

## ЛЕКІЯ 4

### ПРОЦЕСИ В ДІЕЛЕКТРИКАХ, СПРИЧИНЕНІ ДІЄЮ ВИСОКИХ НАПРУГ

Матеріали, які застосовують при виготовленні електротехнічного устаткування, розділяють на ряд груп: провідникові, ізолюючі (ізоляційні), магнітні й напівпровідникові. Умови роботи ізолюючих матеріалів (діелектриків) в устаткуванні у більшості випадків визначають надійність його роботи.

Ізоляція струмоведучих частин може бути наступних видів: газовою, рідинною, твердою або комбінованою (змішаною) з окремих перерахованих видів. Випробування ізоляційних матеріалів у їх зазначених формах стали можливі (в історичному аспекті) лише після встановлення структури матеріалів і процесів, що виникають у речовині при прикладенні до неї електричної напруги. Процеси, що відбуваються в ізоляційних матеріалах, можуть бути пояснені виходячи з поглядів сучасної фізики на їх природу та процеси в них.

Відповідно до атомної моделі хімічних елементів нейтральний атом складається з ядра, що має позитивний заряд, і електронів, що перебувають довкола нього, та мають сумарно рівний негативний заряд. Узагальнюючи, речовина вподібнюється врівноваженій системі, у якій окремі атоми, молекули (групи молекул) електрично нейтральні. Але, якщо речовину помістити в область, у якій є зовнішнє електричне поле, тоді під впливом останнього позитивно заряджені частинки зрушаться в напрямку поля, а негативно заряджені - проти поля. При зникненні зовнішнього поля вони можуть повернутися у початкове положення (в більш загальному випадку – у положення, яке відрізняється від початкового). Подібні переміщення пов'язані з витратами енергії. Прикладом зазначених процесів може, певною мірою, служити заряд і розряд конденсатора.

У тих випадках, коли під впливом зовнішніх умов енергія, надана носієві заряду (електрону, іону), перевищить деяке граничне значення, при зіткненні носія заряду з іншими частинками, відбувається іонізація.

Практично доводиться мати справу не з однорідними діелектриками, а з технічними, які відрізняються наявністю складових структурних матеріалів, кожен з яких має власні електрофізичні характеристики.

Електропровідність діелектриків пояснюється наявністю в них деякої кількості вільних носіїв зарядів. У цьому випадку під впливом електричного поля в ізоляційному матеріалі та на його поверхні виникає струм провідності. У зв'язку з відзначеним явищем якість діелектрика можна охарактеризувати питомою об'ємною провідністю й питомою поверхневою провідністю, – величинами, зворотними відповідним питомим значенням об'ємного й поверхневого електричного опору.

Всі діелектрики можуть працювати при напругах, що не перевищують граничних значень, характерних для них у певних умовах і стані. При перевищенні таких значень настає пробій діелектрика.

## **2.1. Пробій діелектрика.**

Звичайно щільність струму провідності через діелектрик, що перебуває під напругою в робочих умовах, дуже мала. Але, при перевищенні напругою певних меж, ізоляційні властивості матеріалу погіршуються, струм різко зростає – раптово утворюється провідний канал між електродами. Таке явище називають електричним пробоем діелектрика. Значення мінімальної напруги, при якому відбувається пробій діелектрика, називають пробивною напругою  $U_{\text{проб}}$ .

Характер і причина пробою газоподібних, рідких і твердих ізоляційних матеріалів розрізняються й звичайно розглядаються порізно. Найбільш важливими факторами, що впливають на пробивну напругу всіх видів діелектриків, є: форма електричного поля, тривалість прикладення напруги, вид струму, кліматичні умови, температура, вологість, тиск для газів, тип матеріалу і його товщина (відстань між електродами).

Відповідно до просторового розподілення напруженості, яке практично визначається формою електродів та неоднорідностями діелектричного матеріалу, поле в діелектрику може бути рівномірним (однорідним) або нерівномірним (неоднорідним). Наприклад, рівномірним є поле в середній частині обкладинок плаского конденсатора. В силу різного ступеня нерівномірності поля між електродами пробивна напруга при рівних відстанях буде різною.

