. Для ізоляції електричних конденсаторів виготовляють двоосно орієнтовано полістирольну плівку – стирофлекс товщиною від 6 до 200 мкм (звичайно до 50 мкм).

АБС-пластик – сополімер акрилонітрилу, бутадієну і стирола (перші букви компонентів використані у назві). Він має вищу на 10% ніж полістирол нагрівостійкість, хорошу термостабільність і хімічну стійкість, ударну в'язкість на рівні 70 кДж/м², але гірші електрофізичні характеристики ($\text{tg} \delta = 8 \cdot 10^{-3}$).

Використовують для виготовлення корпусів приладів і окремих деталей.

Поліпропілен – безбарвний, прозорий кристалічний (ступінь кристалічності $90 - 95\%$) продукт полімеризації пропілену з використанням каталізаторів, молекулярна маса $(8 - 20) \cdot 10^4$, густина $900 - 910$ кг/м³. Стійкий до дії кислот, лугів, мінеральних і рослинних олій, органічних розчинників при кімнатній температурі. Розчиняється в органічних розчинниках тільки при температурах вище 80 °С.

За властивостями близький до поліетилену, але має низьку морозостійкість. Температури склування і крихкості – $(5 - 15)$ °С. При прямій дії сонячного світла окиснюється.

Використовують плівки поліпропілену в електричних конденсаторах.

Поліізобутилен – безбарвний аморфний продукт полімеризації ізобутилену. Виготовляють низько-, середньо- і високомолекулярний поліізобутилен. Високомолекулярний поліізобутилен має молекулярну масу $(20 - 25) \cdot 10^4$, густину $910 - 930$ кг/м³. Він стійкий до дії кислот і лугів, розчиняється у сірководнеці, аліфатичних, ароматичних і хлорованих вуглеводнях.

Електричні властивості поліізобутилену близькі до властивостей поліетилену, але $\text{tg} \delta$ трохи більший, а електрична міцність значно (майже в 3 рази) нижча. Основними недоліками поліізобутилену є мала стійкість до ультрафіолету, низька механічна міцність і висока холодоплинність, що не дає можливості використовувати його в чистому вигляді.

Для підвищення стійкості до ультрафіолету в поліізобутилен вводять до 150% сажі, графіту. Щоб збільшити твердість використовують наповнювачі.

Застосовують поліізобутилен в композиції з полістиролом для виготовлення ізоляційних стрічок, вводять до складу кабельного поліетилену для підвищення гнучкості, стійкості до розтріскування і зниження вологопроникності.

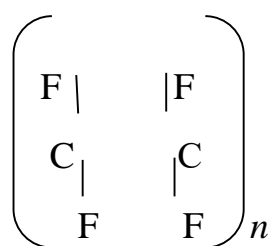
Низькомолекулярний поліізобутилен знаходиться в рідкому стані. Його застосовують для просочення паперових конденсаторів та для виготовлення клеючих лаків.

Політетрафторетилен (фторопласт – 4) – молочно-білий непрозорий продукт полімеризації тетрафторетилену з молекулярною масою $(14 - 50) \cdot 10^4$, густиною 2150 – 2240 кг/м³ і ступенем полімеризації 80 – 85% є найнеполярнішим полімером з відносною діелектричною проникністю 1,9. За кордоном має назву тефлон.

Чотири атоми фтору настільки ефективно екранують атоми вуглецю, що на політетрафторетилен при нормальних температурах не діють ніякі кислоти (навіть царська горілка) і луги.

При нагріванні при 327 °С кристаліти у політетрафторетилені плавляться і він стає напівпрозорим, але зберігає механічну міцність, і тільки при 415 °С починає переганятися, тобто переходити у газоподібну фазу обминаючи рідинну, з виділенням отруйних газів – фтору і фосгену.

Політетрафторетилен може працювати при температурах від – 260 до 260 °С, короткочасно – до 300 °С. Його властивості практично незмінні в інтервалі температур від – 60 до 200 °С і частот до надвисоких (10⁹ Гц) включно. Це єдиний матеріал, який зберігає пластичність і може використовуватися як ущільнюючий при гелієвих температурах.



Електричні властивості дуже високі: $\rho = 10^{15} - 10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\varepsilon = 1,9 - 2,2$; $\text{tg} \delta = 0,0002 - 0,00025$; $E_{np} = 40 \text{ кВ/мм}$ при 250 °С і товщині 1 мм.

Основними недоліками політетрафторетилену є відсутність переходу у в'язкоплинний стан, що дуже ускладнює технологію його переробку у виробі: унеможливує екструзію, лиття під тиском, що використовуються для інших полімерів. Вироби з нього виготовляють обточуванням на токарному станку спресованих при підвищених значеннях температури і тиску монолітних блоків. Крім того, для політетрафторетилену характерна холодоплинність, а головне дуже низькі радіаційна стійкість і стійкість до дії часткових розрядів.

Застосовують політетрафторетилен у виробництві термо- і вологостійкої ізоляції проводів і кабелів, у термостабільних конденсаторах, для пазової та виткової ізоляції електричних машин та як високочастотну ізоляцію. Крім того, його застосовують для виготовлення установлювальних деталей.

11.1.3 Полярні полімеризаційні термопластичні синтетичні діелектрики

Для полярних термопластичних високомолекулярних діелектриків характерні підвищені значення відносної діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат, що сильно залежать від температури. Значення питомого опору і електричної міцності у них менші, ніж у неполярних полімерів. Тому полярні полімери є низькочастотними діелектриками, які працюють на постійній напрузі і при змінних напругах низьких частот.

Полівінілхлорид (поліхлорвініл) – аморфний, напівпрозорий, з жовтуватим відтінком, продукт полімеризації газоподібного вінілхлориду в присутності перекису водню. Молекулярна маса $(5 - 10) \cdot 10^4$, густина – 1350 – 1370 кг/м³. Практично негорючий (горить тільки в полум'ї з виділенням токсичних HCl і Cl₂). Стійкий до дії води, лугів, розведених кислот, олив, бензину й спирту. Розчиняється при нагріванні в органічних розчинниках.

При нормальних умовах чистий полівінілхлорид перебуває в склоподібному стані ($T_c = 78 - 105^\circ\text{C}$) і випускається під назвою *вініпласт*. Вініпласт легко зварюється, має хорошу адгезію до металів. З нього виготовляють акумуляторні баки, конструкційні деталі, що стійкі до вібрації та ударів, корпуси трубчастих розрядників (при нагріванні з полівінілхлориду інтенсивно виділяються газу, що прискорюють гасіння дуги).

Для зниження температури склування у полівінілхлорид вводять до 50% пластифікаторів (дибутилфталат, діоктилсебацінат), що дозволяє знизити температуру склування до -40°C , але погіршує електричні властивості. Чистий полівінілхлорид має відносну діелектричну проникність 3,2 – 3,6, пластифікований 5 – 6, а $\text{tg}\delta$ полівінілхлоридного пластикату може сягати 0,15.

Електричні властивості полівінілхлориду: $\rho = 10^{11} - 10^{13}$ Ом·м; $\varepsilon = 3,5 - 4,5$; $\text{tg}\delta = 0,015 \dots 0,08$; $E_{np} = 20 - 45$ кВ/мм; *теплостійкість* 60...70 °С; *морозостійкість* $-25 \dots -50^\circ\text{C}$.

Застосовують пластифікований полівінілхлорид для виготовлення установних проводів, захисних оболонок кабелів, ізоляції негорючих кабелів, липкої стрічки, трубок, рулонних матеріалів тощо.

Політрифторхлоретилен (фторопласт-3) – слабополярний продукт полімеризації трифторхлоретилену білого кольору. Молекулярна маса $(2-36) \cdot 10^4$, густина 2090 – 2160 кг/м³, ступінь кристалічності 40 – 70%. Кристалічна фаза плавиться при 215 °С, температура склування аморфної фази 50 °С. На відміну від фторопласта-4 не холодоплинний, негорючий, але при температурі близько 300 °С починає розкладатися і набуває від темно-коричневого до чорного кольору.

Має дещо гірші електрофізичні характеристики в порівнянні з фторопластом-4: $\rho = 10^{14} - 10^{15}$ Ом·м; $\varepsilon = 2,5 - 3$; $\text{tg}\delta = 0,01 - 0,015$; $E_{np} = 20 - 25$ кВ/мм; *робоча*

температура до 120°C , але більш високі еластичність, питому ударну в'язкість, радіаційну стійкість і більш просту технологію переробки.

Застосовують в кабельній техніці і виробництві конденсаторів, а також для виготовлення складних за формою радіотехнічних деталей, панелей ламп тощо.

Поліметилметакрилат (органічне скло, плексиглас) – термопластичний, аморфний, прозорий (пропускає 90 – 99% видимого світла, 75% ультрафіолету, для порівняння силікатне скло пропускає 0,6 – 3% ультрафіолету) продукт полімеризації метилефіру метакрилової кислоти. Має гарну холодо-, оливо- і лугостійкість. Практично не поглинає води. Розчиняється в дихлоретані, ацетоні. Горить з виділенням великої кількості газів CO_2 , CO , H_2 , H_2O , що сприяє гасінню дуги.

Електричні властивості: $\rho = 10^{11} - 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\varepsilon = 2,8 - 4,5$; $\text{tg}\delta = 0,02 - 0,06$; $E_{\text{пр}} = 18 - 35 \text{ кВ/мм}$; *теплостійкість* 60–80 °С; *морозостійкість* –80 °С.

Виготовляють прокатуванням при температурі вище 120°C у вигляді листів товщиною 0,8...24 мм і вище, стрижнів, порошоків. Застосовують як конструкційний матеріал для виготовлення шкал, лінз, плівок, клеїв, лаків та як електроізоляційний матеріал при низьких частотах, у вимикачах та розрядниках високої напруги.

Полііміди – група слабополярних аліфатичних (ступінь кристалічності до 60%), аморфних ароматичних, лінійних і тривимірних полімерів від світло-золотавого до темно-червоного кольорів, що мають у своєму складі імідну групу, яка і визначає властивості цих матеріалів. Молекулярна маса їх досягає $2 \cdot 10^5$, густина 1430 кг/м^3 . Не стійкі до дії лугів і деяких органічних речовин, стійкі до дії озону і радіації.

Вони належать до найбільш нагрівостійких полімерів; їх тривала робоча температура не менша $+220^{\circ}\text{C}$, а у вакуумі і інертному сереовищі – до 500°C . Плівка із поліімідних смол не розм'якшується і не плавиться при температурі до $+800^{\circ}\text{C}$. Температура склування ароматичних поліімідів 500°C .

Мають високу механічну міцність (межа міцності при розриванні 160 – 180 МПа), яка практично не змінюється до криогенних температур (-269°C), але підвищене водопоглинання (0,8% при 100°C за 30 діб).

