

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій і систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Лежнюк П. Д.

«_____» _____ 20____ р.

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
на здобуття ступеня «магістра»

**ДІАГНОСТУВАННЯ ІЗОЛЯЦІЇ МАСЛОНАПОВНЕНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ**

08-13.МКР.009.00.144 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу ОППІ магістр,
групи ЕСМ-18м

галузь знань 14 «Електрична інженерія»

спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

освітня програма «Електричні системи і мережі»

Зарицький Р.Р. _____

Керівник: к.т.н., доцент каф. ЕСС

Собчук Н. В. _____

«_____» _____ 20____ р.

Рецензент: _____

«_____» _____ 20____ р.

Вінниця – 2019 року

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| АНОТАЦІЯ..... | 5 |
| ANNOTATION..... | 6 |
| Вступ..... | 7 |
| 1 Часткові розряди в діелектричних матеріалах..... | 10 |
| 1.1 Поняття про частковий розряд..... | 10 |
| 1.2 Основні характеристики часткових розрядів..... | 14 |
| 1.3 Часткові розряди при змінній напрузі..... | 21 |
| 1.4 Діелектричні втрати при наявності часткових розрядів..... | 26 |
| 1.5 Залежність напруженості часткових розрядів від товщини діелектрика..... | 28 |
| 2 Механізми руйнування ізоляції частковими розрядами..... | 35 |
| 2.1 Основні процеси руйнування ізоляції частковими розрядами..... | 35 |
| 2.2 Характеристики часткових розрядів, що визначає руйнування ізоляційних матеріалів..... | 41 |
| 2.3 Енергетичні характеристики руйнування ізоляційних матеріалів..... | 42 |
| 2.4 Вплив температури на електричне старіння ізоляції..... | 45 |
| 2.5 Визначення допустимих напруг..... | 46 |
| 3 Часткові розряди в маслонаповненому обладнанні..... | 50 |
| 3.1 Основні види часткових розрядів в силових трансформаторах..... | 50 |
| 3.2 Руйнування масло-бар'єрної ізоляції часткових розрядів..... | 54 |
| 3.3 Тривала міцність масло-бар'єрної ізоляції і допустимі напруженості..... | 56 |
| 3.4 Дослідження газів в маслі на основі пристрою HYDROCAL..... | 60 |
| 4 Аналіз методів, що використовуються для розпізнавання типів дефектів обладнання, за результатами аналізу розчинених в маслі газів..... | 64 |
| 4.1 Діагностичні схеми для розпізнавання типу дефекту..... | 64 |
| 4.2 Аналіз вмісту газів в обладнанні з дефектами різного типу..... | 68 |
| 4.3 Багатокритеріальний метод розпізнавання типу дефектів високовольтного обладнання за результатами аналізу розчинених в маслі газів..... | 71 |
| 4.4 Оцінка достовірності розпізнавання типу дефекту з використанням запропонованого методу..... | 76 |

| | |
|---|-----|
| 4.5. Вимірювач характеристик часткових розрядів ГЧР-201..... | 87 |
| 5. Оптимізація ізоляції силових трансформаторів..... | 100 |
| 5.1 Структура ізоляції силових трансформаторів..... | 100 |
| 5.2 Короткочасна електрична міцність маслобар'єрної ізоляції..... | 107 |
| 5.3 Тривала електрична міцність маслобар'єрної ізоляції..... | 111 |
| 5.4 Вибір допустимих напруженостей при випробувальній напрузі..... | 113 |
| 5.5 Розрахунок ізоляції силових трансформаторів..... | 114 |
| 6. Економічна частина..... | 120 |
| 6.1 Визначення кошторисної вартості ремонту основного і допоміжного енергетичного обладнання, передавальних пристроїв і споруд атомних електростанцій за однорівневою системою ціноутворення..... | 120 |
| 6.2 Загальновиробничі витрати..... | 124 |
| 7 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях..... | 134 |
| 7.1 Задачі розділу..... | 134 |
| 7.2 Аналіз умов праці при виконанні робіт, пов'язаних з обслуговуванням маслонаповненого підстанції..... | 134 |
| 7.3 Технічні рішення з безпечної експлуатації маслонаповненого обладнання..... | 135 |
| 7.4. Розрахунок кількості та опору заземлюючих електродів і напруги кроку...137 | |
| 7.5. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях..... | 139 |
| Висновки..... | 141 |
| Література..... | 142 |
| Додатки | |

АНОТАЦІЯ

Зарицький Роман Романович «Діагностування стану ізоляції маслonaповненого обладнання». Магістерська дипломна робота. – Вінниця: ВНТУ. 2019.– 143 с. Бібліогр.: 14. Іл.: 10. Табл.: 12.

Проаналізовано конструктивні особливості масла та обладнання яке діагностує його стан ізоляції. Проведено розрахунок допустимих напруг, стану ізоляції. Розглянуто причини старіння ізоляції, чинники які впливають на швидкість старіння ізоляції. Проведено аналіз небезпечних і шкідливих факторів, що впливають на персонал, що працює з високовольтним обладнанням.

Ключові слова: частковий розряд, діелектрик, масло-бар'єрна ізоляція, руйнування ізоляції, старіння ізоляції, високовольтне обладнання .

ANNOTATION

Zaritsky Roman Romanovich “I will diagnose I will become an oil-possessed possessor”. Magisterska diploma robot. - Vinnitsya: VNTU. 2019. - 143 p. Bibliogr .: 14. Il .: 10. Tabl .: 12.

The design features of the oil and the possession of the diagnosis of the mill are analyzed. Conducted rozrahunok permissible spokes, I will become izolyatsii. Causes of the old izolyatsii are highlighted, officials like to add to the old age izolyatsii. The analysis of non-supportive and secondary factors was carried out, which was spent on staff, and on the use of high-voltage possessions.

Key words: private discharge, electrician, oil bar’s isolation, ruining isolation, old isolation, and high voltage.

ВСТУП

Актуальність роботи. Під дією високої напруженості електричного поля в ізоляції в місцях зниженою електричної міцності виникають часткові розряди, які представляють собою пробої газових включень, локальні пробої малих обсягів твердого або рідкого діелектрика, місцеві розряди по поверхні твердого діелектрика. Умови виникнення часткових розрядів визначаються конфігурацією електричного поля ізоляційної конструкції і електрофізичними характеристиками (в тому числі електричної міцністю) розглянутої області ізоляції.

Часткові розряди зазвичай не приводять до наскрізного пробою ізоляції, проте призводять до місцевого руйнування діелектрика (особливо органічного) і при тривалому існуванні в певних умовах можуть привести до порушення електричної міцності ізоляційної конструкції.

Виникнення часткових розрядів завжди свідчить про місцеву неоднорідності діелектрика. У зв'язку з цим реєстрація характеристик часткових розрядів дозволяє оцінювати якість виготовлення тієї чи іншої ізоляційної конструкції і виявляти місцеві дефекти, які практично неможливо визначити звичайними випробуваннями високою напругою або вимірами будь-яких інтегральних характеристик ізоляції (тангенс кута діелектричних втрат, опір ізоляції і ін.).

Надійна робота ізоляції високовольтних конструкцій може бути забезпечена при дотриманні наступних умов:

1. Ізоляція повинна витримувати з достатньою для практики надійністю можливі в експлуатації перенапруги з урахуванням наявних захисних заходів, статистичного характеру впливають перенапруг і електричної міцності ізоляції, а також кумулятивних процесів, пов'язаних з частковим пошкодженням ізоляції при впливі перенапруги.

2. Ізоляція повинна з достатньою для практики надійністю витримувати тривалий час (протягом всього терміну експлуатації) впливає робоча напруга з урахуванням можливих його змін в допустимих межах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська кваліфікаційна робота виконана в плані наукових досліджень, проведених кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ за держбюджетними темами.

Мета і задачі дослідження метою даної магістерської кваліфікаційної роботи є аналіз конструктивних особливостей масла та обладнання яке діагностує стан його ізоляції.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язані такі основні завдання:

- проаналізовано основні характеристики часткових розрядів;
- проаналізовано характеристики часткових розрядів при змінній напрузі;
- визначено допустимі напруги, які впливають на стан ізоляції;
- розв'язані питання забезпечення безпеки праці персоналу, що обслуговує обладнання.

Об'єкт дослідження — маслонаповнене обладнання.

Предмет дослідження — впливи часткових розрядів на стан ізоляції в масло-наповненому обладнанні.

Методи дослідження. Для аналізу і розв'язання поставлених задач використані методи динамічного програмування та поконтурної оптимізації.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що :

- проведено розрахунок допустимих напруг, стану ізоляції
- розглянуто причини старіння ізоляції, чинники які впливають на швидкість старіння ізоляції.

Практичне значення отриманих результатів. Результати магістерської кваліфікаційної роботи використовуються у ВНТУ на кафедрі «Електричні станції та системи».

Особистий внесок здобувача. Усі результати, які складають основний зміст МКР, отримані автором під керівництвом к.т.н., доцента кафедри ЕСС Собчук Н.В.

Апробація результатів МКР. Результати доповідались на НТКС факультету електроенергетики та електромеханіки ВНТУ у 2018 та 2019 роках.

1 Часткові розряди в діелектричних матеріалах

1.1 Поняття про частковий розряд

При поверхневій ерозії швидкість руйнування діелектрика (ч. р.) в ізоляції охоплює місцевий розряд на поверхні або всередині ізоляції у вигляді корони, ковзний розряд або пробою окремих елементів ізоляції, шунтуюча частина ізоляції між електродами, що знаходяться під різними потенціалами.

Ч. р. в ізоляції виникають в місцях зі зниженою електричною міцністю (наприклад, в прошарках які просочені рідиною або в газових включеннях в товщі діелектрика). Надалі елемент діелектрика зі зниженою електричною міцністю, що бере участь в ч. р., буде називатися «включенням».

При розгляді ч. р. еквівалентна схема діелектрика ємністю C_x може бути представлена трьома ємностями (рис. 1.1): C_B - ємністю елемента діелектрика, який бере участь в ч. р. (ємність включення); C_D - ємністю елемента діелектрика, включеного послідовно з першим; C_A - ємністю решти діелектрика, позбавленої включень.

$$C_x = C_A + \frac{C_B C_D}{C_B + C_D} \quad (1.1)$$

При цьому виникнення ч. р. відбудеться тоді, коли напруга на включенні (рис. 1.1, ємність C_B) досягне пробивної значення $U_{в.з.}$ - напруги запалювання розряду у включенні.

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

$$\frac{E_B}{E_D} = \frac{\epsilon_D}{\epsilon_B} \quad (1.2)$$

де $\epsilon_{\text{в}}$ - діелектрична проникність включення; $\epsilon_{\text{д}}$ - діелектрична проникність діелектрика.