У неоднорідних середовищах просторове розподілення напруженості електричного поля залежить від форми й взаємного розташування електродів, від розташування граничних областей ізоляційних середовищ, а також електрофізичних характеристик останніх. На границі двох середовищ можливі різкі зміни електричного поля як за величиною, так і за напрямком.

Значний вплив на розрядні характеристики діелектрика має не тільки час дії напруги на діелектрик, але й швидкість його наростання. Звичайно розглядаються наступні випадки тривалості прикладання напруги: а) прикладення поштовхом повної імпульсної напруги із коротким (у часі) фронтом; б) плавного підйому напруги до пробою, для того, щоб можливий пробій відбувався на 10-12-й секунді; в) ступінчастого підйому напруги з витримкою на кожному етапі якогось часу (20-60 с) із тривалістю переходу від рівня до

рівня за час 1 - 10 с; г) плавного підйому напруги до певного рівня умовної напруги (випробувальної) з наступною витримкою часу на цьому рівні, наприклад, 1 хв.

При визначенні електричної міцності користуються напругою частотою 50 Гц, постійною (випрямленою) напругою та імпульсами напруги, що характеризуються швидким підйомом напруги й наступним більш плавним спаданням до нуля. Імпульсна випробувальна напруга звичайно формується розрядом конденсатора (конденсаторів) на електричний опір, що визначає форму хвилі імпульсу.

Кліматичні умови визначаються зовнішнім середовищем, в якому виконується експеримент. Вони повинні враховуватися як один з факторів, що впливають на результат випробувань.

У природі існує природний діелектрик – атмосферне повітря. Повітря, а останнім часом і ряд інших газів (водень, елєгаз, фреон та ін.) використовуються як ізолятор у багатьох пристроях високої напруги. У разі збільшення напруженості електричного поля, окремі вільні електрони в газі, які утворюються в результаті дії природних іонізаторів, прискорюються та при зіткненні з нейтральними молекулами викликають їхню іонізацію шляхом відриву електрона. Збільшення напруженості поля створює передумови для виникнення розряду й надалі пробою газу. Умовно розрізняються кілька фаз розряду між електродами в газах:

- а) тихий розряд, коли відзначаються слабке світіння газу й імпульсні кидки струму;
- б) коронний розряд, що виникає при частковому руйнуванні міцності газу в неоднорідному полі та супроводжується випромінюванням блідого фіолетового кольору;
- в) іскровий розряд – короткочасне порушення міцності газу. Характеризується яскраво-фіолетовим випромінюванням;

г) електрична дуга – повне порушення міцності газу, що можливо, якщо потужність джерела напруги достатня для підтримки розряду. Дуга має сліпуче біле випромінювання.

Виходячи із властивостей газів, установлюють розміри ізоляційних конструкцій ізоляторів, шин і проводів і т.д., які повинні забезпечити необхідну електричну міцність ізоляційного проміжку цих конструкцій. Проте залежно від того, рівномірним чи нерівномірним є поле у вказаному проміжку, підвищення прикладеної до ізоляційної конструкції напруги буде супроводжуватись певними особливостями розвитку розряду в ній.

При нерівномірному (неоднорідному) полі, наприклад для випадку електродів «стрижень – площина», при підйомі прикладеної напруги спочатку в зоні стрижня, де

спостерігається максимальна напруженість поля може виникнути корона, тоді як біля площини її не буде. І тільки подальше збільшення напруги призведе до електричного пробоя всього ізоляційного проміжку.

