

ЛЕКЦІЯ 9

3.5. Контроль стану ізоляції електрообладнання по рівню ЧР.

Одним з найпоширеніших методів діагностики стану ізоляції є метод виміру рівня часткових розрядів (ЧР). Вимір ЧР в експлуатаційних умовах істотно відрізняється від вимірів в умовах випробувальних лабораторій. У першу чергу це пов'язане з наявністю інтенсивних зовнішніх завад і корони, які, як правило, відсутні при вимірах у лабораторних умовах.

3.5.1. Основні характеристики часткових розрядів

Поняттям ЧР в ізоляції позначають низку розрядних явищ, які не відносяться до повного пробоя ізоляційного проміжку: місцевий розряд на поверхні або усередині ізоляції у вигляді корони, ковзний розряд або пробій окремих елементів ізоляції, який шунтує частину ізоляції між електродами, що перебувають під різними потенціалами.

ЧР в ізоляції виникають у місцях зі зниженою електричною міцністю (наприклад, у прошарках просочуючої рідини, або в газових включеннях у товщі діелектрика). Надалі елемент діелектрика зі зниженою електричною міцністю, що бере участь у формуванні ЧР, буде називатися «вкрапленням».

При розгляді ЧР еквівалентна схема діелектрика з ємністю C_x може бути представлена трьома ємностями (рис.3.21): C_B — ємністю елемента діелектрика, що формує ЧР (ємність включення); C_D — ємністю елемента діелектрика, включеного послідовно з першим; C_A — ємністю іншої частини діелектрика, поза включення. При цьому

$$C_x = C_A + \frac{C_B C_D}{C_B + C_D}$$

Виникнення ЧР відбудеться тоді, коли напруга на включенні (рис.3.21, ємність C_B) досягне пробивного значення $U_{в.з}$ — напруги запалювання розряду у включенні.

Так, наприклад, при включеннях у формі прошарку, витягнутого поперек силових ліній поля, напруженість у включенні E_B буде пов'язана з напруженістю в іншій частині діелектрика E_D співвідношенням

$$\frac{E_B}{E_D} = \frac{\epsilon_D}{\epsilon_B}$$

де ε_B — діелектрична проникність включення; ε_D — діелектрична проникність діелектрика.

У випадку газоподібних включень $\varepsilon_D > \varepsilon_B$ і напруженість у включенні набагато перевищує напруженість у діелектрику, тобто $E_B > E_D$.

Співвідношення між напруженістю у включенні й середньою напруженістю буде залежати від співвідношення між товщиною діелектрика й включення. Якщо ввести позначення: d_D — товщина діелектрика, розташованого послідовно із включенням (рис.3.21); d_B — товщина включення; U — напруга на електродах зразка, то для еквівалентної схеми маємо:

$$E_B = \frac{UC_D}{d_B(C_D + C_B)} = \frac{U \varepsilon_D / d_D}{d_B \left(\frac{\varepsilon_D}{d_D} + \frac{\varepsilon_B}{d_B} \right)} = \frac{U \varepsilon_D}{\varepsilon_B d_D + \varepsilon_D d_B}$$

і відношення E_B до середньої напруженості $E_{cp} = U / (d_D + d_B)$ дорівнює:

$$\frac{E_B}{E_{cp}} = \frac{1 + d_B / d_D}{(\varepsilon_B / \varepsilon_D) + (d_B / d_D)}$$