У разі газоподібних включень напруженість у включенні перевищує напруженість в діелектрику, так як $\epsilon_{\text{д}} > \epsilon_{\text{в}}$, то $E_{\text{в}} > E_{\text{д}}$.

Співвідношення між напруженістю у включенні і середньою напруженістю буде залежати від співвідношення між товщиною діелектрика і включення. Якщо ввести значення: $d_{\text{д}}$ - товщина діелектрика, розташованого послідовно з включенням (рис. 1.1); $d_{\text{в}}$ - товщина включення; U - напруга на електродах зразка, то для еквівалентної схеми рис. 1.1 маємо:

$$E_{\text{в}} = \frac{UC_{\text{д}}}{d_{\text{в}}(C_{\text{д}}+C_{\text{в}})} = \frac{U \frac{\epsilon_{\text{д}}}{d_{\text{д}}}}{d_{\text{в}} \left(\frac{\epsilon_{\text{д}}}{d_{\text{д}}} + \frac{\epsilon_{\text{в}}}{d_{\text{в}}} \right)} = \frac{U \epsilon_{\text{д}}}{\epsilon_{\text{в}} d_{\text{д}} + \epsilon_{\text{д}} d_{\text{в}}} \quad (1.3)$$

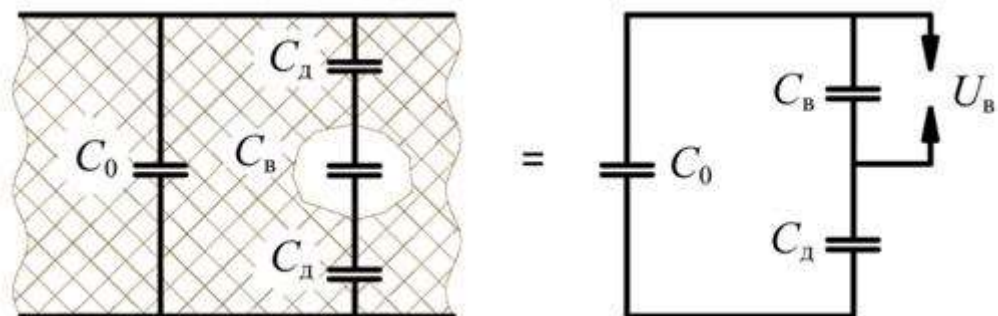


Рис. 1.1 Еквівалентна схема при розгляді ч. р. в діелектрику

$C_{\text{в}}$ - ємність елемента діелектрика, який бере участь в ч. р. (ємність включення);

$C_{\text{д}}$ -ємність частини діелектрика, розташованого послідовно з включенням;

$C_{\text{а}}$ - ємність решти діелектрика.

і відношення $E_{\text{в}}$ до середньої напруженості $E_{\text{ср}} = \frac{U}{(d_{\text{д}}+d_{\text{в}})}$ дорівнює:

$$\frac{E_B}{E_{cp}} = \frac{1 + d_B/d_D}{(\varepsilon_B/\varepsilon_D) + (d_B/d_D)} \quad (1.4)$$

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 або еліпсоїдального включення

$$E_B/E_D = 3\varepsilon_D/(\varepsilon_B + 2\varepsilon_D). \quad (1.5)$$

Електрична міцність газу при 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 при включенні законом Пашена. Залежності пробивної напруги $U_{пр}$ від тиску газу у включенні p і товщини включення d_B для різних газів наведені на рис. 1.2. При розмірах включення порядку десятків мікрометрів і тиску, близькому до атмосферного, пробивна напруга лежить близько мінімуму кривої Пашена, слабо змінюється при зміні розмірів включення і становить приблизно 250-300 В.

При включених у вигляді прошарків рідкого діелектрика для визначення напруженості у включенні залишаються в силі приведені вище співвідношення (1-2) - (1-5). Пробивна напруженість рідкого діелектрика також істотно збільшується зі зменшенням товщини включення. Як приклад на рис. 1-3 приведена залежність пробивної напруженості нафтового масла від товщини зазору d_M .

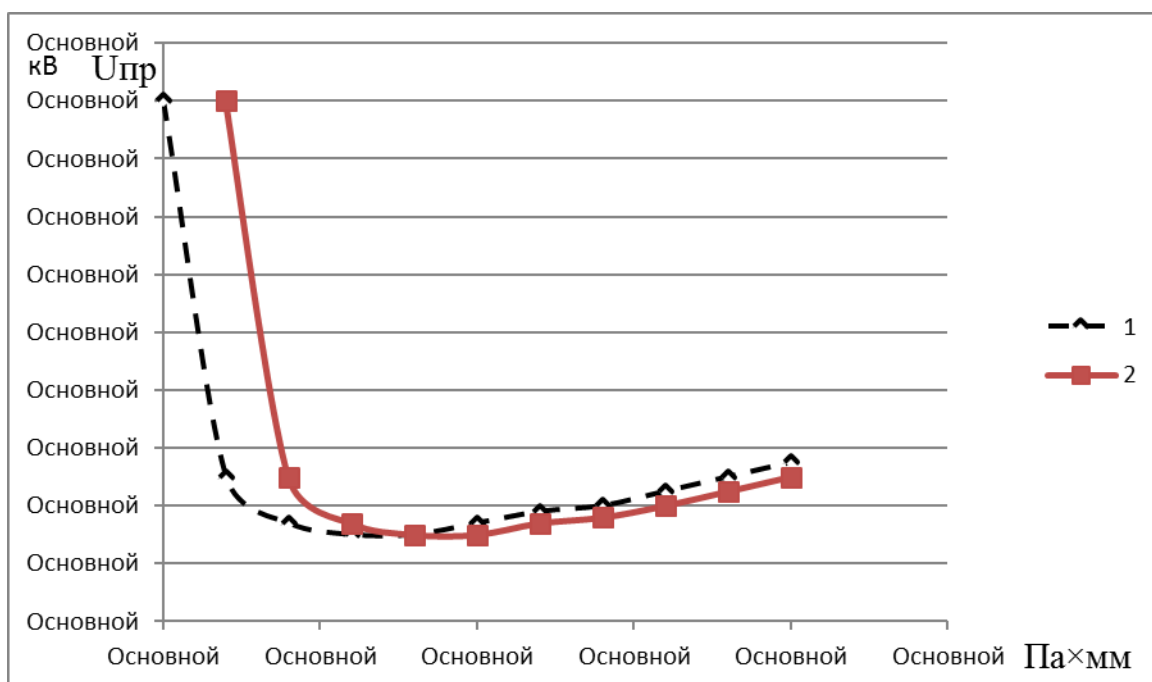


Рисунок 1.2 Пробивна напруга газів в залежності від тиску і відстанню між електродами в рівномірному полі 1- повітря; 2- водень

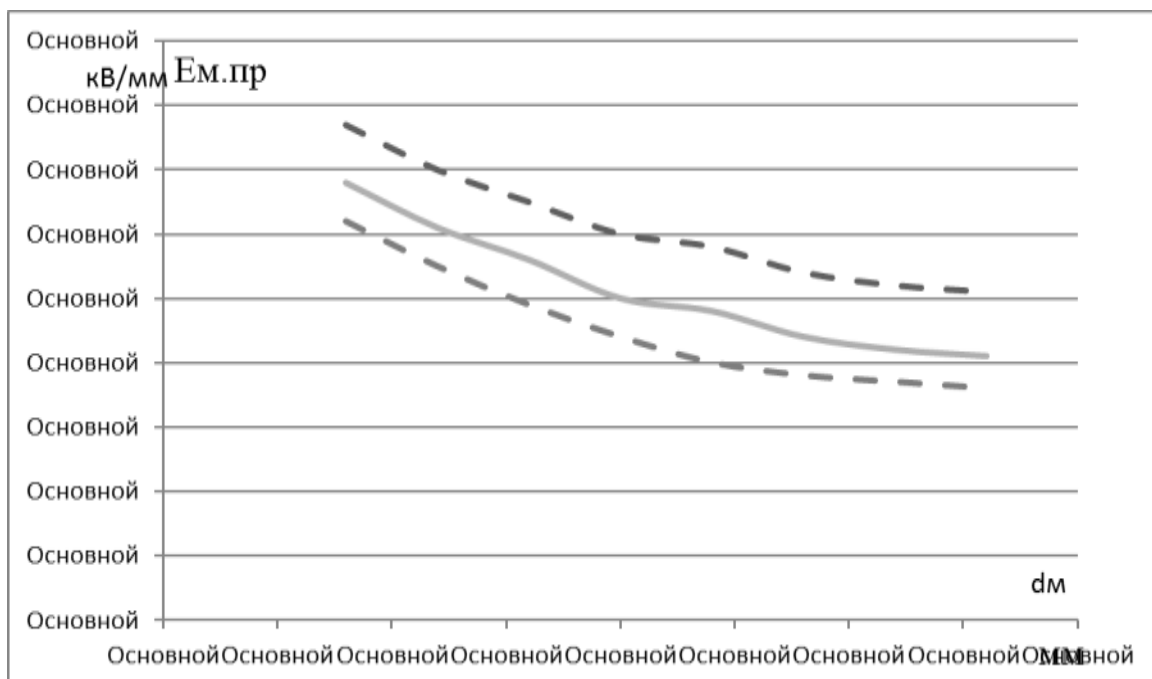


Рисунок 1.3 Залежність пробивної напруженості масляної прослойки від товщини для рівномірного поля в зазорі, що прилягає до електрода (штриховий лінією показана зона розкиду пробивних напруженостей)

При пробі включення (ϵ_m і C_B) іони, що утворюються в процесі розряду, заряджають поверхню включення і створюють поле, протилежне по

напрямку основному полю. Після розряду ємності включення C_B в більшості випадків не виникає велика щільність струму, необхідна для підтримки стійкого розряду, і він гасне. Створення напівпровідникового шару на поверхні включення також не може привести до підтримки розряду внаслідок незначної місткості включення. При пробіі напруга на включенні падає не до нуля, а до певного значення $U_{вп}$, при якому розряд гасне. Напруга згасання при розмірах газового включення або масляної плівки порядку 10-100 мкм менше відповідного пробивної напруги і може бути в межах.

$$U_{вп} \approx (0.1 \div 0.9)U_{вз} \quad (1.6)$$

Напруга на електродах об'єкта, відповідне виникнення ч. р. скорочено називається напругою ч. р. $U_{чр}$. Зв'язок між $U_{чр}$ і $U_{вз}$ може бути встановлений з розгляду еквівалентної схеми рис. 1.1:

$$U_{чр} = U_{вз} \frac{C_d + C_B}{C_B} \quad (1.7)$$

Тривалість процесу пробією включення (тривалість ч. р.) в більшості випадків дуже мала — близько $(3 - 10) \times 10^{-9}$ с. Лише при потужних критичних ч. р., Що представляють собою розгалужені ковзаючі розряди або пробіі великих (близько 1 см і більше) прошарків рідких діелектриків, тривалість ч. р. може бути більше (до $10^{-7} - 10^{-6}$ с).