Електрофізичні характеристики поліімідів: $\rho = 10^{15} - 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\varepsilon = 3,5$; $\text{tg}\delta = 0,0006 - 0,0016$; $E_{\text{пр}} = 160 - 200 \text{ кВ/мм}$ при товщині зразків 20 – 100 мкм.

Полііміди використовують у виробництві пластмас, лаків. Плівки з них застосовують для пазової і виткової ізоляції, у виробництві кабелів, обмотувальних проводів, друкованих плат, конденсаторів, плівкових електроізоляційних матеріалів.

11.1.4 Поліконденсаційні органічні діелектрики

Поліаміди (капрон або поліамід 6, найлон або поліамід 6,6, ε -капролактам) – непрозорі, полярні продукти поліконденсації гексаметилендіаміну з адипіновою кислотою. Колір від безбарвного до жовто-коричневого. Молекулярна маса $(8 - 25) \cdot 10^3$, густина $1120 - 1140 \text{ кг/м}^3$. Розчиняються тільки в концентрованих сірчаній, соляній, азотній і мурашиній кислотах, фенолах і амідах. Руйнуються в розчинах лугів. Стійкі до дії жирів, нафтопродуктів і спиртів.

Поліаміди плавляться без розкладання. Температура плавлення 210 – 215 °С. Температура крихкості від – 30 °С до – 70 °С. Добре обробляються різанням, литтям під тиском і гарячим пресуванням.

Електрофізичні характеристики поліамідів суттєво залежать від температури, частоти напруги і вмісту вологи. Вони, як і механічні властивості, різко погіршуються внаслідок термо- і фотодеструкції.

Для поліпшення механічних характеристик, зменшення водопоглинання і ТКЛР в поліаміди вводять наповнювачі (тальк, аеросил (мелений кварцовий пісок), скляні волокна, графіт).

Електричні і теплові властивості поліамідів: $\rho = 10^{11} - 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\varepsilon = 4 - 6$; $\text{tg}\delta = 0,022 - 0,08$; $E_{np} = 18...25 \text{ кВ/мм}$; теплостійкість 50 – 60 °С, робоча температура наповнених поліамідів від – 60 до 120 °С.

Використовують при виготовленні литої ізоляції трансформаторів струму, деяких компаундів, лаків і емалей, штучних волокон, пластмас, різних установних і несучих елементів.

Поліетилентерефталат (лавсан, майлар, терилен, хостафан, дакрон) – слабополярний, прозорий в аморфному і частково прозорий в закристалізованому стані продукт поліконденсації етиленгліколю і терефталевої кислоти. Молекулярна маса $(5 - 8) \cdot 10^4$, густина 1380 кг/м³. Кристалічність може сягати 70%. Мало гідрофільний, розчиняється в дихлоретані, фенолах, хлорованих фенолах, мурашиній кислоті і не розчинний у звичайних органічних розчинниках ацетоні, ксилолі, діоксані, етилацетоні. Руйнується концентрованими лугами і сірчаною кислотою.

Робочий інтервал температур від – 60 до 150 °С, температура плавлення 235 – 265 °С, температура крихкості – 80 °С, температура склування 80 – 90 °С.

Електричні характеристики: $\rho = 10^{13} - 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\varepsilon = 3,1 - 3,5$; $\text{tg}\delta = 0,002 - 0,02$; $E_{np} = 30 - 180 \text{ кВ/мм}$.

Використовують поліетилентерефталат у вигляді волокон для обплітання проводів і плівок. Плівки використовують для міжшарової ізоляції в обмотках трансформаторів і дроселів, для виготовлення конденсаторів з більшою питомою ємністю, ніж паперові, і з більшою робочою температурою.

Полікарбонат (дифлон) – слабополярний, прозорий (може випускатися також у вигляді непрозорих гранул від ясно-жовтого до темно-коричневого кольору) продукт поліконденсації дифенілпропану і фосгену. Молекулярна маса $(20 - 50) \cdot 10^4$, густина 1170 – 1220 кг/м³. Стійкий до дії аліфатичних вуглеводнів, вищих спиртів, олив, води, кислот, слабких лугів. Розчиняється в хлорованих вуглеводнях, фенолах, тетрагідрофурані.

Плавиться дифлон без розкладання при температурі 270 °С, температура склування – 150 °С, зберігає гнучкість до – 100 °С.

Має гарні і стабільні в широкому інтервалі температур (до 140 °С) механічні і електричні ($\rho = 10^{14} - 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\varepsilon = 3 - 3,2$; $\text{tg}\delta = 0,0006 - 0,008$; $E_{np} = 30 \text{ кВ/мм}$) властивості.

Полікарбонат використовують для виготовлення установлювальних деталей, конденсаторних плівок, застосовують як в'язучий матеріал у виробництві склопластиків.

Поліуретани – полярні термопластичні чи термореактивні полімери, що містять уретанову групу і мають дуже широкий спектр властивостей, в тім числі і електричних ($\rho = 10^{12}$ Ом·м; $\varepsilon = 4,5 - 5$; $\text{tg} \delta = 0,02 - 0,03$; $E_{np} = 26$ кВ/мм).

З поліуретанів виготовляють компаунди для просочення і герметизації високовольтних трансформаторів, напівпровідникових випрямлячів, конденсаторів і інших виробів, лаки для емалювання проводів, що не вимагають флюсів при паянні, клеї для склеювання металів, пластиків, силікатних і органічного стекл, кераміки, гуми і інших матеріалів.

Полівінілацетали – продукти поліконденсації полівінілового спирту з альдегідами. При поліконденсації полівінілового спирту з формальдегідом отримують *полівінілформаль*, яку використовують для виробництва емаль-лаків *вініфлекс і металвін* для ізоляції обмоточних проводів, що мають високу механічну міцність, більш високі значення у порівнянні з оливними лаками температури розм'якшення, жорсткості і твердості.

11.1.5 Пластмаси (пластикати)

Пластмасами називають матеріали, що містять в різних *кількостях в'язучу речовину* (полімер), *наповнювач* (порошок, волокна, листовий матеріал), *пластифікатори та фарбуючі речовини* і перебувають в експлуатації у склоподібному або кристалічному стані. Пластмаси здатні приймати потрібну форму в процесі переробки в готові вироби під дією тиску (часто при одночасному нагріванні). Деякі пластмаси можна обробляти механічно.

В'язуча речовина (зв'язувач, зв'язуюче) – *органічна речовина*, тобто смола природня, синтетична термопластична чи термореактивна або *неорганічна* (цемент, скло), що утворює *диспергійне середовище – матрицю*, яка об'єднує пластмасу в один матеріал і значною мірою зумовлює його властивості.

Наповнювачі – *неорганічні чи органічні волокнисті* (скловолокно, довговолокнистий азбест, базальтове волокно, бавовняні та лляні очоси, лінтер, сульфатна целюлоза, текстильні і паперові часточки, синтетичні волокна), *порошкові* (мелені слюда, пісок і гірські породи, тальк, каолін, кальцит, феромагнітний порошок, кварцове борошно, деревне борошно, лігнін і дисперсні полімери) чи *листові* (слюда, склотканина, тканина, папір) речовини, що істотно знижують вартість, підвищують механічні характеристики і нагрівостійкість матеріалу. Однак, слід пам'ятати, що при введенні наповнювачів, особливо органічних, може зростати гігроскопічність, а також погіршуватися електричні характеристики.

Пластифікатори вводяться для поліпшення технологічних і експлуатаційних характеристик пластмас. Вони знижують температури склування і крихкості, розширяють інтервал високоеластичного стану матеріалу.

Отверджувачі (зшиваючі компоненти) вводять в пластмасу для утворення поперечних зв'язків в молекулах і між молекулами полімера.

Стабілізатори забезпечують захист *від руйнівної дії тепла* (термостабілізатори), *світла* (фотостабілізатори) і *кисню* (антиоксиданти).

Змащувальні речовини (парафін, віск, силіконові рідини та інші) збільшують плинність і зменшують прилипання пластмаси до стінок обладнання в процесі виготовлення і формування виробів.

Для пластмас характерний широкий спектр різноманітних властивостей і областей застосування. Вони можуть використовуватися як електроізоляційні і як конструкційні матеріали, що забезпечується високим рівнем електрофізичних і механічних властивостей, стійкістю до дії високих і низьких температур, хімічною та вологостійкістю, еластичністю, невеликою густиною та легкістю переробки у виробі.

Основні способи переробки пластмас:

- переробка у в'язкоплинному стані – лиття під тиском, екструзія (видавлювання через отвір відповідної форми у матриці), гаряче пресування тощо;
- переробка у високоеластичному стані – гаряче штампування, пневмо- і вакуумне формування, обробка різанням тощо;
- переробка в склоподібному стані – розділове штампування, обробка різанням тощо;

виготовлення виробу шляхом полімеризації рідкої суміші в спеціальній формі.

Прес-порошки – вихідний матеріал для отримання пластмас у вигляді тонко подрібнених, висушених і розмішаних компонентів. Їх отримують:

- сухим способом – подрібнюють та змішують в твердому стані;
- мокрим – попередньо просочують наповнювач розчином в'язучого в певному розчиннику, далі нагрівають для випаровування розчинника та подрібнюють одержаний матеріал. При такій технології забезпечується більша однорідність прес-порошку.

Промисловість виготовляє 54 марки прес-порошків, що поділяються на 7 груп: загального призначення, електроізоляційні, волокнисті (для колекторів електромашин), з підвищеною водо- та нагрівостійкістю, з підвищеною хімічною стійкістю, з підвищеною міцністю на удар (для цоколів електроламп), особливого призначення (рентген-апарати).

Вироби із прес-порошків отримують методом відливання під тиском (підігрівають зовні прес-форми і нагнітають прес-порошок в прес-форму під тиском), шприцюванням і екструзією (виготовляють стрижні, трубки, стрічки).

Прикладом прес-порошків можуть бути *фенопласти* – матеріали на основі фенол-формальдегідної (бакеліт) або новолачної смоли. З них виготовляють корпуси електроапаратів.

Електричні властивості фенопластів: $\rho = 10^{12}$ Ом·м; $\text{tg}\delta = 0,01 \dots 0,09$; $E_{np} = 12 \dots 17$ кВ/мм; $\varepsilon = 5,5 \dots 7,0$; *теплостійкість* 110...150 °С. Недолік: під дією дуги на поверхні утворюється струмопровідний шар.

Найширше застосування знайшли шаруваті пластмаси з листовим наповненням – *гетинакс* і *текстоліт*.

Гетинакс – листовий шаруватий матеріал товщиною від 0,2 до 50 мм, в якому наповнювачем є кабельний папір (0,12 мм) в кілька шарів, просочений бакелітом або

крезолоформальдегідною смолою і пресований при температурі 160...165 °С і тиску 6 – 10 МПа з часом пресування 2–5 хвилин на 1 мм товщини. Відзначається гетинакс великою неоднорідністю властивостей – питомий об'ємний опір уздовж шарів в 50 – 100, а електрична міцність в 5 – 8 разів менші, ніж поперек шарів.