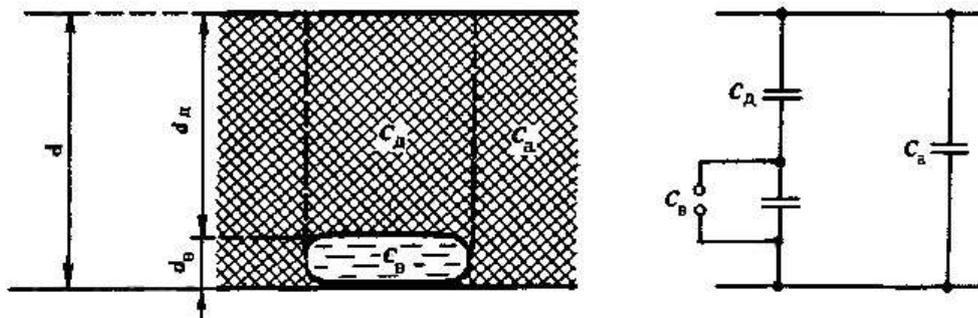


Рис.3.21. Еквівалентна схема діелектрика з включенням, де виникає частковий розряд. C_B — ємність елемента діелектрика, де виникає ЧР (ємність включення); C_D — ємність частини діелектрика, яка розташована послідовно з включенням; C_A — ємність залишкової частини діелектрика

Таким чином, відношення E_B/E_{cp} залежить від відношення d_B/d_D . Якщо $d_B/d_D \ll 1$, то $E_B/E_{cp} = \varepsilon_D/\varepsilon_B$. Для сферичного включення

$$\frac{E_B}{E_D} = \frac{3\varepsilon_D}{\varepsilon_B + 2\varepsilon_D}$$

Електрична міцність газу у включенні мало відрізняється від електричної міцності газу між металевими електродами. Якщо поле у включенні однорідне (плоскі включення, витягнуті поперек поля, або сферичні включення), то пробивна напруга пов'язана з розмірами включення (його товщиною) і тиском газу у включенні законом Пашена. Залежності пробивної напруги $U_{пр}$ від тиску газу у включенні p і товщиною включення d_v для різних газів наведені на рис.3.22. При розмірах включення порядку десятків мікрометрів і тиску, близькому до атмосферного, пробивна напруга знаходиться поблизу мінімуму кривої Пашена, слабо змінюється при зміні розмірів включення й становить приблизно 250-300 В.

При включеннях у вигляді прошарків рідкого діелектрика для визначення напруженості у включенні залишаються в силі наведені вище співвідношення. Пробивна напруженість рідкого діелектрика також істотно зростає зі зменшенням товщини включення. Як приклад рис.3.23 наведена залежність пробивної напруженості нафтового масла від товщини зазору d .

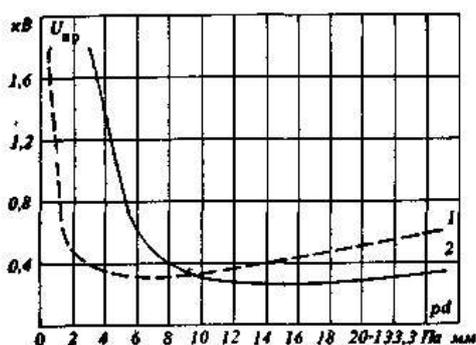


Рис.3.22. Пробивна напруга газів в залежності від тиску та відстані між електродами у рівномірному полі

1-повітря; 2-водень

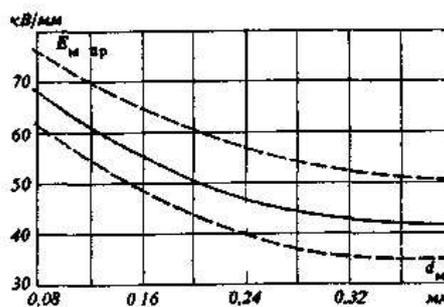


Рис.3.23. Залежність пробивної напруженості масляного проміжку від товщини для рівномірного поля в зазорі, прилеглому до електроду (штрихова лінія показує можливі розкиди пробивних напруг)

При пробі включення (ємності C_v) іони, що утворюються в процесі розряду, заряджають поверхню включення й створюють поле, зворотне по напрямку основному полю. При пробі ємності включення C_v у більшості випадків не виникає достатня щільність струму, яка необхідна для підтримки стійкого розряду, і він гасне. Утворення напівпровідного шару на поверхні включення також не може привести до підтримки розряду внаслідок незначної