При рівномірному (однорідному або близькому до однорідного) полі, яке створюють системи електродів площина-площина чи сфера-сфера, підвищення прикладеної напруги до певного значення одразу призведе до електричного пробоя всього ізоляційного проміжку, проте значення  $U_{\text{проб.}}$  буде більшим, ніж для аналогічного випадку нерівномірного поля. Додатково слід зазначити, що розряд у випадку рівномірного (або наближеного до рівномірного) поля, як, наприклад, між двома сферами діаметром  $D$  при відстані між ними  $\leq D/2$ , у випадку однакових і стабільних умов має високу відтворюваність, тому такі електроди можна використовувати для вимірювань високих напруг.

Під час розробки та виготовлення ізоляційних конструкцій застосовуються рішення, які повинні забезпечити якомога більшу однорідність поля в ізоляційних проміжках електроустаткування. Але при експлуатації вказаних конструкцій можна спостерігати явища корони на обмежуючих ізоляційні проміжки металевих частинах електроустаткування, що мають локально малі радіуси кривизни поверхні, на яких відбувається концентрація електричного заряду та зростання напруженості електричного поля понад порогове значення (для повітря 24,5 кВ/см).

З додаткових факторів, що впливають на електричну міцність ізоляційного проміжку, мають наступні значення:

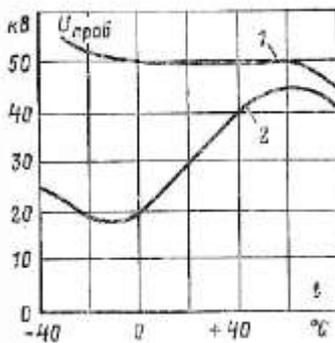
- полярність електродів, що особливо істотно при експлуатаційних випробуваннях, наприклад випробуваннях кабелів, коли слід дотримуватися певної полярності або робити випробування устаткування, заземлюючи саме ті частини, які заземлені в експлуатації;
- наявність і вплив на величину пробивної напруги місця розташування відносно одного з електродів бар'єра із твердого ізоляційного матеріалу.

Пробій газів, і зокрема повітря, вздовж поверхні твердого діелектрика – поверхневе перекриття, відбувається при більш низьких напругах у порівнянні з тим випадком, коли між електродами є тільки газ. Подібне явище має місце як при рівномірних, так і при нерівномірних електричних полях. Розрядна напруга по поверхні при постійному струмі може бути нижчою в порівнянні зі змінним струмом, що повинно прийматися до уваги при виборі розмірів конструкції, виду струму й напруги. Як показують дослідження, найбільшу роль у зниженні поверхневих розрядних напруг відіграють адсорбована діелектриком волога й дрібні дефекти поверхні, що спотворюють розподіл напруги. Якщо поверхня діелектрика (ізолятора) зволожена, то на ній утворюються провідні плівки, що значною мірою може знизити розрядну напругу.

Пробивна напруга рідких діелектриків, що одержали широке поширення в апаратах високої напруги, наприклад трансформаторних масел, значно вища, ніж для газів (оскільки рідину можна розглядати як стиснений газ при тиску порядку 200 МПа). Але, значний вплив на пробивну напругу рідких діелектриків мають домішки – зважений вуглець, волога й т.п., а також температура (рис. 2.1), форма електродів, швидкість підйому напруги, що, зокрема, важливо враховувати при випробуваннях масел. При пробі рідких діелектриків виникають хімічні реакції, продукти яких утворюють домішки, що змінюють властивості діелектрика[19].

Рис.2.1. Залежність пробивної напруги ізоляційного масла від температури.

1 - сухе масло; 2 - масло, що було у вживанні.



Якщо існує декілька теорій пробою рідких діелектриків, то стосовно пробою твердих діелектриків закономірності найбільш складні й теоретично роз'яснені не повною мірою. У твердій речовині атоми й молекули щільно упаковані (а отже зменшується довжина пробігу електронів в електричному полі), тому на розвиток процесів електричного руйнування подібного діелектрика потрібні значно більші напруженості в порівнянні з газоподібним і рідким матеріалами. Залежно від типу матеріалу, виду струму й умов випробувань прийнято розрізняти три види пробою твердих діелектриків:

а) електричний, пов'язаний зі швидким (у частку секунди) розвитком процесу, який обумовлений чисто електричними явищами руйнування. Діаметр каналу пробою звичайно відносно малий. Електричний пробій найчастіше виникає при ослабленні матеріалу за рахунок старіння або наявності місцевого дефекту;

б) тепловий, виникаючий у результаті розігріву матеріалу в електричному полі до температур, що відповідають термічному руйнуванню.