Недоліком гетинаксу, як і інших матеріалів на основі фенолоформальдегідної смоли, є низька стійкість до дії поверхневих розрядів (трекінгостійкість).

Зараз випускають гетинакс на основі епоксидної смоли та поліетилентерефталатного паперу (гетинакс марки ЛГ), а також гетинакс, облицьований по обидва боки шаром поліетилентерефталатного паперу, просоченого епоксидною смолою. Гетинакс марки ЛГ відзначається високими показниками вологостійкості, механічних і електричних властивостей. Добре переробляється методом штампування.

В обмежених кількостях виготовляють гетинакс на основі склопаперу – склогетинакс.

Для виготовлення низькочастотних друкованих плат використовують фольгований гетинакс, покритий з однієї або з двох сторін мідною (99,9% міді) фольгою товщиною 5, 18, 25,35, 50, 70 і 105 мкм. Чим тонша фольга, тим щільніший монтаж можна забезпечити на даній платі.

Текстоліт – отримують за такою ж технологією, що і гетинакс, але наповнювач бавовняна, скляна (склотекстоліт), поліетилентерефталатна (лавсановий текстоліт), азбестова (азботекстоліт) тканина або нетканий матеріал. Текстоліт, наповнений бавовняною тканиною, має більш високі значення питомої ударної в'язкості, стійкості до стирання і опору розколюванню з торця. Електричні характеристики такі ж, як у гетинаксу, за виключенням електричної міцності, яка помітно нижча. Вартість текстоліту в кілька разів вища за вартість гетинаксу.

При виробництві склотекстоліту використовують склотканину з алюмоборосилікатного скла зі вмістом окислів лужних металів не більше 0,5%. Як в'язуче застосовують кремнійорганічні лаки або композиції кремнійорганічних лаків з епоксидною смолою. Електрична міцність склотекстоліту в три рази вища, ніж бавовняного текстоліту.

Фольгований склотекстоліт має більшу, ніж фольгований гетинакс, стійкість до підвищених температур і вологості, високу тропікостійкість.

11.1.6 Еластомери.

Еластомер – речовини, що мають надзвичайно велику пружну деформацію (до 500%) при температурах до – (40 – 60) °С, що зумовлено зигзагоподібною, шарнірною формою молекул, які при деформації випрямляються, структура стає близькою до кристалічної, а при знятті зусилля повертаються в початкову форму. Еластомери мають також широкий інтервал між температурами склування і плинності.

До еластомерів належать, перш за все, гуми, а також деякі поліуретани, кремнійорганічні полімери, суміш 90% поліетилену і 10% поліізобутилену, пластифікований полівінілхлорид тощо.

Гума – це вулканізована багатокомпонентна система на основі каучуків. Вулканізація каучуків полягає в утворенні поперечних зв'язків між молекулами і просторової структури за рахунок розкриття подвійних зв'язків в молекулі каучуку з допомогою атомів сірки при 138 – 200 °С.

В залежності від кількості сірки отримують:

м'яку гуму при 1...3% сірки;

тверду гуму (ебоніт) при введенні 30...35% сірки.

Крім сірки гума може мати у своєму складі до 60% інших речовин, таких як наповнювачі (крейда, тальк, каолін, окис цинку тощо) для поліпшення механічних властивостей та здешевлення гуми (наповнювачі в 20 – 75 разів дешевші, ніж каучук), пом'якшувачі (стеарин, парафін) для покращення технологічних властивостей, прискорювачі вулканізації, антиоксиданти, барвники і інші компоненти.

Властивості гуми залежать від типу каучуку, що використовувався при її виготовленні. При виробництві гуми часто використовують суміші натурального каучуку, що виготовляється із латексу – соку тропічних каучуконосних дерев, і синтетичних каучуків, до яких відносяться бутадієновий, бутадієн-стирольний, ізопреновий, бутилкаучук, хлоропреновий (наірит) та бутадієн-нітрильний.

Перші чотири каучуки неполярні і за властивостями близькі до натурального. Останні два – полярні зі зниженими характеристиками, але гуми на їх основі відрізняються більшою стійкістю до дії нафтопродуктів, окислювачів, теплового старіння, а також меншою газопроникністю.

М'яка гума має високі електроізоляційні, еластичні, волого– та водостійкі властивості. Її недоліки: низька нагрівостійкість, здатність до старіння, нестійкість до розчинників, хімічна взаємодія сірки з металами, що мають контакт з гумою.

Електричні властивості неполярної м'якої гуми – $\rho = 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\varepsilon = 3 - 7$; $\text{tg}\delta = 0,02...0,1$; $E_{np} = 20... 30 \text{ кВ/мм}$; полярної – $\rho = 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\varepsilon = 8 - 10,0$; $\text{tg}\delta = 0,3$; $E_{np} = 12... 22 \text{ кВ/мм}$

З твердої гуми (ебоніту) виготовляють прутки, трубки, конструкційні матеріали. Недоліки: мала теплостійкість, зниження електроопору під дією світла (для запобігання цьому поверхню промивають нашатирним спиртом).

Електричні властивості твердої гуми: $\rho = 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\text{tg}\delta = 0,01...0,015$; $\varepsilon = 2,7...3,0$.

Тіурамова гума (замість чистої сірки застосовують сірчисте з'єднання – тетраметилтіурамдисульфід, скорочена назва тіурам) – має зменшений вплив сірки на метал та підвищену нагрівостійкість.

Бутадієновий каучук при температурі 200 – 300 °С може бути полімеризований без додавання сірки чи її аналогів. Утворюється *ескапон* – твердий продукт за механічними властивостями схожий на ебоніт, але більш стійкий до теплового старіння, кислот і органічних розчинників. Його електричні властивості $\rho = 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\varepsilon = 2,7 - 3,0$; $\text{tg}\delta = 0,0005$.

На основі *бутилкаучуку* отримують гуми стійкі до дії озону, кисню і кислот, газопроникність їх в 10 – 20 раз нижча, ніж у натуральної гуми.

Хлоропренова (наїритова) гума відрізняється оливо- і бензостійкістю.

Кремнійорганічні гуми отримують шляхом поліконденсації кремнійорганічних каучуків з допомогою перекису бензолу. Як наповнювачі кремнійорганічної гуми використовують 15% колоїдний двоокис кремнію чи аеросил, двоокис титану, або суміші кремнієвої кислоти і каоліну в рівних пропорціях. Кремнійорганічні гуми мають високу нагрівостійкість (~ 250°C), але через високу гігроскопічність наповнювачів властивості гум трохи погіршуються, у них невисокі механічні властивості, низька міцність на розрив, мала стійкість до розчинників. Не слід забувати і про підвищену вартість кремнійорганічних гум.

Для ізоляції застосовують кремнійорганічні гуми марок КО-69, КО-673, КО-697 та інші.

11.2 ВОЛОКНИСТІ ДІЕЛЕКТРИКИ

Основною ознакою волокнистих матеріалів є їх структура: вони складаються з окремих тонких, частіше гнучких, елементів, причому довжина їх значно більша товщини. Наприклад: для бавовняного волокна – довжина 25 мм, а товщина 0,015 мм; для лляного, відповідно, – 25 мм і 0,02 мм. Синтетичні волокна можуть бути будь-якої довжини при діаметрі 0,003...0,03 мм.

Волокнисті діелектрики природного походження бувають органічні (у них низька нагрівостійкість – для непросочених клас *У*, для просочених – клас *А*) та неорганічного походження (класи *Е, В, F, Н*).

До природних волокон відносяться волокна рослинного (бавовна, льон, прядиво, джут, папір, деревина), тваринного (шовк, вовна) і мінерального (азбест) походження.

Можна виділити *ткани* (тканини, стрічки) та *неткани* (пряжа, папір, картон) волокнисті матеріали. В першому випадку матеріали мають впоряджену структуру у вигляді перехресних ниток. В другому – переплетену систему волокон.

Переваги волокнистих матеріалів: дешевизна, механічна міцність та гнучкість, добра придатність до обробітку. Недоліки: невисока електрична міцність, низька теплопровідність за рахунок молекулярної теплопровідності повітря в проміжках між волокнами, висока гігроскопічність (необхідно застосовувати просочування).

Деревина має відносно хороші механічні властивості – міцність на розривання 700...1300 кг/м². Причому, важкі породи значно міцніші, ніж легкі. Міцність впоперек менша ніж вповдовж. Недоліки деревини такі:

- висока гігроскопічність, що приводить до короблення та розтріскування при швидкому сушінні;
- нестандартність властивостей для однієї й тієї ж породи деревини;
- неізотропність властивостей, їх залежність від напрямку розпилювання;
- низька нагрівостійкість, горючість.

Властивості поліпшуються при просочуванні антисептиками, такими як фтористий натрій, мідний купорос, креозот та інші.

Методи антисептування:

- просочування маслянистими антисептиками під тиском;

- просочування маслянистими антисептиками способом гарячо-холодних ванн;
- просочування водорозчинним антисептиком в штабелях.

Для захисту деревини від горіння застосовують вогнетривкі покриття: наприклад, рідке скло в суміші з дрібно подрібненою крейдою, глиною. Під дією вогню покриття плавиться і покриває деревину плівкою, що перешкоджає доступу повітря.

Електричні властивості: $\rho=(2\dots8)\cdot 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $E_{np}=2,4\dots5,5 \text{ кВ/мм}$.

Застосовують деревину для пазових клинців в електромашинах, ярмових балок трансформаторів, як опори сільських електромереж.

Папір і картон – це листові або рулонні матеріали коротковолокнистого складу із целюлози. В електротехніці застосовується лужна целюлоза (NaOH) – жовтувата на колір (неочищена) та сульфатна (H₂SO₄) – біла (дешевша за лужну).

Конденсаторний папір – найтонший, від 4 до 30 мкм, і найякісніший електроізоляційний папір. Через орієнтацію волокон в процесі виготовлення папір неізотропний матеріал – міцність на розривання вздовж волокон вища, ніж поперек. Конденсаторний папір помітно окисляється при температурах 110 – 120 °С, при 150 °С папір швидко руйнується.

Випускають конденсаторний папір звичайний типу *КОН*, спеціальний поліпшеної якості *СКОН*, з малими діелектричними втратами *МКОН*, з високою електричною міцністю і малими втратами *ЕМКОН*, адсорбентний з малими діелектричними втратами і підвищеною електричною міцністю. Залежно від густини розрізняють такі марки конденсаторного паперу: *МКОН-08* (густина 800 кг/м³), *КОН-1* (1000 кг/м³), *КОН-2* (1200 кг/м³), *СКОН-3* (1300 кг/м³). Папір марки *КОН-1* використовують при змінній напрузі, *КОН-2* – при постійній.