ємності включення. При пробі напруга на включенні падає не до нуля, а до певного значення $U_{вг}$, при якому розряд гасне. Напруга загасання при розмірах газового включення або масляного прошарку порядку 10—100 мкм менше відповідної пробивної напруги й може бути в межах

$$U_{вг} \approx (0,1 \dots 0,9) U_{в.п.}$$

Напруга на електродах об'єкта, що відповідає виникненню ЧР, скорочено називається напругою ЧР $U_{ч.р.}$. Зв'язок між $U_{ч.р.}$ і $U_{в.п.}$ може бути встановлена з розгляду еквівалентної схеми рис.3.21:

$$U_{ч.р.} = U_{в.п.} \frac{C_D + C_B}{C_D}$$

Тривалість процесу пробою включення (тривалість ЧР) у більшості випадків досить мала — порядку $(3 \dots 10) \cdot 10^{-9}$ с. Лише при потужних критичних ЧР, що представляють собою розгалужені ковзні розряди або пробі великих (1 см. та більших) прошарків рідких діелектриків, тривалість ЧР може бути більшою (до $10^{-7} \dots 10^{-6}$ с).

Кожний з одиничних ЧР супроводжується проходженням через включення певного заряду q і приводить до зміни напруги на зовнішніх електродах усього зразка на ΔU_x .

Якщо $C_a \gg C_b$ і $C_a \gg C_d$, то заряд q , що проходить через включення в момент виникнення ЧР, дорівнює

$$q = (C_B + C_D)(U_{в.з} - U_{в.п.}) = (C_B + C_D)\Delta U_B \quad (3.4.13)$$

Практично заряд q не може бути вимірний безпосередньо, тому що його проходження пов'язане із процесами усередині діелектрика випробуваного об'єкта.

У момент виникнення ЧР можна вважати, що заряд на електродах випробуваного об'єкта не змінюється, тому що ємність об'єкта відділена від нього індуктивністю сполучних проводів (шин). Тому зміна напруги ΔU_x відбувається за рахунок збільшення ємності об'єкта при виникненні ЧР який шунтує ємність C_b в еквівалентній схемі рис.3.21.

Однак для зручності подальших міркувань можна представити, що зміна напруги на об'єкті відбувається внаслідок фіктивної зміни заряду $q_{ч.р.}$ на електродах об'єкта незмінної ємності C_x , причому $\Delta U_x = q_{ч.р.} / C_x$.

Величина $q_{ч.р}$ називається уявним зарядом ЧР. Таким чином, уявний заряд ЧР — це такий заряд, який, будучи миттєво уведений між выводами випробуваного об'єкта, викличе таку ж миттєву зміну напруги між його выводами, як і реальний ЧР. Уявний заряд виражається в кулонах.

Для встановлення співвідношення між $q_{ч.р}$ і q візьмемо до уваги, що при виникненні ЧР і зменшенні напруги на ємності C_B на $\Delta U_B = U_{ВП} - U_{ВГ}$ з ємності C_A пішов заряд на підзарядку ємності C_D , що викликав зменшення напруги на об'єкті на ΔU_x

Використовуючи умови рівності цього заряду уявному заряду ЧР маємо

$$q_{ч.р.} = \Delta U_x C_x = \Delta U_B C_D = q \frac{C_D}{C_D + C_B} \quad (3.4.14)$$

Легко показати, що (3.4.14) справедливо при будь-якому співвідношенні між C_A , C_B і C_D .

Слід зазначити, що зміна напруги на зразку звичайно вкрай незначна. Так, наприклад, при необхідності зареєструвати $q_{ч.р} = 10^{-12}$ Кл, та значенні ємності об'єкта $C_x = 1000$ пФ маємо $\Delta U_x = 10^{-3}$ В. При більших ємностях ΔU_x може бути ще меншою. Оскільки прикладена до об'єкту напруга може досягати багатьох сотень кіловольтів, то безпосередній вимір ΔU_x викликає певні труднощі.

3.5.2. Методи й схеми виміру характеристик часткових розрядів

Методи реєстрації ЧР, які описані в сучасній технічній літературі, можна розділити на дві групи.