Тепловий пробій пов'язаний з надмірним зростанням струму провідності, що призводить до збільшення температури. Він виникає тоді, коли кількість тепла, що виділяється в товщі діелектрика під дією електричного поля, перевищує тепловіддачу, тобто відбувається порушення теплової рівноваги, яке веде до неспинного зростання температури.

Для теплового пробою характерний відносно повільний розвиток процесу – часом це години або дні. Канал пробою сильно обвуглений і може мати велику каверну (порожнину), якщо товщина матеріалу значна. Тепловий пробій найчастіше має місце як результат зволоження по товщі гігроскопічного матеріалу, як, наприклад, бакеліто-паперових виробів;

в) іонізаційний, пов'язаний з наявністю газових (повітряних) включень у твердому діелектрику або його шарах, у яких виникають мікророзряди, що впливають на структуру основного діелектрика, що й викликає зниження пробивної напруги.

У практиці випробувань електроустаткування досить часто доводиться зустрічатися з ізоляційними конструкціями, що мають змішані діелектрики, тобто як рідку, так і тверду ізоляцію, наприклад, у трансформаторах, вводах і т.п. В ізоляційних конструкціях зі **змішаною** ізоляцією найбільш часто виникають пробої через іонізаційні процеси, які розвиваються досить повільно.

Варто відмітити, що при визначенні характеристик пробою ізоляції елементів апаратури при рівних умовах звичайно має місце великий розкид значень пробивної напруги, який нерідко досягає 50%. Тому для одержання достовірних результатів рекомендується виконувати значну кількість вимірів, що дозволяє визначати значення пробивної напруги як середнє з отриманих відліків.

Для узагальнення, усякий ізолятор надалі можна уявляти у вигляді схеми заміщення, яка має ємність. Але оскільки в технічних діелектриках існує електропровідність, то ємність необхідно шунтувати відповідним опором. Для багатошарової ізоляції схема заміщення буде являти собою ланцюжок послідовно включених конденсаторів (плоских або циліндричних). У силу цього розподіл напруги по товщі діелектрика у разі прикладення змінної чи постійної напруги може бути різним: у першому випадку прикладена напруга на одиницю товщини буде визначатися значенням ємності цієї частини, а в другому випадку – тільки значенням опору. Отже, і випробування діелектрика залежно від виду напруги можуть бути не еквівалентні. Застосування схем заміщення виявилось досить корисним при дослідженні механізму розрядів по зовнішній поверхні діелектрика або у внутрішніх частинах, які включають порожнини.

Слід зазначити, що розподіл напруги в ланцюжку ємностей обернено-пропорційний їх значенню. Тому навіть при однорідному діелектрику у циліндричних конструкціях вводів (прохідних ізоляторів) або кабелю на одиницю товщини ізоляції буде припадати різна напруга. Найбільша напруженість поля буде біля жили кабелю або біля струмоведучого стрижня вводу.

## 2.2. Поляризація діелектриків

Поляризація діелектриків полягає в обмеженому зсуві електричних зарядів атомів і молекул (або орієнтації полярних молекул), що утворюють діелектрик, під впливом сил зовнішнього електричного поля. До поляризації діелектриків також приводять так звані абсорбційні явища у високовольтній ізоляції. Існує кілька видів поляризації.

**Електронна** поляризація обумовлена зсувом електронів відносно ядра в межах атома під впливом зовнішнього поля. Зсуву піддаються головним чином найбільш віддалені від ядра електрони, тому що вони менш міцно зв'язані й легше піддається зовнішньому впливу. Тривалість установаження електронної поляризації складає  $10^{-15} \dots 10^{-16}$  с.