1.2 Основні характеристики часткових розрядів

Кожен з одиничних ч. р. супроводжується проходженням через включення певного заряду q і призводить до зміни напруги на зовнішніх електродах всього зразка на ΔU_x .

Якщо $C_a \gg C_B$ і $C_a \gg C_d$, то заряд q проходить через включення в момент виникнення ч. р., дорівнює

$$q = (C_B + C_d)(U_{вз} - U_{вп}) = (C_B + C_d)\Delta U_B. \quad (1.8)$$

Практично заряд q не може бути вимірний безпосередньо, так як його проходження пов'язано з процесами всередині діелектрика випробуваного об'єкта.

У момент виникнення ч. р. можна вважати, що заряд на електродах випробуваного об'єкта не змінюється, так як ємність об'єкта відокремлена від решти ємності ланцюга індуктивністю з'єднувальних проводів (шин). Тому зміна напруги ΔU_x відбувається за рахунок збільшення ємності об'єкта при виникненні ч. р. (шунтування ємності C_B в еквівалентній схемі рис. 1.1).

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

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

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

Використовуючи умову рівності цього заряду уявному заряду ч.р., а також формулу (1.8) получимо

$$q_{чр} = \Delta U_x C_x = \Delta U_B C_D = q \frac{C_D}{C_D + C_B}. \quad (1.9)$$

Легко показати, що (1.9) справедливо при будь-якому співвідношенні між C_A , C_B , і C_D .

Слід зазначити, що зміна напруги на зразку зазвичай дуже мала. Так, наприклад, при $q_{\text{чр}} = 10^{-12}$ Кл, що підлягає реєстрації, і $C_x = 1000$ пФ маємо $\Delta U_x = 10^{-3}$ В. При великих ємностях ΔU_x може бути ще менше. Так як прикладена напруга може досягати багатьох сотень кіловольт, то безпосереднє вимірювання ΔU_x викликає великі труднощі.

Якщо включення має форму прошарку, витягнутої поперек силових ліній поля, то зручно відносити ємності C_d і C_B до одиниці поверхні включення. Тоді формула (1.9) може бути представлена в наступному вигляді:

$$q_{\text{чр}} = q \frac{\frac{\varepsilon_d}{d-d_B}}{\frac{\varepsilon_d}{d-d_B} + \frac{\varepsilon_B}{d_B}} = \frac{q}{1 + \frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_d} \left(\frac{d}{d_B} - 1 \right)} \quad (1.10)$$

З формули (1.10) випливає, що при тому ж заряді q , що проходить через включення, і незмінною товщиною включення d_B здається заряд ч. р. зменшується зі збільшенням товщини діелектрика d .

Надалі напруга на об'єкті відновлюється за рахунок підтікання заряду від джерела напруги та інших ємностей схеми, до якої підключений випробуваний об'єкт. Це призводить до виникнення високочастотних коливань в схемі, реєстрація яких спеціальними вимірювальними пристроями дозволяє досліджувати характеристики ч. р. в ізоляції.

При розгляді процесів поверхневої ерозії діелектрика ч. р. великий інтерес представляє заряд, що проходить через одиницю поверхні включення. Розглянемо включення у вигляді прошарку, витягнутої поперек силових ліній поля. Якщо поверхню включення, що бере участь в ч. р., дорівнює S_B , то на підставі (1.8) питомий заряд, що проходить через одиницю поверхні включення, дорівнює:

$$q_{\text{уд}} = \frac{q}{S_B} = \left(\frac{\varepsilon_B}{d_B} + \frac{\varepsilon_d}{d-d_B} \right) \Delta U_B. \quad (1.11)$$

Якщо $U_{\text{вп}} \ll U_{\text{вз}}$, то з врахуванням (1.7) і (1.8),

$$q = (C_B + C_D)(U_{B3} - U_{BП}) \approx (C_B + C_D)U_{B3} = C_D U_{чр} = S_B \frac{\varepsilon_D}{d-d_B} U_{чр}. \quad (1.12)$$

а при $d_B \ll d$ на основі (1.12)

$$q_{уд} = \varepsilon_D \frac{U_{чр}}{d} = \varepsilon_D E_{чр} \quad (1.13)$$

де $E_{чр} = \frac{U_{чр}}{d}$ - напруженість виникнення ч. р. або скорочено напруженість ч. р.

Виникнення кожного одиничного ч. р. призводить до виділення в діелектрику випробуваного об'єкту енергії $W_{чр}$. Ця енергія частково витрачається на розігрів випробуваного об'єкта, а частково витрачається на руйнування діелектрика об'єкта. Якщо ємність $C_a \gg C_D$, що має місце в переважній більшості випадків, то енергія одиничного ч. р. може бути визначена як різниця початкової W_H і кінцевої W_K енергій, записаних на ємностях еквівалентної схеми:

$$W_{чр} = W_H - W_K = \frac{C_D + C_B}{2} (U_{B3}^2 - U_{BП}^2). \quad (1.14)$$

Якщо $U_{B3} \approx U_{BП}$, то враховуючи (1.7),

$$W_{чр} = \frac{C_D + C_B}{2} (U_{B3} + U_{BП}) \Delta U_B \approx q U_{B3} \quad (1.15)$$

Беручи до уваги (1.7) і (1.8), получимо:

$$W_{чр} = q_{чр} U_{чр} \quad (1.16)$$

Якщо $U_{BП} \ll U_{B3}$, то на основі (1.14)

$$W_{чр} = \frac{q U_{B3}}{2} = \frac{q_{чр} U_{чр}}{2} \quad (1.17)$$

Крім кількісних характеристик, що визначають інтенсивність одиничних ч. р., Використовуються інтегральні кількісні характеристики, що визначають інтенсивність ч. р. протягом інтервалу часу, значно більшого, ніж час між двома

одиночними ч. р. Такими характеристиками ч.р. є: частота проходження $n_{\text{чр}}$, середній струм $I_{\text{чр}}$, середня потужність $P_{\text{чр}}$ і квадратичний параметр $D_{\text{чр}}$.

Частотою проходження $n_{\text{чр}}$ називається середнє число імпульсів ч. р. в одиницю часу (секунду). Практично можуть бути враховані ч. р. з уявним зарядом вище встановленого значення або ч. р. з уявним зарядом, що знаходяться в певному інтервалі.

Середній струм $I_{\text{чр}}$ являє собою суму абсолютних значень уявних зарядів, що проходять за одну секунду, і вимірюється в Кл/с або А. Якщо сума зарядів вимірюється за інтервал часу t_1 , то

$$I_{\text{чр}} = \frac{1}{t_1} (|q_{\text{чр}1}| + |q_{\text{чр}2}| + \dots + |q_{\text{чр}m}|) \quad (1.18)$$

Якщо всі заряди мають одне значення $|q_{\text{чр}}|$, то

$$I_{\text{чр}} = n_{\text{чр}} q_{\text{чр}} \quad (1.19)$$

Якщо заряди істотно різні за значенням, то струм рекомендується обчислювати за такою формулою:

$$I_{\text{чр}} = \sum_{i=0}^k \frac{|q_{\text{чр}(i+1)}| + |q_{\text{чр}i}|}{2} (n_{i+1} - n_i). \quad (1.20)$$

де $q_{\text{чр}i}$ — i -й рівень уявних зарядів; n_i — частота проходження ч. р., уявний заряд яких перевищує i -й рівень (значенням $i = 0$ відповідає частота слідування $n = 0$).

При визначенні середнього струму $I_{\text{чр}}$ за формулою (1-20) число рівнів k уявного заряду рекомендується вибирати не менше чотирьох (у яких початковий рівень повинен відповідати $i = 0$), при регулюванні рівнів не більше ніж через 20 дБ.

Середня потужність $P_{\text{чр}}$ — це середня потужність, що підводиться до виводів випробуваного об'єкта для компенсації потужності, що виділяється в випробуваному об'єкті внаслідок ч. р. протягом певного інтервалу часу t_1 :

$$P_{\text{чр}} = \frac{1}{t_1} (q_{\text{чр}1} u_1 + q_{\text{чр}2} u_2 + \dots + q_{\text{чр}m} u_m). \quad (1.21)$$

де u_1, u_2, \dots, u_m — миттєві значення напруги на випробуваному об'єкті в моменти розрядів.

Якщо переважна більшість ч. р. виникає поблизу амплітуди прикладеної напруги U_m , то $P_{\text{чр}}$ може бути наближено визначене за формулою:

$$P_{\text{чр}} = I_{\text{чр}} U_m. \quad (1.22)$$

Так як підведена до уявного випробуваного об'єкта потужність $P_{\text{чр}}$ повинна дорівнювати потужності, що виділяється в об'єкті внаслідок ч. р., то, якщо всі розряди мають одну і ту ж енергію $W_{\text{чр}}$, потужність $P_{\text{чр}}$ може бути визначена також за формулою:

$$P_{\text{чр}} = \sum_{i=0}^k \frac{|W_{\text{чр}(i+1)}| + |W_{\text{чр}i}|}{2} (n_{i+1} - n_i). \quad (1.24)$$

де $W_{\text{чр}(i+1)}$ i -й рівень енергії; n_i - частота проходження ч. р., енергія яких перевищує n_i рівень (значенням $i = 0$ відповідає частота слідування $n = 0$).

Квадратичний параметр $D_{\text{чр}}$ являє собою суму квадратів зарядів, що проходять через виводи випробуваного об'єкта в результаті ч. р. за одну секунду. Якщо вимір суми квадратів зарядів проводиться за інтервал часу t_1 , то:

$$D_{\text{чр}} = \frac{1}{t_1} (q_{\text{чр}1}^2 + q_{\text{чр}2}^2 + \dots + q_{\text{чр}m}^2). \quad (1.25)$$

Якщо всі заряди мають одне значення $|q_{\text{чр}}|$, то

$$D_{\text{чр}} = n_{\text{чр}} q_{\text{чр}}^2. \quad (1.26)$$

Якщо заряди істотно різні за значенням, то

$$D_{\text{чр}} = \sum_{i=0}^k \frac{|q_{\text{чр}(i+1)}|^2 + |q_i|^2}{2} (n_{i+1} - n_i). \quad (1.27)$$

де $q_{\text{чр}i}$ — i -й рівень рівень квадрата заряду; n_i - частота проходження ч. р., квадрат заряду яких перевищує i -й рівень (значенням $i = 0$ відповідає частота слідування $n = 0$).