Неелектричні методи. Реєстрація випромінювання ЧР у видимому спектрі (оптичний метод). Цей метод застосовується переважно при проведенні наукових досліджень. Він дозволяє реєструвати ЧР головним чином на краях електродів. Застосування прозорих електродів (наприклад, скла із прозорим провідним шаром) дозволяє реєструвати ЧР під електродом. Застосування фотоелектронних помножувачів дозволяє реєструвати випромінювання від ЧР до 0,001 пКл. Цей метод має високу чутливість, можливість визначити місце виникнення ЧР і достатню захищеність від електромагнітних завад.

Реєстрація ЧР усередині непрозорих ізоляційних конструкцій таким методом неможлива.

Акустичний метод. Перевага цього методу - можливість реєстрації ЧР усередині непрозорих об'єктів великої ємності, тобто там, де застосування інших методів неможливе або надто складне. Чутливість цього методу нижча, ніж в оптичного, і істотно залежить від

товщини й звукоізоляційних властивостей діелектрика. Мінімальне значення уявного заряду ЧР, що виявляють цим методом складає, 1000 пКл при товщині твердої ізоляції до 5 мм.

Спеціальні мікрофони дозволяють підвищити чутливість акустичного методу до 50 пКл і, наприклад, у силових трансформаторах або кабелях визначати місце виникнення ЧР.

Електричні методи. Чутливість цих методів вища, ніж чутливість неелектричних методів. Електричні методи можна розділити на три види:

а) Непрямі методи реєстрації ЧР. До них відносяться методи, що дозволяють визначати діелектричні втрати за допомогою виміру $\text{tg}\delta$ ізоляції або виміру вольт-кулонових характеристик і одержувати залежності $\text{tg}\delta$ від напруги. Ці методи дають уявлення про напругу виникнення ЧР (наприклад, по різкому збільшенню $\text{tg}\delta$) і про їхню потужність (по площі циклограми або по $\text{tg}\delta$). Оскільки при вимірах цим методом відбувається підсумовування різних видів втрат у діелектрику, то досить важко розмежувати втрати, викликані безпосередньо ЧР. Крім того, ці методи мають, у порівнянні з іншими, малу чутливість.

б) Реєстрація ЧР за допомогою антен. Схеми, що використовуються в цьому випадку, розраховані для роботи в діапазоні метрових або сантиметрових електромагнітних хвиль і іноді застосовуються при профілактичних випробуваннях ізоляції ЛЕП (ізоляторів і гірлянд). Є відомості відносно використання цього методу для безконтактного контролю рівнів ЧР в електричних машинах та силових трансформаторах вищих класів напруги.

в) Реєстрація імпульсів напруги, які виникають при ЧР в ізоляції. Ці схеми знайшли найбільш широке поширення, тому що дозволяють надійно вимірювати основні характеристики ЧР і забезпечити високу чутливість (мінімальний вимірюваний заряд у ряді випадків становить 10^{-12} — 10^{-13} Кл).

Надалі будуть розглянуті схеми, які відповідають цим електричним методам і, в основному, застосовуються для вимірів рівня ЧР у стаціонарних умовах лабораторій заводів-виробників. Основні варіанти схем наведені на рис.3.24. До складу кожної з них входять: джерело регульованої високої напруги – іспитовий трансформатор (ІТ); випробуваний об'єкт C_x ; сполучний конденсатор C_0 , який використовується для створення шляху замикання імпульсів струму ЧР; вимірювальний елемент z ; вимірювальний пристрій (ВП), що включається паралельно вимірювальному елементу. Між джерелом високої напруги й іншою частиною схеми в більшості випадків включається фільтр для зменшення рівня зовнішніх завад z_{ϕ} або захисний опір.

Джерело регульованої високої напруги й сполучний конденсатор не повинні мати власні ЧР. Вимірювальний елемент z може являти собою резистор (активний опір) або котушку індуктивності.

Система шин установки повинна бути виконана трубами або іншим способом, що виключає виникнення корони в повітрі або розрядів, що будуть заважати вимірам рівня ЧР в об'єкті C_x .