**Іонна** поляризація обумовлена обмеженням зсувом іонів у кристалічних діелектриках. Цей зсув відбувається на незначній відстані від положення рівноваги й зникає при припиненні дії електричного поля. Тривалість установаження іонної поляризації трохи більша, ніж електронної, внаслідок більшої маси іонів, і становить приблизно  $10^{-13}$  с.

Розрізняють також іонно-релаксаційну поляризацію, що полягає в утворенні поляризаційних просторових зарядів усередині діелектрика за рахунок перекидання електричним полем іонів, що мають ослаблені зв'язки із сусідніми частками. Ці іони незначно зміщуються й не стають вільними, а закріплюються на деякій відстані від свого первісного положення, утворюючи в діелектрику просторовий заряд. Позитивний заряд концентрується в зоні негативного електрода, а негативний – у зоні позитивного. Відмінність іонно-релаксаційної поляризації від іонної полягає також у необоротному характері переміщення іонів. Після припинення дії зовнішнього поля іони не повертаються в первісне місце свого розташування. Іонно-релаксаційна поляризація спостерігається в кристалічних діелектриках, що мають домішки, у керамічних матеріалах та склі.

Процеси поляризації пов'язані також зі структурою молекул діелектрика. У деяких діелектриках молекули являють собою диполі, у яких центри позитивних і негативних зарядів зміщені відносно один одного. Характеристикою диполя є електричний момент  $m$ , який дорівнює добутку заряду  $q$  на відстань  $l$  між зарядами в диполі:  $m=q \cdot l$ .

При відсутності електричного поля сума дипольних моментів молекул дорівнює нулю, тому що диполі розташовані хаотично. Під дією електричного поля відбувається орієнтація диполів: їхні позитивні заряди розвертаються у бік негативного електрода, а негативні – у бік позитивного. У результаті цього сумарний електричний момент вже не буде дорівнювати нулю. Цей вид поляризації зветься дипольною, або орієнтовною поляризацією. У твердих діелектриках поворот молекул звичайно неможливий через велику щільність речовин. Однак можливий поворот дипольних груп атомів, що входять у структуру молекул, без порушення

зв'язку з молекулами. При цьому спостерігаються всі закономірності дипольної поляризації. Така поляризація виникає в органічних волокнистих діелектриках рослинного походження. Основою цих діелектриків є клітковина, у склад молекул якої входять гідроксильні групи *ОН*. Полярні молекули входять до складу ряду смол, наприклад, поліхлорвінілової. Дипольна поляризація характерна для багатьох органічних і неорганічних діелектриків.

У технічних ізоляційних матеріалах, що складаються з діелектриків з різними характеристиками, відбувається міграційна поляризація. Вона полягає в нагромадженні вільного заряду на поверхні розділу шарів. Випадком міграційної поляризації є високовольтна поляризація, що полягає в утворенні об'ємних зарядів у діелектрику й приелектродних шарах при високій напруженості електричного поля. Встановлення міграційної поляризації відбувається протягом значного часу, вимірюваного іноді десятками хвилин.

Явища міграційної поляризації в неоднорідних технічних діелектриках пов'язані із протіканням через діелектрик крім струму провідності також струму поляризації, або, як його називають, струму *абсорбції*. Струм абсорбції має найбільше значення в момент подачі напруги на діелектрик й згодом спадає. Протікання струму припиняється, коли закінчуються процеси поляризації. При постійній нарузі протікання струму абсорбції спостерігається в перший момент після його включення. При змінній нарузі він має синусоїдний характер і протікає в кожний напівперіод при черговій зміні полярності електродів. Струм абсорбції має ємнісну й активну складові. Остання пов'язана з переміщенням іонів при релаксаційній, дипольній та міграційній поляризації.