Дослідження ч. р. в газовому прошарку за допомогою електронно-оптичного перетворювача (ЕОП) показали, що в ряді випадків кожен імпульс, який реєструється пристроєм для вимірювання ч. р., відповідає кільком мікророзрядам. Інтервал часу між окремими мікророзрядами складає близько 3×10^{-8} с, причому кожен мікророзряд є дискретний у часі і просторі іскровий канал.

Оптична картина ч. р. істотно залежить від тиску газу p в прошарку, товщини прошарку $d_{\text{в}}$, роду діелектрика, роду газу. При значеннях $pd_{\text{в}}$ менше деякого критичного $(pd_{\text{в}})_{\text{кр}}$ ч.р. розвиваються у вигляді серії мікророзрядів, а при $pd_{\text{в}} > (pd_{\text{в}})_{\text{кр}}$ ч. р. являє собою один більш потужний розряд. Якщо у миттєвого анода розташований полімерний твердий діелектрик, а у катода - скло, то канали окремих мікророзрядів мають конусоподібну форму і складаються з ділянки, яка слабо світиться поблизу катода і яскраво світиться поблизу анода. При катоді, вкритому полімером, і металевому аноді розряд виникає у вигляді одного іскрового каналу. У деяких випадках спостерігаються мікророзряд, що супроводжуються розрядами по поверхні діелектрика.

Заряд $q_{\text{мр}}$ і енергія $W_{\text{мр}}$ одного мікророзряду може бути визначена за формулами:

$$q_{\text{мр}} = \frac{\Delta S_{\text{в}}}{S_{\text{в}}} q_{\text{чр}} = \frac{q_{\text{чр}}}{m_{\text{мр}}} \quad \text{і} \quad W_{\text{мр}} = \frac{\Delta S_{\text{в}}}{S_{\text{в}}} W_{\text{чр}} = \frac{W_{\text{чр}}}{m_{\text{мр}}} \quad (1.28)$$

де ΔS_B - середня площа поверхні включення, розряджається одним мікророзрядів; S_B загальна площа включення, що бере участь в ємності C_B ; $m_{\text{мр}} = \frac{\Delta S_B}{S_B}$ - число мікророзрядів, які складаються з одного ч. р.; ΔS_B залежить від виду діелектрика і зростає зі збільшенням газового прошарку d_B від 1 до 6 мм.

Формули (1.8) і (1.14) з врахуванням мікророзрядів можуть бути в такому вигляді:

$$q = m_{\text{мр}} \frac{\Delta S_B}{S_B} (C_D + C_B) (U_{\text{вз}} - U_{\text{вп}}). \quad (1.29)$$

і

$$W_{\text{чр}} = m_{\text{мр}} \frac{\Delta S_B}{2S_B} (C_D + C_B) (U_{\text{вз}}^2 - U_{\text{вп}}^2). \quad (1.30)$$

При розгляді ч. р. деякі автори використовують більш складні еквівалентні схеми заміщення діелектрика з включенням, що дозволяють більш точно враховувати виділення енергії у включенні з урахуванням перерозподілу поля в діелектриках.

Розрахунки показують, що в витягнутих порожнинах малого діаметра на одиницю площі виділяється енергія в 10-100 разів більша за ту, яка звільняється за рахунок деполаризації зарядів, накопичених на протилежних стінках порожнини. Збільшення питомої енерговиділення і питомого значення потужності ч. р. є однією з причин низької тривалої електричної міцності діелектрика з порожнинами, витягнутими в напрямку силових ліній поля.

1.3 Часткові розряди при змінній напрузі

Якщо до випробуваному об'єкту прикладена змінна синусоїдальна напруга $u = U_m \sin \omega t$, то при відсутності ч. р. напруга на ємності включення також синусоїдально і дорівнює $u = U_{\text{вм}} \sin \omega t$ де $U_{\text{вм}}$ - амплітуда напруги при включенні.

$$U_{\text{вм}} = U_m \frac{C_d}{C_{\text{в}} + C_d} = U_m \eta. \quad (1.31)$$

$$\text{де, } \eta = \frac{C_d}{C_{\text{в}} + C_d}.$$

У разі включення у вигляді прошарку товщиною $d_{\text{в}}$, витягнутої поперек силових ліній поля,

$$U_{\text{вм}} = U_m \frac{\varepsilon_d / (d - d_{\text{в}})}{\frac{\varepsilon_{\text{в}}}{d_{\text{в}}} + \frac{\varepsilon_d}{(d - d_{\text{в}})}} = U_m \frac{\varepsilon_d d_{\text{в}}}{\varepsilon_{\text{в}}(d - d_{\text{в}}) + \varepsilon_d d_{\text{в}}} \quad (1.32)$$

При впливі на випробуваний об'єкт першого напівперіода напруги ч.р. виникне тоді, коли напруга на включенні (ємність $C_{\text{в}}$, рис. 1.1) досягне значення $U_{\text{вз}}$ (напруги запалювання розряду у включенні). При пробі напруга на включенні падає до $U_{\text{вп}}$ (напруги згасання розряду у включенні), при якому розряд гасне.

Після згасання розряду напруга на включенні починає наростати від значення $U_{\text{вп}}$ по кривій, що відповідає зміні прикладеної напруги, зміщеною по вертикалі на значення постійної складової, яка виникла внаслідок появи зарядів на поверхні включення (на ємності $C_{\text{в}}$). Коли напруга $U_{\text{в}}$ на ємності $C_{\text{в}}$ досягне значення $U_{\text{вз}}$, процес повторюється.

Отже, розряди в даній області діелектрика повторюються через проміжки часу, відповідні зміни напруги на $C_{\text{в}}$ на $\Delta U_{\text{в}} = U_{\text{вз}} - U_{\text{вп}}$. При проходженні напруги через максимум включення знаходиться під напругою, значення якого лежить в інтервалі між $U_{\text{вз}}$ та $U_{\text{вп}}$. Потім відбувається зменшення напруги на включенні до 0 і подальше зростання до $U_{\text{вз}}$. У першому наближенні можна прийняти, що при обох полярностях пробивна напруга включення однакова. При досягненні напругою на включенні значення $U_{\text{вз}}$ відбувається пробій включення і процес триває описаним вище чином (рис. 1.4).

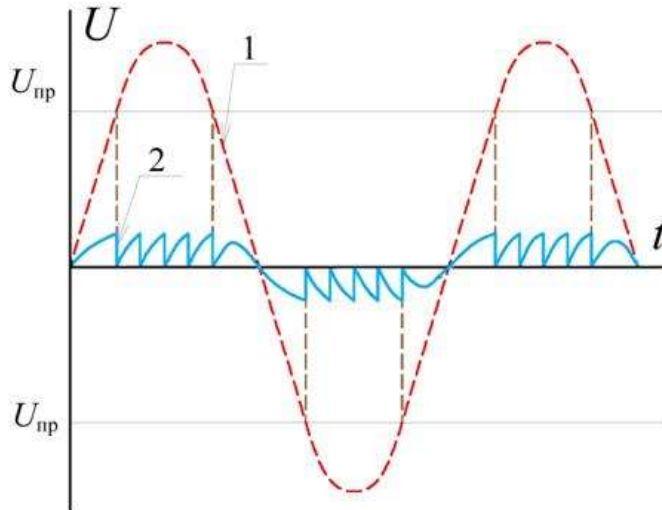


Рисунок 1.4 Розвиток в часі ч.р. при змінній напрузі

При такому механізмі явища ч. р. повинні припинятися при проходженні напруги через максимум і знову виникати, коли напруга на виходах випробуваного об'єкта досягне значення U_1 відповідного зміни напруги на включенні на $U_{в1} \approx U_{вз} + U_{вп}$:

$$U_1 = \frac{1}{\eta} (U_{вз} + U_{вп}) = \frac{U_{в1}}{\eta}$$

Надалі після відновлення ч.р. розряди в даній області діелектрика, як і раніше, повторюються через проміжки часу, відповідні зміни напруги на ємності $C_в$ на $\Delta U_в$ в або на виводах випробуваного об'єкта на

$$\Delta U = \frac{\Delta U_в}{\eta} \quad (1.33)$$

Таким чином число розрядів при включенні за один на півперіод:

$$m_{чр} = \frac{2U_{вт} - (U_{вз} + U_{вп})}{U_{вз} - U_{вп}} + 1 = \frac{2(U_{вт} - U_{вп})}{\Delta U_в} = \frac{2(U_{т'} - U_{п}')}{\Delta U_в} \quad (1.34)$$

де $U_{п}' = \frac{\Delta U_в}{\eta}$. При $U_{вз} \approx U_{вп}$ і $\frac{U_{вз}}{\eta} = U_з = U_{чр}$ маємо:

$$m_{чр} \approx \frac{2(U_{вт} - U_{вз})}{\Delta U_в} = \frac{2(U_{т'} - U_{чр})}{\Delta U_в} \quad (1.35)$$

При $U_{вп} \ll U_{вз}$

$$m_{чр} \approx \frac{2U_{вт}}{U_{вз}} = \frac{2U_{т}}{U_{чр}} \quad (1.36)$$

При цьому число розрядів при включенні $n_{чр}$ за 1 с буде:

$$n_{чр} = 2fm_{чр} \quad (1.37)$$

де, f — частота прикладеної напруги.

Враховуючи (1.14), (1.23), (1.34) потужність ч.р. $P_{чр}$ в одному включенні може бути показана у виді:

$$P_{чр} = W_{чр}n_{чр} = 2f(C_d + C_b)(U_{вз} + U_{вп})(U_{вт} - U_{вп}) \quad (1.38)$$

Якщо $U_{вз} \approx U_{вп}$, то

$$P_{чр} = 4f(C_d + C_b)U_{вз}(U_{вт} - U_{вз}) = 4fC_dU_{вз}(U_{т} - U_{чр}) \quad (1.39)$$

Якщо $U_{вп} = 0$, то

$$P_{чр} = 2f(C_d + C_b)U_{вз}U_{вт} = 2fC_dU_{вз}U_{т} \quad (1.40)$$

З виразів (1.38) - (1.40) випливає, що для одного включення або при фіксованій кількості однакових включень потужність ч. р. лінійно зростає з ростом прикладеної напруги.