На рис.3.24, а) наведена схема із включенням вимірювального елемента в коло заземлення випробуваного об'єкта, на рис.3.24, б) — схема із включенням вимірювального елемента в коло заземлення сполучного конденсатора, і на рис.3.24, в) - *мостова* схема.

Залежно від характеру опору (активного або індуктивного) вимірювального елемента й місця його підключення, схеми рис.3.24 а) й б) створюють аперіодичні або коливальні імпульси.

В мостовій схемі (рис.3.24, в) рекомендується застосовувати вимірювальний елемент, що складається із двох регульованих малоіндуктивних активних опорів.

Активний опір рекомендується використовувати при застосуванні широкосмугового вимірювального пристрою; котушку індуктивності — при застосуванні вузькосмугового вимірювального пристрою. Між вимірювальним елементом і входом C_{BX} вимірювального пристрою ВП в ряді випадків доцільне включення (головним чином при вимірі характеристик ЧР у зразках великої ємності) узгоджувального трансформатора.

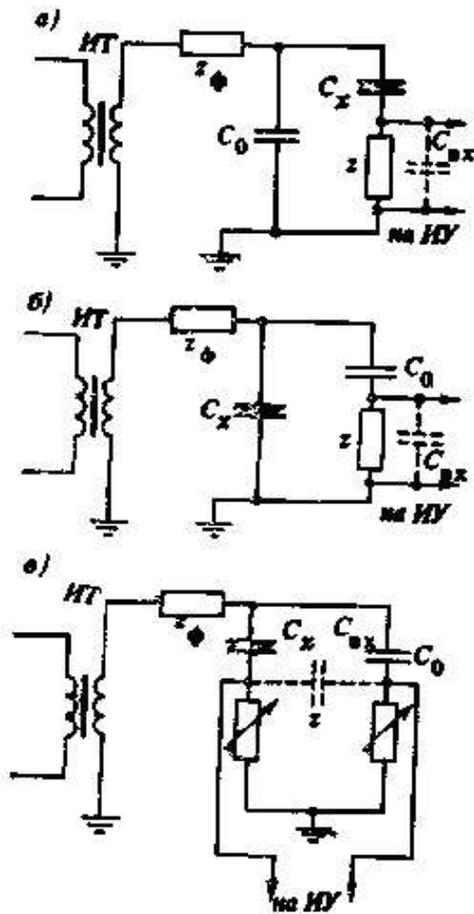


Рис.3.24. Схеми установок для вимірювання характеристик ЧР: а - послідовна; б - паралельна; в – мостова; ІУ – вимірювальний пристрій (зазвичай складається із фільтра верхніх частот та реєструючої апаратури)

При відповідному виборі параметрів схем їхні чутливості однакові. Схема рис.3.24 а) звичайно застосовується в тих випадках, коли обидва виводи випробуваного об'єкта можуть бути ізольованими від землі. В інших випадках використовується схема рис.3.24, б). Мостову схему звичайно застосовують у лабораторних умовах для зменшення впливу електричних завад при вивченні характеристик окремих елементів ізоляції.

Проблема електромагнітних завад найбільш актуальна при реєстрації слабких ЧР і особливо в об'єктах великої ємності; так, наприклад, той самий по величині ЧР буде давати сигнал на вході підсилювача, рівний 100 мВ при $C_x=100$ пкФ, 100 мкВ при $C_x=1$ мкФ і 0,1 мкВ при $C_x=100$ мкФ. Надійна реєстрація таких слабких сигналів є досить складним завданням.

Електричні завади, що іноді роблять неможливою реєстрацію ЧР, прийнято розділяти на внутрішні (залежні від напруги на зразку) та зовнішні (ті, які не залежать від цієї

напруги). До зовнішніх завад відносяться власні шуми підсилювача, електричні сигнали, наведені на елементах вимірювальної схеми (при роботі радіостанцій або сусідніх високочастотних установок) або тих, що виникли в мережі живлення. Внутрішніми завадами вважаються сигнали, викликані, наприклад, коронними розрядами, що виникають на елементах високовольтної схеми або у вводах випробовуваного об'єкту.