Мала товщина конденсаторного паперу дозволяє підвищити ємність конденсатора, що обернено пропорційна товщині діелектрика. Крім того, для підвищення ємності конденсаторів і покращення їхніх характеристик, папір просочують нафтовою конденсаторною оливою чи іншими просочувальними матеріалами. Просочення підвищує електричну міцність конденсаторного паперу товщиною 10 мкм майже в 10 разів – від 30 – 40 кВ/мм до 250 – 300 кВ/мм.

Незважаючи на повну герметизацію силові конденсатори піддаються електрохімічному старінню та дії часткових розрядів, а тому робочі напруги вибирають 25–35 кВ/мм при постійній напрузі і 12 – 15 кВ/мм – при змінній.

Телефонний папір, що випускався товщиною 50 мкм, зараз у зв'язку з переходом на оптоволоконні лінії в стаціонарних телефонних мережах, що в наш час вже теж відживають свій вік, і на мобільні телефони застосовують тільки при виготовленні гетинаксу та для ізоляції обмотувальних проводів марок ПБ і ПББО.

Кабельний папір з основною товщиною 0,12 мм з сульфатної целюлози ще недавно був основним матеріалом для ізоляції високовольтних і низьковольтних кабелів. При використанні він додатково просочується нафтовою електроізоляційною оливою або оливоканіфольною масою. Але при цьому слабким місцем в ізоляції кабелів залишаються стики окремих стрічок, де можуть утворюватися непросочені порожнини, в яких виникають часткові розряди. Для запобігання старінню під дією часткових розрядів робочу напругу для паперово-

оливної ізоляції вибирають рівною 3 – 4 кВ/мм, а для газо- і оливонаповнених – до 10 – 12 кВ/мм, що в 3 – 7 раз нижче її електричної міцності.

Зараз використання високовольтних кабелів з паперово-оливною ізоляцією, газо- та оливонаповнених кабелів йде на спад, розробляються і впроваджуються значно простіші за конструкцією і технологією виготовлення високовольтні кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену, хоча, враховуючи ресурс паперовооливної кабельної ізоляції, вона широко розповсюджена в існуючих кабельних мережах і ще довго буде експлуатуватися.

Картон. Відрізняється від паперу товщиною, що сягає 0,1 – 3 мм. Тонкі картони (до 0,8 мм) випускають в рулонах, при більшій товщині – в листах.

Виготовляють двох типів: призначений для роботи на повітрі *пружний* картон, з якого виготовляють гільзи для пазів електромашин, каркаси котушок, прокладки, використовують в сухих трансформаторах, та *оливний* – пухкіший і м'якший, що призначений для роботи в трансформаторному маслі трансформаторів, олиобар'єрних введів високої напруги тощо. Випускають також картон з ганчір'я, що має підвищені механічні та електричні властивості, але має більш високу вартість.

Мікалентний папір із слюди. Застосовується для виготовлення гнучкої слюдяної стрічки шляхом нанесення меленої слюди на бавовняну стрічку (товщина 20 мкм, ширина 450 або 900 мм). Застосовують також як скріплюючі прокладки, захисні обгортки.

Фібру виготовляють з тонкого паперу, який пропускають через теплий розчин (50°С) хлористого цинку (ZnCl₂), намотують на сталевий барабан до одержання шару потрібної товщини, потім зрізують з барабану промивають водою та пресують. Випускають в листах товщиною 0,1...25 мм, а також у вигляді труб. Розмочену в гарячій воді фібру можна формувати. Піддається механічній обробці. Недолік: висока гігроскопічність, яка частково усувається просочуванням трансформаторною оливою, парафіном. Під дією електричної дуги фібра розкладається, виділяє велику кількість газів, що сприяє гасінню дуги, а тому фібру застосовують для виготовлення трубчастих розрядників, а також для пазових клинців низьковольтних електромашин, прокладок, щитів тощо.

Довговолонисті матеріали отримують методом прядіння ниток з довговолонистої бавовняної чи шовкової сировини або методом витягування синтетичної нитки з розплаву полімеру. Товщина нитки оцінюється в тексах – г/км (в системі СІ – кг/м). В електроізоляційній техніці пряжу використовують для ізоляції обмоткових проводів і для захисту ізоляції шнурів, проводів та кабелів шляхом обплітання і, при необхідності, наступного просочення лаком, компаундом чи іншою просочувальною композицією для підвищення механічної міцності і вологостійкості.

З ниток також виготовляють тканини, що мають в порівнянні з паперами більшу механічну міцність. Тканини, що використовуються в електроізоляційній техніці, відрізняються способом переплетення ниток і товщиною: шифони – товщина 0,15 мм, батист – 0,12 мм, бязь – 0,4 мм. Виготовляють також *стрічки* шириною 10 – 60 мм: кіперні – з діагоналевим переплетенням товщиною 0,45 мм, міткалеві – 0,12 мм, батистові – 0,12 мм.

Слід відзначити, що натуральний шовк на сьогодні вже майже не застосовується, використовуються *штучні волокна*, до яких відносяться віскозний та ацетатний шовки, що виготовляється з ефірів целюлози. Штучний шовк товстіший за природний. Електроізоляційні властивості віскозного шовку не вищі ніж у бавовняного волокна, ацетатного – трохи кращі.

Синтетичні волокна виготовляють з лавсану, нейлону, капрону, поліетилену, полівінілхлориду.

Лакотканини – це тканина, що просочена електроізоляційним оливним (світлі лакотканини) чи оливно-бітумним (чорні лакотканини) лаком. Випускають в рулонах 700 – 1050 мм. Використовують для ізоляції в електричних машинах, апаратах, кабельних виробках у вигляді обмоток, прокладок, виготовляють лаковані електроізоляційні трубки.

Лакотканини за нагрівостійкістю відносяться до класу А. Розрізняють лакотканини бавовняні та шовкові. Останні дорожчі, але тонші, мають більшу електричну міцність 55...90 МВ/м в порівнянні з бавовняними, для яких вона складає 35...50 МВ/м (світлі лакотканини) і 50...60 МВ/м (чорні). Чорні лакотканини мають кращі електричні властивості, меншу гігроскопічність, стійкіші до теплового старіння, але менш стійкі до органічних розчинників.

Зараз лакотканини інтенсивно замінюються гнучкими полімерними плівками.

Лакопапери використовують як замітники лакотканин. Вони мають підвищені електроізоляційні властивості, але їх механічні характеристики гірші, ніж у лакотканин.

Липкі стрічки. Виготовляють з міткалю, промащеного липкою сумішшю з одного або з двох боків, або поліхлорвінілового пластикату з підклеюючим шаром. Товщина плівок знаходиться в межах 0,2...0,5 мм. Застосовують для ізоляції з'єднань.

Азбест – група мінералів з волокнистою будовою. Залягає в кам'янистих породах у вигляді жил товщиною від часток міліметра до декількох сантиметрів. Переваги: висока нагрівостійкість (до 400°C). Плавиться при 1150 °С. Недолік: гігроскопічний, діелектричні властивості невисокі. Не застосовується при високих напругах та високих частотах.

З азбесту виготовляють пряжу, стрічки (товщиною 0,4...0,5 мм), тканини (1,6...2,9 мм), папір (0,2...1,0 мм), картон. Застосовують *азбопапір* для міжвиткової ізоляції електромашин; *азбострічку* (клас В) як зовнішній шар ізоляції котушок електромашин; *азбоволокно* – для ізоляції нагрівостійких проводів і виробництва пластмас, *азбоцемент* – для панелей і щитів товщиною 4...40 мм.

Скловолокно виготовляють із розплавленого безлужного скла шляхом витягування через тонкі отвори (філь'єри) з подальшим замасленням, щоб волокна не злипались. Це волокно мало гігроскопічне, не змінює свої механічні властивості до 300°C.

Використовують як основний матеріал для виготовлення нагрівостійкої ізоляції. Із скляної тканини виробляють склотекстоліт, склолакотканину, склострічку та склопанчоху для ізолювання обмотувальних проводів, а також однонаправлений склопластик (стрижень) для несучого елемента полімерних ізоляторів. Як діелектрик скловолокно використовують лише в просоченому стані. Поверхнева електропровідність склотканини, покритої кремнійорганічним лаком, знижується в 10^4 раз, електрична міцність зростає в 10 раз (до 40...45 кВ/мм).

ЛЕКЦІЯ 12

12.1 МІНЕРАЛЬНІ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Мінеральні електроізоляційні матеріали можна розбити на дві групи:

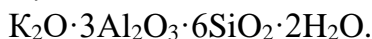
1. *Слюди* – мінерали, що мають властивість розщеплятися на дуже тонкі листочки. Недолік: присутність мінеральних або газових домішок, хвилястість, складчастість та погнутість листів.

2. *Гірські породи* (мармур, шифер, талькохлорит) застосовують у вигляді брусків, дощок, що отримують механічною обробкою вихідних матеріалів. Електричні властивості відносно невисокі, застосовують при низькій напрузі та частоті. Зараз втратили своє значення та замінюються штучними матеріалами.

12.1.1 Види, характеристика та призначення слюди

Слюда – природний матеріал з характерною шаруватою будовою, що дозволяє розщеплювати кристали слюди на листочки товщиною до 0,5 – 5 мкм, і суттєвою анізотропією властивостей. За хімічним складом слюди є алюмосилікатом лужних і лужноземельних металів. Із широкої групи природних слюд в електротехніці застосовують два види: *мусковіт* і *флогопіт*.

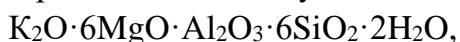
Мусковіт – калієва слюда з приблизним складом



До її складу можуть входити невеликі кількості таких окислів як Fe_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , MnO , CaO , Na_2O . Колір сріблястий, зеленкуватого або червонуватого відтінку. Тонкі листочки (0,01...0,05 мм) прозорі, мають високу гнучкість, пружність, високу міцність на розривання, хімічно стійкі до лугів і розчинників. Сірчана та хлорна кислоти розчинюють мусковіт тільки при нагріванні.

Електричні властивості: $\rho = 10^{12} - 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\text{tg}\delta = 0,0004...0,008$ при частоті 50 Гц; $E_{np} = \text{до } 250 \text{ кВ/мм}$ при товщині 0,025 мм; $\varepsilon = 6,1 - 8,4$; густина $d = 2700 - 3000 \text{ кг/м}^3$; суттєво не змінює свої механічні властивості до 500...600°C, коли починає відщеплюватися кристалізаційна вода; для зневодненого мусковіту $T_{\text{плав}} = \text{до } 1300^\circ\text{C}$.

Флогопіт (від грецького флогопос – вогнеподібний) калієво-магнезійна слюда приблизного складу



Колір флогопіту змінюється від чорного, коричневого до бурштинового та інколи сріблясто-світлого. Має меншу пружність та хімічну стійкість ніж мусковіт. Реагує з кислотами, але луки на нього не діють.