При $U_{вз} \approx U_{вп}$, враховуючи (1.16) і (1.23), потужність ч. р. може бути також представлена в наступному вигляді:

$$P_{чр} = q_{чр}U_{чр}n_{чр} = I_{чр}U_{чр}. \quad (1.41)$$

Відповідно при $U_{вз} \ll U_{вп}$, враховуючи (1.17) і (1.23),

$$P_{чр} = \frac{q_{чр}U_{чр}n_{п}}{2} = \frac{I_{чр}U_{чр}}{2}. \quad (1.42)$$

На основі (1.21), потужність $P_{\text{чр}}$, яка виділяється в одиночному включенні, може бути також в такому вигляді:

$$P_{\text{чр}} = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^{m_{\text{чр}}} q_{\text{чр}i} u_i. \quad (1.43)$$

де u_i - миттєве значення напруги на діелектрику в момент часу розряду з уявним зарядом $q_{\text{чр}i}$; $m_{\text{чр}}$ - загальна кількість розрядів в одиничному включенні за напівперіод $T/2$. При використанні формули (1-43) необхідно враховувати знаки при $q_{\text{чр}i}$ і u_i

Як приклад визначимо енергію $W_{T/2}$, яка підводиться до виводів випробуваного об'єкта за напівперіод $T/2$, для компенсації енергії, що виділилася у включенні внаслідок ч. р. розглянемо один напівперіод від максимуму напруги однієї полярності до максимуму напруги протилежної полярності (рис. 1.4). В цьому випадку при визначенні $W_{T/2}$ енергія ч. р., що виникають від моменту часу t_1 до моменту часу t_2 , відповідного переходу напруги через нуль, повинна бути взята з одним знаком, а енергія ч. р., що виникають від моменту часу t_2 до моменту часу t_3 , відповідного переходу напруги через максимум, — з іншим.

Якщо прийняти $q_{\text{чр}i} = q_{\text{чр}} = \text{const}$, то формула (1-21) може бути представлена в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} P_{\text{чр}} = \frac{2}{T} q_{\text{чр}} | -[\Delta U + 2\Delta U + \dots + (m_1 - 1)\Delta U + (U_m - U_1)] + [\Delta U + 2\Delta U + \dots + \\ (m_2 - 1)\Delta U + U_m] | = \frac{2}{T} q_{\text{чр}} | (U_m - U_1 + \Delta U)(U_m - U_1 + 2\Delta U) + \dots + \\ [U_m - U_1 + (m_3 - 1)\Delta U] + U_m |. \end{aligned} \quad (1.44)$$

де

$$m_1 = \frac{U_m - U_1}{\Delta U}; m_2 = \frac{U_m}{\Delta U}; m_3 = m_2 - m_1 = \frac{U_1}{\Delta U}.$$

Формула (1.44) може бути показана у вигляду

$$P_{\text{чр}} = q_{\text{чр}} m_3 f (2U_m - U_1 + \Delta U) = q_{\text{чр}} f \frac{U_1 (2U_m - U_1 + \Delta U)}{\Delta U}. \quad (1.45)$$

Враховуючи (1.34) і (1.37), получимо:

$$P_{\text{чр}} = \frac{q_{\text{чр}} U_1 n_{\text{чр}}}{2} = \frac{I_{\text{чр}} U_1}{2}. \quad (1.46)$$

При $U_{\text{вз}} \approx U_{\text{вп}}$ маємо $U_1 \approx 2U_{\text{чр}}$ і

$$P_{\text{чр}} = I_{\text{чр}} U_{\text{чр}}. \quad (1.47)$$

При $U_{\text{вз}} \ll U_{\text{вп}}$

$$P_{\text{чр}} = \frac{I_{\text{чр}} U_{\text{чр}}}{2} = 2f q_{\text{чр}} U_m. \quad (1.48)$$

Порівняння формул, отриманих для потужності, що витрачається в одному включенні, (1-41) і (1-42) з відповідними формулами, отриманими для потужності, що підводиться до виводів випробуваного об'єкта, (1-47) і (1-48) показує їх повну ідентичність.

Для більшості ізоляційних конструкцій зі зростанням напруги кількість областей (включень), в яких виникають ч. р., не залишається постійним, а збільшується, що призводить до більш сильної залежності числа розрядів в секунду і потужності ч. р. від напруги, ніж за формулами (1-34), (1-37) і (1-38).

Збільшення з ростом напруги числа включень, в яких виникають ч. р., відбувається відповідно до статистичних розкидом напруги запалювання ч. р. в окремих включених.

Як показали досліди, можна вважати, що розподіл напружень запалювання ч. р. підпорядковується нормальному закону із середнім значенням $U_{\text{вз.ср.}}$ і середньоквадратичним відхиленням $\sigma_{\text{вз.}}$.

1.4 Діелектричні втрати при наявності часткових розрядів

При виникненні ч. р. досить великої інтенсивності спостерігається збільшення діелектричних втрат за рахунок потужності, що виділяється при ч. р. Це збільшення діелектричних втрат може бути зареєстровано щодо збільшення $\tan \delta$ в ізоляції випробуваного об'єкта.

При наявності ч. р. втрати в діелектрику випробуваного об'єкта ємністю C_x складаються з втрат на ч. р. $P_{чр}$ і інших видів діелектричних втрат P_d . Якщо $\tan \delta_d$, відповідний втратам P_d , не залежить від напруги, то P_d пропорційна квадрату напруги:

$$P_d = U^2 \omega C_x \tan \delta_d = U^2 g. \quad (1.49)$$

де $g = \omega C_x \tan \delta_d$ — еквівалентна активна провідність.

При наявності одного включення або при незмінній кількості однакових включень потужність ч. р. $P_{чр}$, як це впливає з виразів (1-38) - (1-40), лінійно зростає з росто прикладеної напруги.

В цьому випадку при наявності ч.р. $\tan \delta$ може бути виведений наступним співвідношенням:

$$\tan \delta = \frac{P_d + P_{чр}}{U^2 \omega C_x} = \frac{U^2 g + k(U - U_{чр})}{U^2 \omega C_x}. \quad (1.50)$$

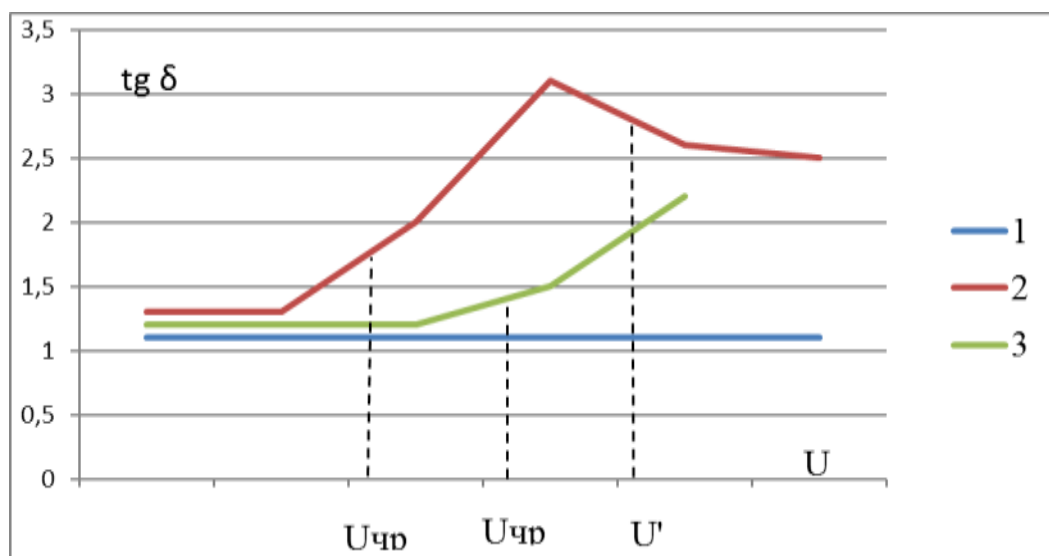


Рис. 1.5 Характерна залежність $\tan \delta$ від напруги

1 - ч. р. відсутні; 2 - є локальні газові включення, що не збільшуються з ростом напруги, ч. р. виникають при напрузі $U_{чр1}$; 3 - ч. р, виникають при напрузі $U_{чр2}$

Залежність $\tan \delta$ від напруги має максимум при певній напрузі U' значення U' може бути визначено з умови $d \tan \delta / dU = 0$ і дорівнює $2U_{чр}$ (рис. 1.5, крива 2) . При цьому передбачається, що область діелектрика, охоплена ч. р., не збільшується зі зростанням напруги, тобто величина k від напруги не залежить.

Як зазначалося вище, в більшості ізоляційних конструкцій зі зростанням напруги зростає кількість місць (включень), в яких розвиваються ч. р. Крім того, поява ч. р. призводить до руйнування діелектрика і збільшення обсягу включень. У цьому випадку збільшення напруги вище напруги запалювання ч. р. супроводжується різким підйомом $\tan \delta$. За підйому $\tan \delta$ можна орієнтовно судити про значення $U_{чр}$ (крива 3, рис. 1.5). Зазвичай при подальшому збільшенні напруги зростання $\tan \delta$ не припиняється до пробою ізоляції.

1.5 Залежність напруженості часткових розрядів від товщини діелектрика

Виникнення часткових розрядів в ізоляції з сильно неоднорідним полем. Напруга ч. р. визначається конфігурацією електричного поля і електричною міцністю ізоляції в області найбільшої напруженості.

Для багатьох ізоляційних конструкцій велике значення має випадок, коли електроди являють собою плоскі або циліндричні поверхні з гострими краями, між якими знаходиться діелектрик (рис. 1.6, а). До розглянутого випадку відноситься ізоляція конденсаторів, кабельних муфт, прохідних ізоляторів і

трансформаторів струму з ізоляцією конденсаторного типу, ізоляція електричних машин в місці виходу з паза і т.д.

Для цих ізоляційних конструкцій товщина діелектрика між електродами визначає значення напруги $U_{чр}$ і середньої напруженості $E_{чр} = \frac{U_{чр}}{d}$ виникнення ч. р.

Біля гострого краю обкладки виникає сильно неоднорідне поле зі значною складовою напруженості, спрямованої уздовж шарів ізоляції.