Одним зі способів боротьби з завадами є раціональний вибір схеми вимірів. Найбільш захищеною у цьому відношенні схемою є мостова. Вона дозволяє позбутися від більшості видів завад (крім тих, що виникають у контурі заземлення) і реєструвати ЧР навіть на імпульсній напрузі.

Принцип ослаблення сигналу від внутрішніх завад (головним чином, від корони у схемі) у мостовій схемі пояснюється рис.3.25.

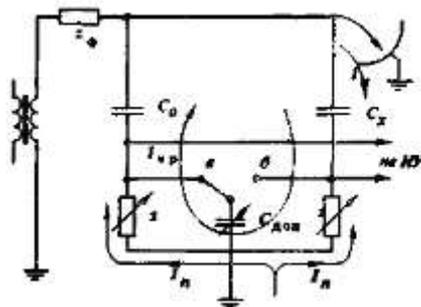


Рис.3.25. Принцип ослаблення сигналу від внутрішніх завад у мостовій схемі вимірів ЧР [26]

Оскільки джерело зовнішніх завад (наприклад, корона) має переважно ємність на землю, то струм I_n від такого джерела, замикаючись на землю, створює зустрічне спадання напруги на елементах вимірювального опору z , включених послідовно з ємностями C_x і C_0 . Опір цих елементів, а також ємність $C_{доп}$, що підключається для компенсації паразитної ємності елементів або в точці a , або в точці b , можуть бути підібрані таким чином, щоб напруга на вході вимірювального приладу (ВП) від завади була б близькою до нуля. У той же час струм ЧР $I_{ч.р.}$ викликає узгоджене спадання напруги на обох елементах вимірювального опору z , що повністю реєструється ВП.

Екранування вимірювальних проводів та шин подачі високої напруги на об'єкт також досить ефективний спосіб зменшення зовнішніх завад, що дозволяє знизити їхній вплив на 2-3 порядки. У більшості випадків екрануються не тільки ВП, але й все приміщення, у якому виконуються випробування.

Внутрішні завади, а також завади, що виникають у мережі живлення, цим способом усунути неможливо. Усунення завад від мережі живлення можливо лише при установці в

дану мережу розділових трансформаторів, фільтрів або при живленні схеми від автономної мережі.

Для усунення внутрішніх завад необхідне підвищення напруги виникнення корони на елементах високовольтної схеми шляхом збільшення діаметра проводів, згладжування гострих кутів на підвідних шинах і т.п. Застосуванням цих прийомів зменшення коронного розряду вдається підвищити робочу напругу до 900 кВ при цьому мінімальний рівень ЧР, який вдається зареєструвати складає 1...5 пКл. У ряді випадків можливо також розрізнити зовнішні й внутрішні завади по їхній полярності. Звичайно сигнали від ЧР мають однакову структуру на позитивній і негативній полярності напруги, а сигнали від корони істотно залежать від полярності: на позитивній полярності найчастіше виникають рідкі потужні сигнали від стримерної корони, а на негативній – велика кількість сигналів значно меншої амплітуди.

Одним з методів боротьби із зовнішніми завадами є реєстрація ЧР протягом невеликого проміжку часу; наприклад вимір ЧР за один напівперіод або при короткочасній подачі високої напруги. Виникнення ЧР одночасно з початком вимірів допомагає відрізнити ЧР від зовнішніх завад, однак цей спосіб неефективний, якщо ці завади мають безперервний характер.

Вплив завад може бути знижений також за допомогою відповідної методики реєстрації ЧР, наприклад: вимірювання характеристик ЧР окремо у позитивних та негативних напівперіодах; вимір максимального заряду ЧР; вимір відношення корисного сигналу та завад; реєстрація ЧР за допомогою вимірювальних пристроїв, налаштованих на різні частоти. Однак, ефективність цих заходів значно знижується, якщо завади мають електромагнітний спектр, близький до спектра ЧР (наприклад, при внутрішніх завадах).