Із слюди готують сировину для електроізоляційних матеріалів. Раніше випускали слюдяні конденсатори марок КСО, КГС і СГМ, в яких застосовували мусковіт (прямокутні листочки $a = 7...60 \text{ мм}$, $b = 4...50 \text{ мм}$), з флогопіту виготовляли бокові захисні пластинки. Зараз в конденсаторах замість слюди використовують синтетичні полімери, наприклад фторопласт-4. В вакуумних приладах і зараз застосовують мусковіт.

Електричні властивості флогопіту при тих же умовах: $\rho = 10^{11} - 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\text{tg}\delta = 0,0006...0,015$; $E_{np} = \text{до } 150 \text{ кВ/мм}$; $\varepsilon = 5...7$; густина $d = 2,7...2,8 \text{ г/см}^3$. Не змінює властивостей до 800...900 °С.

Фторфлогопіт – синтетична слюда, яку, крім природної слюди, використовують в електроізоляційній техніці. Гідроксильні групи ОН у фторфлогопіті заміщені іонами фтору.

Отримують його, розплавляючи в високотемпературній печі шихту спеціального хімічного складу з подальшою кристалізацією розплаву при повільному охолодженні.

Має більшу хімічну, нагріво– та радіаційну стійкість ніж природний флогопіт, питомий опір в 15...20 раз більший ніж у флогопіту, пробивна напруга – в 1,5 рази вища, $tg\delta$ в 2 рази менший. Недолік: кристали фторфлогопіту важко розщеплюються, а тому він не може бути повним замінником природної слюди. Застосовують – для внутрішньої ізоляції в електронних лампах, нагрівостійкої ізоляції спеціальних електромашин.

12.1.2 Матеріали на основі слюди

Матеріали на основі слюди поділяють на міканіти і слюденіти.

Міканіти – матеріали, що виготовляються на основі розщепленої (скіпаної) слюди, листочки якої склеюють між собою лаками, сухою смолою інколи з застосуванням волокнистої підкладки з паперу або тканини з одного боку або з двох боків. Їх поділяють на чотири групи за товщиною. Скіпаній флігопіт за нагрівостійкістю поділяється на звичайний (150°C), нагрівостійкий (250°C) і високонагрівостійкий (450°C).

Розрізняють колекторний, формувальний, прокладний, гнучкий та термотривкий міканіти. Маркування складається з 2...3 літер та цифри:

1. Перша літера – тип міканіту – *K* – колекторний; *П* – прокладний; *Ф* – формувальний; *Г* – гнучкий; *М* – мікафолій; *Л* – стрічка.

2. Друга літера – тип слюди – *М* – мусковіт; *Ф* – флігопіт; *С* – суміш мусковіту та флігопіту.

3. Третя літера або цифра – вид клеючої речовини та додаткові характеристики матеріалу.

Колекторний міканіт – застосовують для ізоляції колекторних пластин в електричних машинах. При виготовленні вводять 4...6% зв'язувальної речовини (гліфталева або інша смола, шелак). Після склеювання піддають неодноразовому гарячому просоченню, фрезеруванню та шліфуванню для одержання заданих розмірів. Швидкість стирання колекторного міканіту співпадає з швидкістю стирання мідних колекторних пластин, що дозволяє уникнути проточування колектора в процесі експлуатації машини.

Формувальний міканіт – листи товщиною від 0,1 до 0,5 мм з вмістом слюди 80 – 95%, решта в'язуча речовина. Використовують для виготовлення колекторних манжет (ізоляція колектора від валу електромашини), фланців, каркасів котушок, трубок та інших фасованих виробів.

Мікафолій – різновид формувального міканіту, що має з одного боку підкладку з паперу, склотканини або склосітки. Вміст слюди більше 50%. Випускають мікафолій товщиною від 0,15 до 0,3 мм в листах або рулонах. Електрична міцність мікафолію з міканіту 15 – 16 кВ/мм, з флогопіту – 13 кВ/мм.

Застосовують для виготовлення твердої ізоляції стрижнів якірних обмоток електромашин високої напруги.

Прокладний міканіт – вміст зв'язувальної речовини до 20%. Виготовляють електроізоляційні прокладки, шайби.

Гнучкий міканіт товщиною від 0,15 до 0,5 мм виготовляють з використанням оливо-бітумних, оливо-гліфталевих та кремнійорганічних лаків. Вміст слюди 75...90% (з підкладкою – не менше 50%). Застосовують для ізоляції міжкотушечних з'єднань в машинах високої напруги та для ізоляції апаратів спецпризначення.

Мікастрічка – різновид гнучкого міканіту, має підкладку з паперу, склотканини чи склосітки з одного чи обох боків. Пластинки слюди з наклеюються з перекриттям на 1/3. Є основною ізоляцією обмоток великих електричних машин високої напруги. Зберігають у закритій тарі в парах відповідного розчинника.

Термотривкий (нагрівостійкий) міканіт – застосовують в електронагрівальних приладах. Виготовляють з флогопіту, який склеєний неорганічним зв'язувальним – розчином фосфорнокислого амонію.

Мікалекс – твердий матеріал темно-сірого кольору, що складається із порошкоподібної слюди та легкоплавкого борно-свинцевого або борно-барієвого скла (до 40%). Отримують при температурі розм'якшення скла близько 600 °С і тиску 50 – 70 МПа.

Випускають мікалекс у вигляді листів або стрижнів різного перетину, з яких методами різання, фрезерування та свердління отримують вироби, такі як панелі потужних ламп, каркаси котушок індуктивності, плати перемикачів тощо. Використовують також для запресування металевих частин, що вимагають ізоляції їх від інших металевих частин обладнання.

12.1.3 Слюденіти та слюдопласти, їх застосування

Трудомісткість виготовлення щипаної слюди, а також велика кількість відходів, призвели до розробки нових матеріалів – слюдяного паперу. Два основних види слюдяного паперу це *слуденіти* та *слюдопласти*.

Слюденіти (за кордоном мають назву *самика*) отримують за таким технологічним процесом: мусковіт піддають термообробці при температурі до 900°С, зневоднені кристали слюди, що втратили цілісність, обробляють лугами та кислотними розчинами і промивають, отриману пульпу відливають на сітку папероробної машини і отримують слюденітовий папір товщиною 10 – 150 мкм або слюдопластовий – товщиною 40 – 200 мкм ($E_{np} = \text{до } 20 \text{ МВ/м}$) і потім просочують його в'язучою речовиною на основі епоксидної, кремнійорганічної чи іншої смоли. Недоліки: понижена вологостійкість, низькі механічні властивості при розриванні. Слюдопласти мають більшу механічну міцність і стійкість до часткових розрядів, ніж слуденіти.

Якщо до слуденітів чи слюдопластів з однієї чи з обох сторін підклеїти підкладку, то дані матеріали будуть заміниками міканітів. Практично у всіх типах електромашин з класом нагрівостійкості *B*, *F*, *H* слуденіти та слюдопласти являються основою термореактивної системи ізоляції.

12.2 СКЛО, КЛАСИФІКАЦІЯ ЗА ПРИЗНАЧЕННЯМ І ХІМІЧНИМ СКЛАДОМ

Скло – неорганічна аморфна речовина, отримана шляхом переохолодження розплаву, що включає, як правило, складну систему різних оксидів (SiO_2 , B_2O_3 + Na_2O , K_2O + CaO , BaO (крони), PbO (флінти), Al_2O_3). Якщо оксид одного елемента може утворювати скло, то він називається склоутворюючим і його назва є похідною від назви елемента, наприклад силікатне SiO_2 , борне B_2O_3 , фосфорне P_2O_5 та інші, якщо оксид вводиться у скло для придання йому якихось властивостей, то він називається оксидом-модифікатором, є також проміжні оксиди. Однак назви "молібденове", "вольфрамове", "титанове" і "платинітове" скло дані не за складом, а за можливістю впайки в скло даних металів (коефіцієнти температурного лінійного розширення скла та відповідних металів близькі за значенням).

Найпоширенішими стеклами є силікатні. За хімічним складом силікатне скло може бути розбите на три групи:

1. Лужне скло без важких оксидів (віконне, для пляшок) має малий коефіцієнт температурного розширення, стійке до термоударів, але має високу електропровідність через те, що одновалентні лужні метали, такі як натрій та калій, створюють дефекти (обривання) структури скла – просторової сітки. При одночасному введенні у склад скла двох різних лужних металів має місце нейтралізаційний або полілужний ефект, що приводить до збільшення питомого опору та $tg\delta$ на пів порядку.

2. Лужне скло з великою кількістю важких оксидів, в якому двохвалентні іони забезпечують цілісність просторової сітки, використовується як оптичне та електроізоляційне. Має високу діелектричну проникливість та малий $tg\delta$.

3. Безлужне кварцове скло використовується як термостійкий електроізоляційний і оптичний матеріал, а також для різних спеціальних цілей.

Приклад маркування скла: С50-2, де С – скло, 50 – ТКЛР· 10^7 , цифра після дефісу – порядковий номер розробки.

Властивості скла:

1. Густина – 2000 – 8100 кг/м³.

2. Механічні властивості: механічна міцність на стискування 6 – 21 ГПа, при розтягуванні – 20 – 50 МПа. Вони дуже залежать від наявності мікротріщин на поверхні скла. Після травлення скла плавиковою кислотою його механічна міцність на розтягування зростає на порядок, закалювання скла (термообробка) збільшує її до 250 – 300 МПа.

3. Теплові властивості – скло не має різко вираженої температури плавлення і його в'язкість поступово знижується при підвищенні температури від 400 до 1600°C. Температура розм'якшення стекл, при якій в'язкість досягає значення 10^7 – 10^8 Па·с дуже різна – від 300°C для лужно-боратного скла, до 1740°C – для кварцового.

При раптовому нагріванні та різкому охолодженні лужне скло розтріскується через велике значення ТКЛР, в той час як труби з плавленого кварцу, що має найнижчий ТКЛР, можуть працювати в печах у прямому контакті з розжареним ніхромом.

4. Оптичні властивості – стекла прозорі до проміння видимого спектру. Показник заломлення 1,47...1,96. Увіюлеве скло (менше 0,02% оксиду заліза) прозоре для ультрафіолету, такі ж властивості у кварцового скла. Стекла з оксидами елементів з малими атомними масами прозорі для рентгенівських променів. Стекла з оксидами важких металів, наприклад з оксидом свинцю, навпаки, інтенсивно поглинають рентгенівські промені.

Домішки оксидів модифікаторів надають склу певний колір: оксид кобальту – синій, оксид хрому – зелений, оксид урану – жовтий.

5. Гідролітичні властивості – рідке скло з великим вмістом Na_2O і K_2O розчиняється у воді, при дещо менших вмістах оксидів лужних металів це можливо тільки при підвищених значеннях тиску та температури. Але тверді стекла, що використовуються як електроізоляційні, не гігроскопічні, стійкі до дії вологи.