Звичайно ізоляція в електротехнічних матеріалах неоднорідна й складається з послідовності шарів, що відрізняються своїми діелектричними характеристиками. При прикладенні до ізоляції постійної напруги в ній відбуваються процеси, що полягають у нагромадженні об'ємних зарядів на поверхні розділу шарів. Ці процеси обумовлені перерозподілом електричного поля, оскільки в початковий момент прикладення напруга розподіляється у відповідності зі значеннями ємностей шарів, а в сталому режимі – активних опорів шарів.

Інтенсивність, швидкість і тривалість цих процесів визначаються діелектричними характеристиками шарів: питомими об'ємними опорами й діелектричними проникностями. Зміни цих характеристик, пов'язаних зі зволоженням ізоляції, викликають зміну інтенсивності й швидкості процесів поляризації в середині різних прошарків складного діелектрика. Безпосереднім проявом такої поляризації є струм абсорбції.

Процеси поляризації в діелектриках відбуваються протягом деякого кінцевого часу, а при прикладанні змінної напруги повторюються кожний напівперіод. Тому поляризація твердих діелектриків, в загальному випадку, – це повільний процес, порівнянний за часом

із періодом змінного струму 50 Гц або перевищуючий його, якщо ізоляція суха. При сильному зволоженні діелектрика постійна часу внутрішньошарової поляризації різко зменшується. Отже, дослідження абсорбції якоюсь мірою може характеризувати стан ізоляції. При повільній поляризації енергія поляризації повертається джерелу живлення не повністю, і частина її розсіюється у вигляді тепла. Крім зазначених витрат енергії, можливі додаткові втрати, якщо виник струм наскрізної провідності. Відображаючи описані явища, можна скласти електричну схему заміщення діелектрика (рис. 2.2)[16]. Всі втрати енергії в діелектрику, що виникають при прикладенні змінної напруги, носять назву діелектричних втрат.

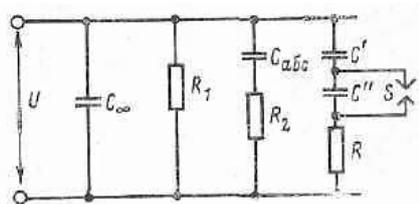


Рис. 2.2. Схема заміщення

діелектрика.

$C_\infty$  – геометрична ємність (ємність, обумовлена «миттєвими» процесами поляризації);  $R_1$  – опір наскрізної провідності;  $C_{abc}$  і  $R_2$  – ланцюжок абсорбційної складової й втрат діелектрика;  $C^I$ ,  $C''$ ,  $R$  – ланцюжок, у якому можливі втрати енергії через іонізацію при наявності іскрового проміжку  $S$  (повітряного включення).

Звичайно втрати від протікання через діелектрик струмів наскрізної провідності в порівнянні із втратами на поляризацію малі й мають значення лише при досить великому зволоженні або значних позитивних температурах. Векторна діаграма струмів, що проходять через діелектрик, при прикладенні змінної напруги представлені на рис. 2.3.

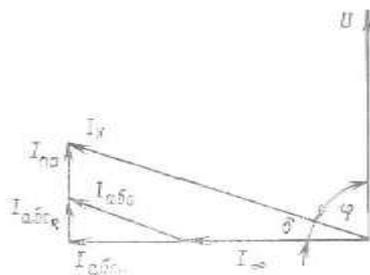


Рис.2.3. Векторна діаграма струмів у діелектрику.

$I_\infty$  – струм, обумовлений миттєвою поляризацією;  $I_{abc}$  – струм абсорбційної складової (уповільненої поляризації);  $I_{np}$  – струм наскрізної провідності.

Аналіз діаграми показує, що, діелектричні втрати обумовлюють наявність активної складової струмів  $I_a = I_{np} + I_{abc}$ , у силу чого зміщення фаз між напругою  $U$  і струмом  $I_x$  відрізняється від  $90^\circ$  на кут  $\delta$ , названий кутом діелектричних втрат. Чим більший кут  $\delta$ , тим

більша енергія розсіюється й, отже, діелектрик менш якісний, а це може викликати у свою чергу його перегрів та спричинити тепловий пробій.