Напруженість поля на відстані r від краю електрода при $r < 0.1d$ й може бути оцінена за такою формулою:

$$E_r = \frac{U}{\sqrt{\pi dr}} = E_{ср} \sqrt{\frac{d}{\pi r}}. \quad (1.51)$$

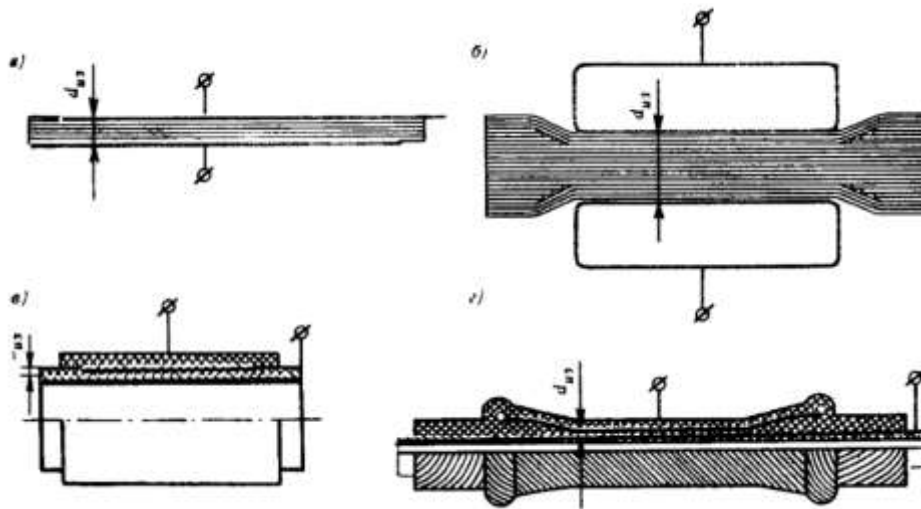


Рис. 1.6 Деякі конструкції зразків ізоляції: а, в - електроди

з гострими краями; б, г - електроди з ослабленим крайовим ефектом

З формули (1.51) може бути знайдена залежність $E_{чр}$ від товщини ізоляції d . Умовою виникнення ч. р. у краю обкладки можна вважати рівність напруженості поля на деякій певній відстані $r_0 = const$ від краю обкладки значенням E_{r0} , достатньому для розвитку розряду. Тоді

$$E_{r0} = \frac{U_i}{\sqrt{\pi dr_0}}. \quad (1.52)$$

і, відповідно, напруга ч.р.

$$U_{\text{чр}} = E_{r0} \sqrt{\pi d r_0} = A d^{0.5}. \quad (1.53)$$

Звідси середня напруженість ч.р.

$$E_{\text{чр}} = A d^{-0.5}. \quad (1.54)$$

Для оцінки напруженості поблизу краю фольги можна скористатися також розрахунком поля пластини з заокругленим краєм проти площини, або пластини з заокругленим краєм, укладеної між двома симетрично розташованими площинами з однаковим потенціалом. В цьому випадку напруженість у краю пластини з радіусом r , розташованої на відстані d від площини (або площин), може бути визначена за формулою:

$$E_{\text{max}} = G E_{\text{ср}} \sqrt{\frac{d+r}{r}}. \quad (1.55)$$

де $E_{\text{ср}} = U/d$, при чому для малих r маємо $G \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}}$, а для більших $G \rightarrow 1.0$.

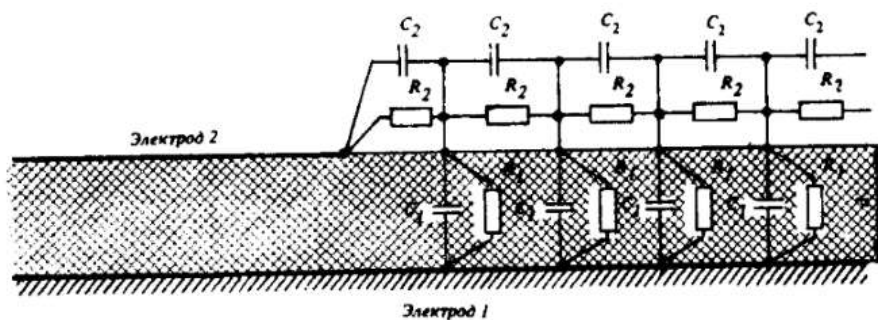


Рис. 1.7 Схема заміщення діелектрика на краю електрода

Якщо прийняти, що виникнення ч. р. відповідає певному значенню максимальної напруженості на поверхні електрода E_0 , то при $r \ll d$

$$E_{\text{чр}} = \frac{E_0}{G \sqrt{d}} = A d^{-0.5}. \quad (1.56)$$

де постійна A залежить від виду ч.р.

Таким чином, залежно напруженості ч. р. від товщини діелектрика за формулами (1.54) і (1.56) збігаються.

Аналогічна конструкція формули слід також з розгляду схеми заміщення діелектрика на краю електрода, згідно рис. 1.7, при розвитку ковзаючих розрядів по поверхні діелектрика. Позначимо: $C_1 = \frac{\varepsilon_1}{d}$ — ємність одиниці поверхні діелектрика щодо нижнього електрода 1; $C_2 = k\varepsilon_2$ — еквівалентна (з урахуванням впливу інших елементів) взаємна ємність сусідніх одиниць поверхні діелектрика відносно одна одної; d - товщина діелектрика; $R_1 = \rho_v d$ — опір стовпа діелектрика висотою d і площею, що дорівнює одиниці поверхні; $R_2 = \rho_s$ — питомий поверхневий опір діелектрика; ε_1 і ε_2 — діелектричні проникності діелектрика і середовища; ρ_v — питомий еквівалентну об'ємний опір діелектрика.

При змінній напрузі ρ_v визначаються втрати в діелектрику і дорівнює:

$$\rho_v = \frac{1}{\omega \varepsilon_1 \tan \delta}. \quad (1.57)$$

Якщо до електродів прикладена напруга \dot{U} , то залежність напруги $\dot{U}_x = f(x)$ розглянутої ланцюгової схеми може бути представлена у вигляді:

$$\dot{U}_x = \dot{U} \frac{\operatorname{sh} m(l-x)}{\operatorname{sh} ml}. \quad (1.58)$$

де

$$m = \sqrt{\frac{(1/R_1) + j\omega C_1}{(1/R_2) + j\omega C_2}}. \quad (1.59)$$

Напруженість вздовж поверхні діелектрика

$$\dot{E}_x = -\frac{dU_x}{dx} = \dot{U}_m \frac{\operatorname{ch} m(l-x)}{\operatorname{sh} ml}. \quad (1.60)$$

Найбільша напруженість виходить при $x = 0$:

$$E_{x \max} = \dot{U} m \operatorname{cth} ml. \quad (1.61)$$

Припустимо, що ч.р. може виникнути при такій напрузі $U_{\text{чр}}$, при якому $E_{x \max}$ досягне деякого критичного значення E_0 , відповідно електричній міцності рідкого діелектрика, навкруги верхнього електрода. При цьому

$$\dot{U}_{\text{чр}} = \frac{E_0}{m} \operatorname{th} ml. \quad (1.62)$$

де $m = m_r + jm_i$.

Для середовища з високим питомим опором, що призводить до великих ρ_s а саме ($\rho_s > 10^{12}$ Ом), можна знехтувати $1/\rho_s$ в порівнянні з ωC_2 . Крім того, для всіх технічних діелектриків $1/R_1 \ll \omega C_1$. Тоді параметр m виявляється вагомим і рівним:

$$m = \sqrt{\varepsilon_1 / (k\varepsilon_2 d)}. \quad (1.63)$$

При $\rho_s \ll 10^{12}$ Ом, що в ряді випадків характерно для ізоляції, просоченої технічними рідкими діелектриками, в першому наближенні можна знехтувати ωC_2 .

Тоді

$$m = \sqrt{j\rho_s \omega C_2} = (1 + j) \sqrt{\rho_s \omega \varepsilon_1 / (2d)}. \quad (1.64)$$

Далі, при $l \gg d$ впровадження $ml > 10$ і $\operatorname{th} ml \approx 1$. Тому, переходячи у формулу (1.62) до модулів комплексних величин, отримаємо для напруги ч.р.

$$U_{\text{чр}} = \frac{E_0}{m}. \quad (1.65)$$

Формула (1.65) при $\rho_s > 10^{12}$ Ом матиме вигляд:

$$U_{\text{чр}} = E_0 \sqrt{\frac{k\varepsilon_2 d}{\varepsilon_1}}. \quad (1.66)$$

І при $\rho_s < 10^{12}$ Ом

$$U_{\text{чр}} = E_0 \sqrt{\frac{d}{(\rho_s \omega \varepsilon_1)}}. \quad (1.67)$$

Як формула (1.66), так і формула (1.67) призводять до наступних залежностей напруги ч. р. від товщини діелектрика:

$$U_{\text{чр}} = Ad^{0.5}. \quad (1.68)$$

що відповідає формулі (1.56)

На основі (1.68) для напруженості ч.р. при $\rho_s > 10^{12}$ Ом

$$E_{\text{чр}} = \frac{U_{\text{чр}}}{d} = E_0 \sqrt{\frac{k\varepsilon_2}{(d\varepsilon_1)}}. \quad (1.69)$$

І при $\rho_s < 10^{12}$ Ом

$$E_{\text{чр}} = \frac{E_0}{\sqrt{d\rho_s\omega\varepsilon_1}}. \quad (1.70)$$

Як формула (1.69), так і формула (1.70) призводять до наступної залежності напруженості ч.р. від товщини діелектрика:

$$E_{\text{чр}} = Ad^{-0.5}. \quad (1.71)$$

що відповідає формулам (1.54) або (1.56)

Формула (1.71) добре підтверджується експериментально.

З (1.71) видно, що напруженість ч. р. росте зі зменшенням товщини ізоляції. Тому для підвищення напруги і середньої напруженості ч. Р. в області гострого краю електрода вигідно мати замість одного шару ізоляції товщиною d кілька (n) тонких шарів з товщиною d/n , розділених металевими обкладинками.

Виникнення часткових розрядів в ізоляції зі слабо неоднорідним полем. Для ізоляції зі слабо неоднорідним або однорідним полем залежності

напруженості ч. р. від товщини діелектрика можуть бути отримані з розгляду еквівалентної схеми діелектрика з включенням, згідно рис. 1.1.

Якщо припустити, що включення розташоване паралельно електродів і при відносно великій площі товщина його мала, то в першому наближенні поле можна вважати однорідним.