3.5.3. Кількісні характеристики ЧР

Основними кількісними характеристиками ЧР є: уявний заряд ЧР, частота проходження імпульсів, середній струм ЧР, потужність втрат на ЧР.

Розмір уявного заряду є найбільш важливою кількісною характеристикою одиночного ЧР, що дає можливість оцінити його інтенсивність. Уявний заряд виражається в кулонах (Кл). При вимірі, як правило, знаходять найбільше значення уявного заряду одиничних ЧР, визначене за час спостереження. Звичайний рівень уявного заряду ЧР, зафіксований у справних високовольтних трансформаторах з урахуванням повітряної корони, становить при нарузі, близькій до найбільшої робочої, 10^{-8} - 10^{-9} Кл. При наявності дефектів або порушення технології виготовлення ізоляції він може піднятися до 10^{-7} - 10^{-5} Кл.

Під частотою проходження імпульсів розуміють середнє значення за 1с кількості імпульсів, уявний заряд яких перевищує деякий мінімальний рівень.

Середній струм ЧР I_{cp} — це сума абсолютних значень зареєстрованих зарядів, що проходять через ввід випробовуваного об'єкта за 1 с у результаті виникнення у ньому ЧР:

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \times \sum_1^m |q_i|$$

де T — інтервал часу підсумовування зарядів, с; q_i — уявний заряд i -го імпульсу ЧР.

Середній струм ЧР виражається в амперах.

При вимірах ЧР важливою характеристикою також є максимальний обмірюваний заряд. Для того, щоб результат вимірів був статистично достовірним, необхідно задавати певний час усереднення, щоб виключити з результату (або суттєво знизити вплив на результат) випадкових імпульсів. Тобто необхідно аналізувати тільки повторювані розряди, ігноруючи окремі викиди.

Суб'єктивним, однак, є визначення повторюваного розряду. У деяких авторів можна зустріти пропозицію вважати повторюваним такий розряд, який виникає не менше ніж 10 разів на секунду. Однак використання цього параметру для постійного моніторингу стану ізоляції може дати значні похибки, оскільки з практики відомі випадки, коли більші (за амплітудою) ЧР проявляються роками без впливу на ізоляцію, а малі, але з великою частотою повторення - означають реальну загрозу ізоляції.

За рівнем ЧР можна порахувати втрати в ізоляції. Для визначення енергії, яка вводиться через одиночний ЧР необхідно помножити його заряд на миттєву напругу на об'єкті. Далі потрібно скласти всі імпульси й одержати повну енергію. Якщо повну енергію поділити на повний час підсумовування, то одержимо потужність ЧР. Цей параметр називається потужністю втрат на часткові розряди, що враховує миттєву прикладену напругу в межах одного періоду напруги живильної мережі.

Формула розрахунку потужності:

$$P = \frac{1}{T} \times \sum_1^m |q_i| \times |V_i|$$

де:

P - потужність розрядів, Вт;

T - час спостереження, с;

m - кількість зареєстрованих імпульсів за час T ;

V_i – миттєва напруга виникнення i -го імпульсу ЧР;

q_i — уявний заряд i -го імпульсу ЧР.

Очевидно, що для такого розрахунку необхідно мати достовірний фазовий розподіл імпульсів, по якому буде визначене миттєве значення прикладеної напруги та розрахована дійсна потужність ЧР. Якщо ж виміряти фазовий розподіл достеменно неможливо, то, наприклад, у стандартах США передбачено використовувати параметр, який носить назву «інтенсивність часткових розрядів» (PDI-Partial Discharge Intensity). Для розрахунку цієї величини замість миттєвої напруги на об'єкті пропонується брати її діюче значення для всіх імпульсів. Аналіз відмінностей результатів розрахунків при цих двох підходах лежать у межах $\pm 20\%$, чого цілком достатньо, щоб коректно оцінити рівень часткових розрядів та визначитись з напрямком їх розвитку (трендом), але замало для визначення критерію оцінки деструктивних можливостей даного ЧР в даний момент часу.