6. Електричні властивості стекол коливаються в дуже широких межах: $\rho=10^6 - 10^{15}$ Ом·м; $tg\delta=0,0002...0,01$; $\varepsilon = 3,8...16,2$ (для кварцу $\rho=10^{15}$ Ом·м, $\varepsilon = 3,8$; $tg\delta=0,0002$). Електрична міцність скла сильно залежить від кількості порожнин у ньому і складає близько 40 кВ/мм. Скло, переплавлене у вакуумі, має електричну міцність, що сягає 500 кВ/мм.

Типи скла:

1. *Конденсаторне скло* використовується як діелектрик в конденсаторах, що застосовують в високовольтних фільтрах, імпульсних генераторах, коливальних контурах високочастотних пристроїв. Має підвищену діелектричну проникливість та малий $tg\delta$.

2. *Встановлювальне (ізоляторне) скло* використовують для виготовлення штирьових і тарільчастих підвісних лінійних ізоляторів, прохідних, телефонних, антенних, опорних ізоляторів, герметизованих ввідів в конденсатори і електронні прилади, ізоляції мікропроводів, ізоляційних підкладок, установочних деталей, а також в інтегральних мікросхемах.

3. *Лампове скло* (для виготовлення балонів електронних, освітлювальних та інших ламп. До них висувають вимоги спікання з металами, для чого коефіцієнти температурного лінійного розширення скла та відповідних металів повинні бути близькі за значенням.

4. *Склоемалі* – легкоплавке скло для покриття різних виробів з метою захисту від зволоження, корозії, поліпшення зовнішнього вигляду. Вони повинні мати ТКЛР близький до ТКЛР матеріалу виробу. Отримують вихідний матеріал шляхом сплавлення шихти з подальшим виливанням в холодну воду тонким струменем. Отримані *фрити* розмелюють на кульових млинах в тонкий порошок. Наносять у вигляді порошку на гарячу поверхню виробу, який, розплавляючись, щільно покриває його поверхню. Склоемаль для керамічних виробів називається глазур'ю для посудної кераміки – поливою. Застосовують для покриття трубчастих резисторів, діелектриків в деяких типах конденсаторів, керамічної ізоляції.

Використовують також *скло з наповнювачем* – наприклад, мікалекс-пластмасу – продукт гарячого пресування скла та слюдяного порошку.

Скловолокно – виготовляють з безлужного алюмоборосилікатного скла шляхом витягування в довгі гнучкі тонкі нитки діаметром 4 – 7 мкм, з яких

виготовляється скляні тканини, стрічки і шланги. Використовують скловолокно також для ізоляції монтажних і обмотувальних проводів, для виготовлення склотканин, з яких виробляють лакосклотканини та склотекстоліти.

Зараз широке використання скловолокно знайшло у волоконній оптиці для виробництва світловодів, що містять декілька тисяч волокон і передають сигнали по оптоволоконних кабелях в електричному, зокрема телефонному зв'язку і в обчислювальній техніці. Зауважимо, що світловоди з меншою нагрівостійкістю можуть виготовлятися із прозорих органічних полімерів.

Ситали

Ситал (від силікат + кристал) – це непрозорий полікристалічний матеріал, отриманий способом стимульованої кристалізації стекол спеціального складу. Вони займають проміжне положення між звичайним склом і керамікою.

В залежності від фактора, що стимулює кристалізацію скла, розрізняють *термоситали* (за кордоном – пірокераміка) і *фотоситали* (фотокераміка).

При виготовленні виробів із термоситалів спочатку виготовляють готовий виріб зі скла з добавками стимуляторів, в якості яких використовують TiO_2 , FeS , фториди і фосфати лужних і лужно-земельних металів, а потім проводять двохстадійну термообробку. Спочатку нагрівають виріб до температури 500 – 700 °С і витримують до появи зародків кристалізації, а потім догрівають до 900 – 1100 °С і кристалізують матеріал до ступеня кристалізації 30 – 95%. При кристалізації можливе зменшення об'єму до 2%.

Технологічний процес виготовлення фотоситалів включає покриття заготовки трафаретом, опромінювання ультрафіолетовими променями, а потім витравлювання засвіченого покриття кислотою, що дає можливість надати виробу потрібну форму.

Електричні і теплові властивості: $\rho = 10^{10} - 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\text{tg } \delta = 0,001 \dots 0,08$; $E_{np} = \text{до } 80 \text{ кВ/мм}$; $\varepsilon = 5 \dots 7$; $TKLP = (1 - 120) \cdot 10^{-7}$; $T_p = 900 - 1300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Застосовують для виготовлення підкладок гібридних і тонкоплівкових схем, атенуаторів НВЧ приладів, стрижнів електровакуумних ламп, опор для кріплення розрядників, замість кераміки в конденсаторах. Розроблено також сегнето- і п'єзоситали, що використовуються як активні діелектрики.

12.3 ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНІ КЕРАМІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Кераміка (від грецького "керамікос" – глиняний) – неорганічні матеріали, що одержують шляхом спікання подрібнених і ретельно перемішаних порошоків різних мінеральних речовин і оксидів металів. Кераміка в загальному випадку трифазна система: основною фазою є хаотично розташовані різнорозмірні кристаліти, що склеєні між собою склофазою, а третя фаза – це пори, доля яких в добре спеченій кераміці складає від 2 до 6% (закриті пори), а в поруватій – 15 – 25% (відкриті пори).

Керамічні матеріали стійкі до старіння різного виду, мають значну нагрівостійкість, високу механічну міцність, зберігають надану їм форму при

тривалому навантаженні, негігроскопічні при закритих порах, стійкі до атмосферного впливу, мають добрі діелектричні властивості.

Недоліки: велика об'ємна усадка при випалюванні (до 20%), що ускладнює отримання виробів з заданими розмірами.

Виробництво керамічних виробів включає, як правило три, або, інколи, чотири стадії: 1) очищення, ретельне роздрібнення і перемішування з водою в однорідну масу; 2) виготовлення заготовки виробу методом формування, пресування, видавлювання, пластичного штампування або лиття з відповідними розмірами, що враховують усадку в процесі випалювання; 3) сушіння, глазурування і випалювання. В деяких випадках для зменшення усадки проводять попереднє випалювання кераміки, а потім її подрібнення і формування виробу з подрібненої кераміки.

Всі електрокерамічні матеріали за їх застосуванням поділяються на *установлювальну, конденсаторну і сегнетоелектричну*.

До *установлювальної* відносять електропорцеляну, радіопорцеляну, ультрапорцеляну, стеатит та інші, з неї виготовляють ізолятори високої та низької напруги, каркаси котушок, лампові панелі.

Конденсаторна кераміка має значну відносну діелектричну проникність (20...300).

Сегнетокераміка має діелектричну проникність, що сягає 1500...4000. Її використовують для виготовлення керамічних конденсаторів, діелектричних резонаторів тощо.

12.3.1 Характеристики керамічних діелектриків

Електротехнічна порцеляна – складається із каоліну, кварцу та польового шпату. Ретельно подрібнені складові частини порцеляни перемішують з невеликою кількістю води. З цієї маси різними способами (обточуванням, пресуванням, відливанням у форми, видавлюванням через отвори) одержують вироби потрібної форми, сушать, глазурують і випалюють.

Для *випалювання* потрібен невеликий час витримки виробу при температурі 1300 – 1400°C, але підйом температури повинен бути повільним, щоб уникнути пошкодження виробу водяною парою та газами, що бурно виділяються при нагріванні, а також потрібне повільне охолодження виробу, щоб не виникали недопустимі термомеханічні напруження і тріщини.

При випалюванні легкоплавка складова частина (польовий шпат) міцно з'єднує частинки кристалів муліту $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ та кварцу. Таким чином, порцеляну можна розглядати як скло, що має кристалічний наповнювач, при наявності деякої кількості пор.

Часто властивості порцеляни формуються всіма трьома фазами. Кристалічна фаза, як основна за об'ємом, відповідає за значення інтегральних величин, таких як ТКЛР та відносна діелектрична проникність, аморфна – за температуру спікання та електропровідність, кристалічна і аморфна – за діелектричні втрати. Електрична і механічна міцності залежать від розміру пор, хімічного складу й розміру кристалічних зерен.

Глазурування – нанесення тонкого шару глазури, спеціального керамічного матеріалу з більш низькою температурою спікання, що після випалювання (для склоемалей при 560 – 710 °С) перетворюється у блискуче скловидне покриття. Вона покращує зовнішній вигляд виробу, надає йому певний колір, підвищує механічну міцність на 15 – 20%, заповнює тріщини на поверхні порцеляни, забезпечує практично нульове водопоглинання.

Основні властивості порцеляни: $\rho=10^{11}-10^{13}$ Ом·м; $\varepsilon=5...7$; $tg\delta=0,025-0,035$; $E_{np}=25-30$ кВ/мм; $d=2300-2500$ кг/м³; водопроникність – відсутня; гранична міцність: при розтягуванні 35 – 55 МПа, при згинанні 80...100 МПа; при стисканні 400 – 500 МПа; $\sigma_{уд} = 1,8-2,2$ кДж/м².

З порцеляни виготовляють ізолятори високої напруги лінійні (підвісні та штирові), ізолятори високої напруги станційні та апаратні, лінійні та штирові, ізолятори низьковольтних мереж, установлювальну кераміку та інше.

Для ізоляторів найважливішою характеристикою є *розрядна напруга*, при прикладанні якої між електродами ізолятора (провід і шапка чи штир) виникає електричний розряд (ізолятор перебивається). Визначають розрядну напругу шляхом випробувань, при цьому слід розрізняти два види випробувальної напруги:

- *сухорозрядну* – розряд відбувається в нормальних умовах;
- *мокророзрядну* – розряд під штучним дощем.

Пробивна напруга ізолятора – мінімальна напруга, при якій відбувається пробій товщі ізолятора між електродами, повинна бути в 1,6 раз вища, ніж сухорозрядна. Для прикладу, лінійний ізолятор на 10 кВ має сухорозрядну напругу 53 кВ, тобто пробивна напруга його повинна бути не менше 84,8 кВ, що практично в 8,5 раз перевищує номінальну напругу.

Радіопорцеляна – це порцеляна, в яку введені домішки (карбонати барію, цирконію), що підвищують її електричні та механічні властивості.

Ультрапорцеляна на відміну від радіопорцеляни характеризується значним вмістом Al₂O₃, має при радіочастотах $\rho=5\cdot 10^{11}$ Ом·м; $\varepsilon=7...8$; $tg\delta=0,001$; $E_{np}=до 20$ кВ/мм. Механічна міцність на розтягування в 2 рази, а на згинання в 4 рази більша, ніж у звичайної ізоляційної порцеляни. Зміна температури дуже мало впливає на властивості, але при підвищеній температурі помітно зменшується електрична міцність і питомий об'ємний опір. З ультрапорцеляни виготовляють опорні, прохідні та підвісні антенні ізолятори, різні плати та втулки.