Позначимо повну напругу через u , а її складові на ємностях C_B і C_D — через u_B і u_D . Тоді:

$$\frac{u_D}{u_B} = \frac{C_B}{C_D} = \frac{\varepsilon_B(d-d_B)}{\varepsilon_D d_B}. \quad (1.72)$$

Далі

$$u = u_B + u_D = u_B \left[1 + \frac{\varepsilon_B(d-d_B)}{\varepsilon_D d_B} \right]. \quad (1.73)$$

Ч. р. виникнуть тоді, коли напруга на включенні u_B досягне пробивного значення U_{B3} . Таким чином:

$$U_{чр} = U_{B3} \left[1 + \frac{\varepsilon_B(d-d_B)}{\varepsilon_D d_B} \right]. \quad (1.74)$$

Знайдемо середню напруженість ч.р.

$$E_{чр} = \frac{U_{чр}}{d} = \frac{U_{B3}}{d} \left[1 + \frac{\varepsilon_B(d-d_B)}{\varepsilon_D d_B} \right]. \quad (1.75)$$

Після перефразування получимо:

$$E_{чр} = \frac{U_{B3}}{\varepsilon_D d_B} \left[\varepsilon_B + \frac{(\varepsilon_D - \varepsilon_B)d_B}{d} \right]. \quad (1.76)$$

Вираз (1.76) показує, що при незмінних розмірах включення при $\varepsilon_D > \varepsilon_B$ напруженість ч. р. падає з ростом товщини діелектрика, проте залежність $E_{чр}$ від d в цьому випадку значно слабкіше, ніж в сильно неоднорідному полі. При $\varepsilon_D = \varepsilon_B$ значення $E_{чр}$ в однорідному полі не залежить від товщини діелектрика.

При $\varepsilon_d < \varepsilon_b$ напруженість ч.р. дещо зростає з ростом товщини діелектрика.

2 Механізми руйнування ізоляції частковими розрядами

2.1 Основні процеси руйнування ізоляції частковими розрядами

Комплекс експлуатаційних впливів, що викликають старіння ізоляції, різноманітний і складний, проте в багатьох випадках основною причиною старіння є електричне поле високої напруженості. Як встановлено багатьма дослідженнями, під дією електричного поля старіння відбувається переважно за рахунок розвитку в ізоляції ч. р.

Руйнівну дію ч. р. є результатом теплового впливу, бомбардування зарядженими частинками (в основному електронами), впливу хімічно активних продуктів, що утворилися в процесі розвитку ч. р., а також ударних хвиль і випромінювання.

Дія цих чинників викликає ерозію (руйнування поверхні з винесенням матеріалу), а також структурні зміни (деструкція, зшивання полімерних ланцюгів). Ерозія може бути обумовлена наступними причинами:

а) окисленням полімерів високо-реактивними радикалами, існуючими тільки в зоні дії розряду;

б) реакціями мікро-радикалів полімеру, що утворилися під дією розрядів, з киснем газової середовища або іншими активними речовинами, що виникли в результаті ч.р .;

в) бомбардуванням поверхні діелектрика електронами і іонами.

Дослідження зміни пробивної напруги $U_{пр}$, товщини d і маси M показали, що при дії на плівки тільки продуктів розряду товщина і маса плівок практично не змінюються. У той же час при безпосередньому впливі розрядів спостерігається суттєва зміна пробивної напруги, товщини і маси плівок (рис. 2.1).

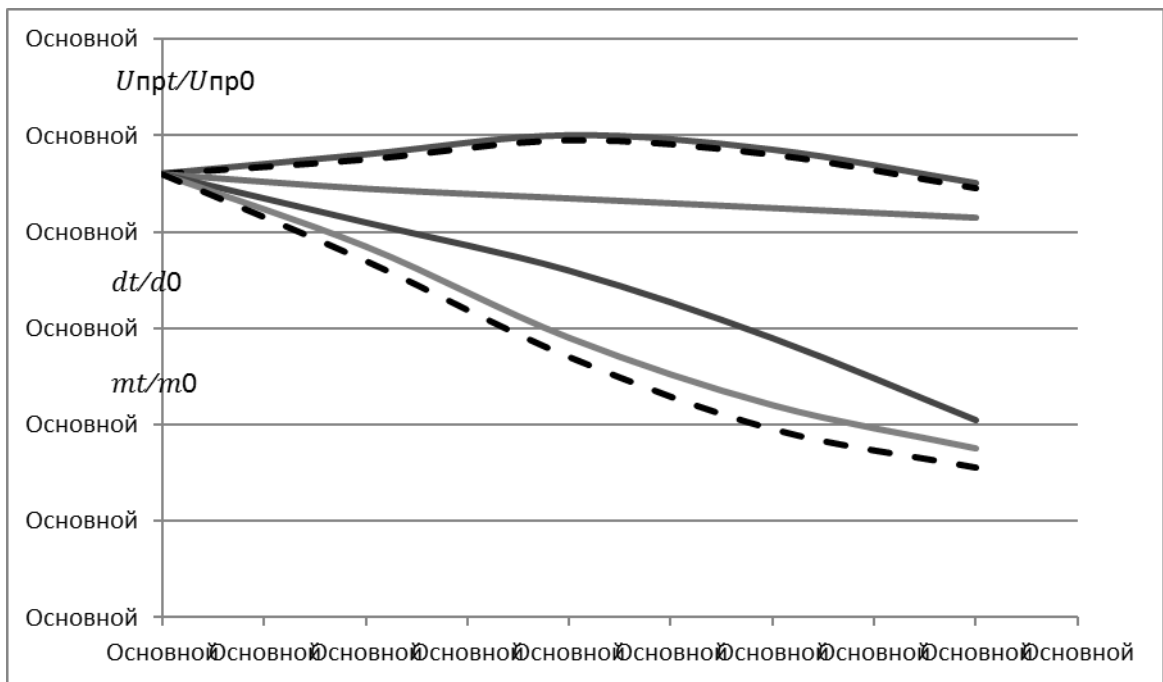


Рисунок 2.1. Залежно пробивної напруги $U_{прт}/U_{пр0}$ (•), товщини d_t/d_0 (•) і маси m_t/m_0 від часу для плівки ПЕТФ при безпосередньому (1) і непрямому (2) дії розрядів.

Іноді ерозію пов'язують з процесами нагріву поверхні діелектрика в місцях зіткнення з каналами окремих ч. р. і подальшого випаровування діелектрика. Ерозія і руйнування діелектрика можуть відбуватися за рахунок електронного бомбардування його поверхні, так як значна частина енергії розряду переноситься електронами. Це підтверджується даними, за якими ерозія зразків з поверхні, розташованої перпендикулярно напрямку розрядів, значно інтенсивніше ерозії з поверхні, розташованої уздовж напрямку розрядів. З плином часу відбуваються місцеві збільшення глибини ерозії; поступово виділяються переважні напрями інтенсивного руйнування матеріалу, які в ряді випадків можуть перетворюватися в гіллясті руйнування (дендрити). При ч.р.

малої інтенсивності основну роль в процесі ерозії відіграє реакція окислення, швидкість якої при вільному доступі кисню зростає в 1,5 рази.

При інтенсивних розрядах причиною руйнування діелектрика переважно є термодеструкція полімерів за рахунок енергії розряду.

У початковий період товщина шару, який старіє при постійному числі мікророзрядів у включенні зростає пропорційно лінійної щільності енергії мікророзрядів $W_{\text{л}} = W_{\text{мр}} / d_{\text{е}}$, де $W_{\text{мр}}$ — енергія одного мікророзрядів, $d_{\text{е}}$ — ефективна товщина зазору (довжина зони світіння ч.р.).

Через деякий час середня товщина шару, який старіє прагне до сталого значення, що пов'язано перш за все з впливом газоподібних продуктів розряду. Зшивання полімерних ланцюгів або їх руйнування охоплює не весь зразок, а лише шар, що примикає до поверхні.

Структура ізоляції змінюється при безпосередньому впливі розрядів на діелектрик (електронно-іонна бомбардування, ультрафіолетове опромінення), а також і внаслідок впливу газоподібних та інших продуктів, що виникли в результаті розряду (озон, оксиди азоту, атомарний кисень, хлор, хлористий водень, соляна та інші кислоти). Структурні зміни матеріалу діелектрика проявляються в зміні інфрачервоних спектрів, молекулярної маси, збільшення $\tan \delta$, зміні діелектричної проникності ϵ і питомої об'ємного опору ρ_v .

Всі структурні зміни під дією розрядів можна розділити на два типи: перші, зосереджені до глибини приблизно 3 мкм (наприклад, в поліетилені), — викликані безпосередньою дією розрядів (освіта подвійних вуглецевих зв'язків, гідроксильних груп, нітрогруп); другі — зосереджені на великих глибинах, до 12 мкм, і викликані дією газоподібних продуктів (створення озонідів, карбонільних груп). Товщина шару із структурними змінами визначається глибиною дифузії кисню або озону в зразок.

Структурні зміни під дією ч.р. відрізняються від змін при опроміненні частинками високих енергій, і в них важливу роль відіграють окисні процеси: у

полімерів, які зшивають після електричного старіння інфрачервоні спектри показують збільшення числа кисневих містків, а при процесах деструкції під впливом частинок високих енергій збільшується число кінцевих карбонільних груп.

Характер структурних змін в діелектриках може бути досить добре виявлено за допомогою аналізу інфрачервоних спектрів поглинання матеріалів до і після впливу ч. р. Як приклад на рис. 2.2 наведені інфрачервоні спектри поліетилену до і після старіння при впливі ч. р. в різних газових середовищах. Як випливає з малюнка, при ч. р. в повітрі в поліетилені з'являються смуги при 1716, 1640, 1290, 1200 і 865 см^{-1} . При ч. р. в кисні з'являються смуги 1716, 1290 і 1200 см^{-1} , а при ч. р. в азоті помітної зміни спектра не відбувається. Поява смуги поглинання в інтервалі 1710-1720 см^{-1} свідчить про утворення карбонільних груп в результаті окислення; смуга 1640 см^{-1} показує на появу подвійних зв'язків $> \text{C} = \text{C} <$; смуги 1290 і 1200 см^{-1} і можуть бути віднесені до ефірних ($\text{R}-\text{OR}'$) і карбоксильних груп.

Порядок розташування полімерів по стійкості до різних впливів різних. За інтенсивністю змін інфрачервоних спектрів, молекулярної маси, по створені зшитої фракції під дією ч. р. плівки розташовуються в наступному порядку: найменш стійким виявляється поліетилен, більш стійким — полістирол і ще більш — поліетилентерефталат.

Але по стійкості до ерозії під дією ч. р. ці полімери розташовуються в іншому порядку: найменш стійким до ерозії є поліетилентерефталат, більш стійким — полістирол і ще більш — поліетилен. На підставі цього можна зробити висновок про відсутність відповідності між інтенсивністю структурних змін і швидкістю ерозії під дією ч.р.