Стеатит – високовольтна кераміка підвищеної механічної міцності. Виготовляється на основі тальку 3MgO·4SiO₂·H₂O з додаванням глинистих речовин (до 10%) та оксиду барію (до 15%). Тальк полегшує пресування, а оксид барію, як зерногранична фаза, зменшує діелектричні втрати, що зростають внаслідок введення глини. Основними компонентами стеатиту є кліноенстатит (метасилікат магнію) MgO·SiO₂ і муліт 3Al₂O₃·2SiO₂. Стеатит не потребує глазурування. Технологія виготовлення виробів із стеатиту складніша, ніж з порцеляни, і вимагає вищої температури випалювання.

Основні властивості стеатиту: $\rho=10^{12}$ Ом·м; $\varepsilon=5...7,5$; $tg\delta=0,002-0,003$; $E_{np}=25-30$ кВ/мм; механічна міцність при розтягуванні $\sigma_p=45-60$ МПа, при

згинанні $\sigma_3 = 100 \dots 160$ МПа; при стисканні $\sigma_c = 500 - 700$ МПа; ударна в'язкість $\sigma_{уд} = 2,2 - 2,6$ кДж/м, ТКЛР = $(3 - 8) \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

Використовують стеатит у тих випадках, коли потрібна висока механічна міцність, також при виготовленні височастотних високовольтних ізоляторів.

Кордієртова кераміка – термо- і дугостійка кераміка на основі алюмосилікату магнію (кордієриту) $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ з ТКЛР, що дорівнює $(0,5 - 2) \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Може бути щільною і пористою. Використовується у виробництві спеціальних ізоляторів для електронагрівальних пристроїв, дугогасильних камер, високовольтних вимикачів, пірометричних захисних трубок тощо.

В наш час продовжуються розробки нових керамічних електротехнічних матеріалів з використанням в різних пропорціях таких відомих основних компонентів, як кварц $\beta-SiO_2$, корунд $\alpha-Al_2O_3$, муліт $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, цельзіан $BaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, кліноенстатит $MgO \cdot SiO_2$, форстерит $2MgO \cdot SiO_2$, шпінель $MgO \cdot Al_2O_3$, периклаз MgO , анортит $CaO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, воластоніт $CaO \cdot SiO_2$ і циркон $ZrO_2 \cdot SiO_2$. В радіотехніці, крім розглянутих вище видів кераміки, знаходить широке застосування височастотна встановлювальна кераміка з використанням названих матеріалів. Коротко розглянемо склад і сфери використання цих діелектриків.

Стеатитова кераміка відзначається підвищеними властивостями: $\rho = 10^{14} - 10^{17}$ Ом·м, $\sigma_p = 75$ МПа, $\sigma_3 = 200$ МПа; $\sigma_c = 800$ МПа; $\sigma_{уд} = 2,2 - 2,6$ кДж/м.

Використовують для виготовлення прохідних і стрижневих підвісних ізоляторів, підкладок, ізоляційних кілець, опорних плит тощо.

Форстеритова кераміка. Особливістю форстеритової кераміки є високий питомий опір $\rho = 10^{14} - 10^{15}$ Ом·м в широкій області температур, підвищені значення ТКЛР = $(8 - 10,6) \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Близькі властивості має шпинельно-форстеритова кераміка.

Використовують для виготовлення вакуумно-щільних металокерамічних спаїв, наприклад з міддю і її сплавами.

Цельзіанова кераміка характеризується в основному електронною провідністю до 600 °С, що дозволяє використовувати її при постійній напрузі, високими значеннями ρ і $E_{пр}$, низькими – $tg \delta$, ТК ϵ і ТКЛР.

Застосовують для виготовлення каркасів високостабільних котушок індуктивності і високовольтних конденсаторів з великою реактивною потужністю.

Корундова кераміка, до якої відносяться *полікор*, *мікроліт* тощо, на 95 – 97,5% складається з корунду ($\alpha-Al_2O_3$). Вона має вміст пор до 1% і високу прозорість (до 0,9 при 1 мм товщини). До переваг цієї кераміки можна віднести особливо високу нагрівостійкість, збереження високих значень електрофізичних характеристик до 400°С і механічних до 1600°С. До недоліків відносяться дуже висока температура випалювання 1800 – 2060°С, мала пластичність вихідної маси і відповідно, складність виготовлення виробів складного профілю.

Застосовують для виготовлення нагрівостійких діелектричних підкладок мікросхем, високотемпературних вікон, що витримують високий тиск, інфрачервоних лінз в головках наведення ракет, колб металогалогенних ламп, лазерних пристроях тощо.

Заслужують на увагу і інші *чисто оксидні діелектрики*, яким в останні роки приділяється увага.

Оксид берилію BeO має рекордну для діелектриків теплопровідність, до $215 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$, що вище, ніж у алюмінію, а тому, незважаючи на токсичність використовується для підкладок енергонасичених інтегральних схем, в конструкціях потужних транзисторів.

Оксиди магнію MgO і кальцію CaO можуть працювати як електроізоляційні матеріали при високих температурах, наприклад периклаз (порошкоподібний MgO) використовують як ізоляцію в тенах (трубчастих нагрівачах).

У випадку надпотужних теплових потоків і особливих вимог до термостійкості матеріалів використовують оксид торію ThO_2 , що має найвищу температуру плавлення серед оксидів ($3350 \text{ }^\circ\text{C}$). В останні роки також зростає увага до використання як діелектриків ковалентних безкисневих високотемпературних сполук, таких як нітриди бору, алюмінію та кремнію.

Оксид цирконію ZrO_2 при високих температурах має дуже низький для діелектриків опір, що дозволяє, після попереднього прогрівання приблизно до 900°C , використовувати його як високотемпературний нагрівач. Основний недолік цього матеріалу в розтріскуванні при охолодженні.

Конденсаторна кераміка поділяється на низькочастотну та високочастотну.

До низькочастотної конденсаторної кераміки належать діелектрики з високими і надвисокими значеннями відносної діелектричної проникності від 900 до 9800 і помітними діелектричними втратами, $tg\delta$ їх знаходиться в межах $2\cdot 10^{-3} - 5\cdot 10^{-2}$ (нагадуємо, що діелектричні втрати пропорційні добутку $\varepsilon\cdot tg\delta$, а тому саме завдяки високим значенням ε низькочастотна конденсаторна кераміка має значні діелектричні втрати) і невеликими значеннями електричної міцності 4 – 15 кВ/мм. Її синтезують з чистих оксидів стронцію, вісмуту, титану, олова з добавками оксидів цинку і марганцю, наприклад основу кераміки СВТ (стронцій – вісмут – титан) складають титанати стронцію і вісмуту. До складу високочастотної кераміки для надання їй потрібних властивостей вводять оксиди олова і металів II і III груп періодичної системи елементів.

При використанні низькочастотної кераміки виділяють такі групи:

1. *Перовськітна кераміка $CaO\cdot TiO_2$* з різко падаючою температурною залежністю діелектричної проникності застосовується для виготовлення контурних і роздільних конденсаторів, від яких не вимагається стабільність частоти.

2. *Титаново-цирконієва термокомпенсуюча кераміка* використовується для виготовлення термокомпенсуючих конденсаторів, що застосовуються у тих випадках, коли при нагріванні збільшуються параметри (R, L) контуру.

3. *Станатна (олов'яна) кераміка* – термостабільна кераміка, що відзначається незначною зміною величини діелектричної проникливості при зміні температури і застосовується для виготовлення конденсаторів високої стабільності для коливальних контурів.

12.3.2 Активні діелектрики.

Активними (керованими) діелектриками називають діелектрики, що дозволяють, за рахунок зміни в широких межах їх властивостей в результаті дії на них електричного і магнітного полів, температури, механічної напруги, світлового потоку тощо, генерувати, підсилювати, модулювати і перетворювати електричні сигнали. Вони широко використовуються в електронній техніці, але не в електротехніці, а тому ми пропонуємо тільки огляд їх деяких найосновніших властивостей.

До активних діелектриків належать сегнето-, п'єзо- і піроелектрики, електрооптичні матеріали, матеріали для активних елементів твердотільних лазерів, рідкі кристали, люмінофори, електрети.

Сегнетоелектрики перш за все мають спонтанну поляризацію, що виникає за рахунок взаємодії і упорядкування електричних моментів її частинок, що супроводжується поляризацією без дії зовнішнього поля в межах невеликих макрообластей – доменів. Орієнтація окремих доменів в сегнетоелектрику у відсутності зовнішнього поля один по відношенню до іншого під 90° і 180° , і сумарний електричний момент нульовий. В слабкому електричному полі відбувається орієнтація електричних моментів доменів по полю, в основному за рахунок переходу частинок в орієнтовані по полю домени від доменів, що не орієнтовані по полю. В сильному електричному полі окремі домени можуть змінювати орієнтацію без перебудови, що супроводжується клацанням Баркгаузена.

Сегнетоелектрики (зараз їх відомо більше 500) можуть бути двох типів: іонні з нецентросиметричною кристалічною ґраткою типу перовськіту, до яких відносяться, наприклад, титанати барію BaTiO_3 , а також свинцю і кадмію, ніобат калію KNbO_3 , йодат калію KJO_3 та ін. При температурі, нижчій температури Кюрі, в такій ґратці є кілька рівноважних, зміщених відносно центру ґратки положень, які може займати іон титану (ніобію, йоду), створюючи електричний момент. Взаємодія електричних моментів сусідніх ґраток приводить до їх паралельного розташування, тобто до виникнення спонтанної поляризації.

Сегнетоелектрики другого типу – дипольні, такі як сегнетова сіль, триґліцинсульфат, нітрит натрію та ін. В кристалічній ґратці таких сегнетоелектриків є два рівноважних положення, які може займати атом чи група атомів, створюючи електричний момент, взаємодія яких і приводить до спонтанної поляризації.

Відносна діелектрична проникність сегнетоелектриків має різку зростаючу залежність від температури до температури Кюрі, де вона може приймати значення понад 10000. При температурі Кюрі спонтанна поляризація руйнується, сегнетоелектрик переходить в параелектричний стан і діелектрична проникність далі гіперболічно спадає з температурою. В сегнетоелектричному стані електричні моменти сусідніх молекул розташовані упорядковано, в параелектричному – хаотично. Тому перехід від сегнетоелектрика до параелектрика в точці Кюрі називають переходом "порядок – безпорядок".

Додавання до титану барію різних домішок дає можливість зміщувати точку Кюрі. Температурний коефіцієнт відносної діелектричної проникності при робочій

температурі може мати позитивний чи негативний знак в залежності від того до, чи після точки Кюрі вона знаходиться, що використовується в термокомпенсаційних конденсаторах.

Для розмивання гострої температурної залежності ε_r в районі точки Кюрі застосовують сегнетоелектричні розчини – суміші сегнетоелектриків з різною температурою Кюрі. Така *сегнетокераміка* в області робочих температур має такі характеристики: $\rho = 10^9 - 10^{11}$ Ом·м, $\varepsilon_r = 900 - 7500$, $\text{tg}\delta \leq 0,005 - 0,03$, $E_{np} \geq 2,5 - 4$ кВ/мм (при постійній напрузі).

Застосовують сегнетокераміку для виготовлення низько- і високовольтних конденсаторів, що працюють в інтервалі температур $35 \pm 10^\circ\text{C}$.

Електрична індукція D в сегнетоелектриках має нелінійну гістерезисну залежність від напруженості електричного поля, але використовувати цю залежність для електричної пам'яті в обчислювальній техніці, по аналогії з феромагнетиками, заважає досить висока напруга, необхідна для перемикання, що приводить при звичайних для цифрової техніки напругах до важко реалізовуваної у випадку керамічних речовин необхідної товщини сегнетоелектрика 10 мкм, а також старіння сегнетоелектрика в неробочому стані та втота, що обмежує кількість перемикань числами $10^7 - 10^9$.

Нелінійність залежності $D(E)$ приводить до екстремальної залежності $\varepsilon_r(E)$, яка використовується у *варикондах* – конденсаторах, ємність яких залежить від прикладеної напруги. На практиці застосовують ефективну і реверсивну нелінійності.

У першому випадку нелінійність ε_r кількісно характеризується коефіцієнтом ефективної нелінійності

$$K_{\text{эф}} = \varepsilon_{\text{max}}/\varepsilon_n$$

де ε_{max} – максимальне, ε_n – початкове значення ε_r . Він може приймати значення від 1 до 50. Максимальне значення ε_{max} для матеріалу ВК-6 сягає 100000, проте є температурно нестабільним.

Використовують ефективну нелінійність у стабілізаторах змінної напруги, пристроях іскрогасіння, для підвищення контрастності в електрооптичних приладах зображення, в індикаторах і телеекранах.

Реверсивна нелінійність – це зміна відносної діелектричної проникності у змінному полі іншим, керуючим полем, що може бути постійним або мати нижчу частоту в порівнянні з основним полем.

Реверсивну нелінійність сегнетоелектриків використовують в діелектричних підсилювачах, стабілізаторах напруги та пристроях автоматики. Слід відзначити, що такі ж функції, а також електричні резонатори та лінії передачі, комутатори, низькошумні параметричні підсилювачі, ЧМ-генератори й інші частотокеруючі пристрої можна реалізувати і на параелектриках (за точкою Кюрі).

П'єзоелектрики – це речовини, поляризація яких викликає механічну деформацію (зворотний п'єзо ефект) і навпаки, механічна деформація приводить до виникнення поляризації (прямий п'єзо ефект).

Зазначимо, що будь-який діелектрик при поляризації в електричному полі деформується, причому ця деформація x квадратична відносно поляризованості P

$$x = QP^2,$$

де Q – коефіцієнт електрострикції.

Але в нецентросиметричних кристалах існує лінійний зворотний п'єзоелектричний ефект

$$x = dE,$$

де d – п'єзоелектричний модуль.

Для прямого п'єзоелектричного ефекту для поляризованості маємо

$$P = d\sigma,$$

де σ – механічне напруження.

Одним з широко застосовуваних п'єзоелектриків є кварц, що використовується як задавач частот в прецизійних генераторах напруги, що застосовуються в радіолокації, радіотехніці, обчислювальній техніці, електронних годинниках тощо.

Поляризованість сегнетоелектриків у відсутності електричного поля дорівнює нулю і вони не мають п'єзоелектричних властивостей. Для надання сегнетокераміці п'єзоелектричних властивостей її поляризують: витримують у сильному електричному полі (2 – 4 кВ/мм) при температурі 100 – 150 °С, як правило в середовищі кремнійорганічної оливи, протягом однієї або кількох годин, а потім охолоджують під напругою. В результаті сегнетокераміка перетворюється в анізотропну речовину – текстуру з залишковою поляризованістю і стає п'єзоелектричною.

Залежно від використання п'єзокерамічні матеріали згідно з ГОСТ 13927 поділяють на чотири класи.

До першого класу належать сегнетом'які п'єзоелектричні матеріали, призначені для високочутливих п'єзоелементів для приймання слабких сигналів. Визначальним параметром для них є п'єзомодуль, механічні і діелектричні втрати – несуттєві.

До другого класу відносять сегнетотверді п'єзоелектричні матеріали з малим $tg\delta$ і високою механічною добротністю, що застосовують в потужних джерелах ультразвуку, в системах запалювання, п'єзодвигунах і інших електромеханічних перетворювачах.

Третій клас включає матеріали з підвищеною частотною стабільністю. Використовують для виготовлення п'єзофільтрів, у частотозадавальних генераторах тощо.

В четвертий клас входять матеріали для роботи в особливих умовах, наприклад, за межами нормального робочого інтервалу температур (– 60 – +70) °С.

Найширше використання дістала п'єзокераміка на основі цирконію, свинцю і титану (ЦТС). Використовують також титанат барію, тверді розчини титанатів барію і кальцію, барію кальцію і свинцю, монокристали сфалериту ZnS, сульфїду кадмію CdS, оксиду цинку ZnO.

Монокристали сегнетоелектриків ніобату і танталату літію зараз все ширше використовують замість кварцу. П'єзоелектричні властивості їм надають шляхом відпалювання при температурах, трохи нижчих за температуру Кюрі. Вони мають кращу широкополосність при менших габаритах, нижчий опір у смузї прозорості та вищу ізолюваність від паразитних коливань. Застосовують переважно в лініях затримування та фільтрах об'ємних і поверхневих хвиль.

Піроелектрики – це діелектрики, в процесі однорідного нагрівання (охолодження) яких, виникає поляризація. Звертаємо увагу на те, що піроефект визначається швидкістю зміни поляризованості з температурою, а тому необхідно створити механізм зміни температури, поставивши, наприклад, обтюратор на шляху випромінювання, що діє на піроелектрик.

До піроелектричних матеріалів ставляться такі вимоги:

максимальна чутливість;

мінімальна відносна діелектрична проникність для підвищення чутливості за напругою та розширення діапазону частот;

низька питома теплоємність для збільшення змін температури;

низькі діелектричні втрати на частотах модуляції випромінювання.

Піроелектрики застосовують в детекторах оптичних сигналів, теплових датчиках, системах дистанційного вимірювання температури, тепловізорах.

Всі піроелектрики, що використовуються на практиці, є поляризованими сегнетоелектриками і, відповідно, п'єзоелектриками. Тому в них можливий вторинний п'єзоелектричний ефект, коли внаслідок зміни розмірів при нагріванні виникає п'єзоелектрична поляризація.

Електрети – тверді діелектрики, що довгостроково зберігають поляризований стан і створюють у навколишньому середовищі електростатичне поле подібно тому, як постійний магніт створює навколо себе магнітне поле.

Електретний стан може утворюватися як гомозарядами в результаті електризації, коли носії заряду інjektуються в діелектрик з електрода і знак носіїв заряду відповідає полярності електрода, так і гетерозарядами, що утворилися в результаті залишкової релаксаційної дипольної чи іонної поляризації, коли їх знак протилежний полярності електрода.

На теперішній час електретний стан виявлено більш ніж у 70 діелектриків як органічних, так і неорганічних. Гомозаряд переважає у неорганічних і неполярних органічних, гетерозаряди – в органічних полярних.

Густина заряду інтенсивно спадає зразу після виготовлення електрета, а в поляризаційних може навіть змінювати знак, тому ефективність електрета оцінюється поверхневою густиною стабілізованого заряду.

До електретних матеріалів відносяться воскоподібні діелектрики і слюда, керамічні титановмісні, причому найбільший і найстійкіший заряд має перовськіт (CaTiO_3), скло, ситали, сірка, сульфід кадмію і цинку, а також органічні сполуки ароматичного ряду і синтетичні полімери, такі як політетрафторетилен, полівініліденфторид, поліетилентерефталат, полікарбонати, поліметилметакрилат, полівінілхлорид та інші.

Методи отримання електретів:

термоелектрети отримують при нагріванні, витримці і охолодженні діелектрика при неперервно діючому сильному електричному полі;

електроелектрети одержують в результаті дії сильного електричного поля на діелектрик на протязі кількох годин;

короноелектрети створюють дією на діелектрик часткових розрядів у газовому проміжку між поверхнею діелектрика і електродом, часто при зниженому тиску;

фотоелектрети – технологія їх схожа з технологією термоелектретів, але замість температури використовують світло;

хемоелектрети – електризація в сильному електричному полі в процесі хімічних перетворень, наприклад полімеризації;

радіоелектрети отримують при дії пучка прискорених електронів;

механоелектрети утворюються при дії механічних навантажень, що супроводжуються контактною електризацією внаслідок дифузії зарядів з електрода;

трибоелектрети одержують в результаті тертя, що супроводжуються контактною електризацією.

Електрети використовують як давачі або перетворювачі сигналів у дозиметрах, гігromетрах, барометрах, фокусуючих і сортувальних системах, електрометрах, фільтрах для газів, електретних конденсаторних мікрофонах, давачах тиску, вібродавачах, тахометрах тощо.

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Основна

Конструкційні та функціональні матеріали / Бабак В.П., Байса Д.Ф., Різак В.М., Філоненко С.Ф. У двох частинах. – К.: Техніка. – Ч.1, 2003.– 344 с.; ч.2, 2004. – 368 с.

Колесов С.М., Колесов І.С. Електроматеріалознавство (Електротехнічні матеріали). Підручник. – К.: "Дельта", 2008 р. 516 с.

Поплавко Ю.М., Переверзева Л.П., Воронов С.О., Якименко Ю.І. Фізичне матеріалознавство. К.: НТУУ «КПІ», 2007. – Частина 2. Діелектрики. 392 с.

Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.

Додаткова

Справочник по электротехническим материалам (Под ред. Ю.В.Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М.Тареева. – 3-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1986. –Т. I. – 367 с.; 1987. – Т. 2. – 464 с.; 1988. – Т. 3. – 728 с.

ДСТУ 2843–94.Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення.

ДСТУ 2815–94 "Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни і визначення".

ГОСТ 21515–76. Матеріали діелектричні. Терміни та визначення.

ГОСТ 22622–77. Матеріали напівпровідникові. Терміни та визначення основних електрофізичних параметрів.

ГОСТ 22265–76. Матеріали провідникові. Терміни та визначення.

ДСТУ 2725–94. Матеріали магнітні. Терміни та визначення.

ГОСТ 6581–75. Матеріали електроізоляційні рідкі. Методи електричних випробувань.

ГОСТ 6433.2–71. Матеріали електроізоляційні тверді. Методи визначення електричного опору при постійній напрузі.

ГОСТ 6433.4–71. Матеріали електроізоляційні тверді. Методи визначення тангенса кута діелектричних втрат і діелектричної проникності при частоті 50 Гц.

ГОСТ 6433.3–71. Матеріали електроізоляційні тверді. Методи визначення електричної міцності при змінній (частоти 50 Гц) і постійній напругах.