При ч.р. в твердих і рідких діелектриках в відсутності газових включень особливу роль набуває авто-термоелектрична емісія з поверхні електрода при негативній його полярності. Подібні процеси можуть мати місце і при позитивній полярності електрода, але в цьому випадку провідність має, мабуть,

дірковий механізм. При цьому робота виходу становить не більше 3 еВ внаслідок зниження потенційного бар'єру на межі поділу речовин; або за рахунок накопичуються об'ємних розрядів, або за рахунок впливу ближнього порядку колективізації електронів в рідкому або твердому діелектрику. Зниження потенційного бар'єру призводить до того, що досить потужна емісія електронів може виникати при локальних напруженостях порядку 5-105 В/см.

Авто-термоелектричну емісію можна вважати родоначальницею електронних процесів в рідких і твердих діелектриках, що визначають подальший розвиток ч.р. Руйнування діелектрика відбувається за рахунок енергії, накопиченої електронами в електричному полі і переданої молекулам і атомам діелектрика.

Енергія ч. р. витрачається на розвиток наступних процесів: розігрів обсягу газу або рідини включення і прилеглих до нього обсягів твердого діелектрика; збудження атомів газу або рідкого діелектрика відповідно при розвитку ч. р. в газі або рідині і пов'язане з цим процесом випромінювання; іонізацію атомів газу або рідини; бомбардування поверхні твердого діелектрика, що прилягає до області розвитку ч. р. або електродів (розрив молекулярних зв'язків, ерозію, структурні зміни); розширення каналу розряду.

При ч. р. в газовому включенні близько 30% енергії витрачається на розширення каналу розряду, до 25% — на випромінювання, 3-4% — на іонізацію, 6-8% — на бомбардування поверхні твердого діелектрика електронами. Експериментально показано, що при ч. р. в рідких діелектриках на випромінювання, що реєструється на відстані близько 1 см від місця виникнення ч.р., витрачається близько 0,1% всієї енергії розряду. Прямі дані про частку енергії, що перетворюється в тепло, відсутні. Як випливає з даних літератури, ця частка залежить від виду розряду і збільшується при зменшенні температури каналу розряду. Частина енергії витрачається на розширення каналу. Підрахунки показують, що на руйнування діелектрика витрачаються лише відсотки від загальної енергії розряду.

Незважаючи на великі відмінності в характері і ступеня руйнування різних матеріалів і видів ізоляції, можна висловити ряд положень, які є досить загальними, для органічних діелектриків.

Руйнування, що виникають в твердих і рідких діелектриках в відсутності кисню, зазвичай пов'язані з виділенням водню або з виділенням інших газів водневого походження — це можуть бути метан, вуглекислий газ і т.д. Можлива освіта вуглецевих сполук, в ряді випадків мають значну провідність — це можуть бути асфальтени, вуглецеві освіти типу дендритів (поверхневих дендритів і т.д.). У хлорованих діелектриках можливе виділення хлору, хлористого водню і їх похідних.

При руйнуванні полімерів розрядами в атмосфері азоту відбувається газовиділення, причому, наприклад, при впливі ч. р. на поліетилен 99% газу складається з водню. Була встановлена лінійна залежність між потужністю ч. р. $P_{чр}$ і швидкістю виділення водню v_{H_2} (рис. 2.3). Для оцінки стійкості полімерів до дії ч. р. пропонується ввести критерій K_p , причому

$$K_p = P_{чр} / v_{H_2від} \approx n_{чр0} U_{чр0}^2 / v_{H_2від} \quad (2.1)$$

де $v_{H_2від}$ — відносна швидкість виділення водню, віднесена до 1% -ї концентрації водню в матеріалі; $n_{чр0}$ — число ч. р. в секунду з амплітудою $U_{чр0}$; $U_{чр0}$ — найбільш ймовірна амплітуда імпульсів ч. р. (вимірювалася в вольтах).

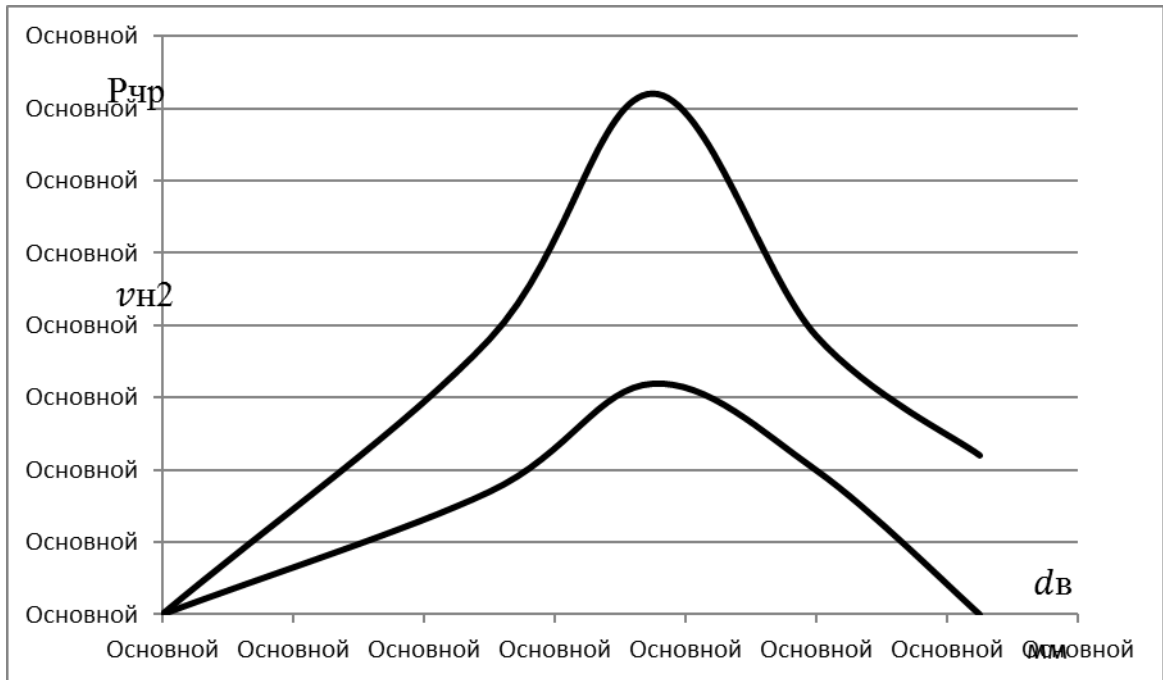


Рисунок 2.3. Залежність потужності ч. р. (1) і швидкості виділення водню (2) від товщини d_B газового прошарку.

2.2 Характеристики часткових розрядів, що визначає руйнування ізоляційних матеріалів.

Відповідно до загальним підходом до розгляду руйнувань ізоляції, визначальними повинні бути або енергія одиничного розряду або потужність розрядів.

Характеристики одиничного розряду є визначальними в тих випадках, коли може відбуватися активний обмін в середовищі діелектрика. Це характерно, наприклад, для композиції твердого та чималої кількості рідкого діелектрика, здатного інтенсивно циркулювати в ізоляційної конструкції. У цьому випадку продукти руйнування рідини, що виникають під дією розрядів малої інтенсивності, швидко ліквідовуються і не накопичуються в місці ч.р. При значній енергії одиничного імпульсу виникає руйнування вже в твердій фазі комбінованого діелектрика, що визначає подальший розвиток руйнування незалежно від властивостей рідини. Типовий приклад композиції такого типу

— масло-бар'єрна ізоляція силових трансформаторів, для руйнування якої визначальною є енергія одиничного розряду. Ця енергія в ряді випадків може бути охарактеризована уявним зарядом одиничного розряду.

Якщо відбувається загальна зміна структури діелектрика, наприклад сильне газовиділення, насичення газом, або зміна хімічної структури, пов'язане з виділенням кислот, зі збільшенням $\tan \delta$, з можливістю розвитку теплового пробою, то необхідно мати на увазі, перш за все, потужність ч. р.

При поверхневій ерозії швидкість руйнування діелектрика пропорційна середньому струму ч. р, а не потужності. Це пояснюється тим, що тут визначальним є поверхнєве вкладення енергії або поверхнєва щільність енергії. Так як енергія кожної частки, яка бере участь в розряді, змінюється в обмеженому інтервалі, то загальна енергія або загальна потужність, що передається поверхні діелектрика, цілком визначається кількістю частинок, що потрапляють на поверхню; при цьому можна розглядати струм або щільність струму ч.р. як характеристики, що визначають ерозію і руйнування твердого діелектрика. Слід також зазначити, що при поверхневій ерозії частина енергії ч.р. втрачається в газовому проміжку. Якщо канал розряду розташований в товщі твердого діелектрика або в рідкій фазі комбінованого діелектрика, коли енергія всього каналу бере участь в руйнуванні діелектрика, то перш за все необхідно враховувати енергію або потужність розрядів.

2.3 Енергетичні характеристики руйнування ізоляційних матеріалів

У розділі 2.2 показано, які характеристики ч.р. необхідно в першу чергу брати до уваги при розгляді руйнування діелектрика. Для кількісної оцінки ступеня руйнування потрібно також знати енергетичні характеристики діелектриків, що зв'язують енергію, передану речовини, і ступінь руйнування. Енергетична характеристика B має фізичний сенс кількості речовини, зруйнованої при впливі енергії розряду в 1 Дж і має розмірність $\Gamma/\text{Дж}$ або

$$\text{см}^3/\text{Дж}$$

Як енергетична характеристики може розглядатися коефіцієнт ерозії B_e , $\Gamma/\text{Дж}$, коли йдеться про руйнування полімерних матеріалів; коефіцієнт газостойкості B_g , $\text{см}^3/\text{Дж}$, коли мова йде про газовиділенні з твердих або рідких діелектриків; коефіцієнт B_k , $\Gamma/\text{Дж}$, при виділенні низькомолекулярних кислот; коефіцієнт B_x , $\Gamma/\text{Дж}$, що характеризує швидкість утворення продуктів ущільнення при розкладанні рідких діелектриків. Так, наприклад, коефіцієнт K_p у формулі (3.1) по суті є величиною, рівною $1/B_g$.

Таким чином, вважаємо за доцільне наступний підхід до встановлення зв'язку між інтенсивністю розрядів і руйнуванням ізоляції. Знаючи, з одного боку, енергію одиничного ч.р. або сумарну енергію великої серії довгоіснуючих розрядів і, з іншого боку, загальна кількість зруйнованого при цьому діелектрика, можна визначити кількість зруйнованої речовини або кількість речовин, отриманих внаслідок руйнування (розкладання) вихідного матеріалу, при розвитку ч. р. з енергією в 1 Дж.

Як приклад розглянемо енергетичні характеристики руйнування мінерального масла в бумажно-масляній ізоляції. Як вже говорилося, перш за все під дією ч. р. відбувається руйнування молекул масла. Відомо, що мінеральне масло складається, в основному, з вуглеводнів трьох фракцій: парафінових, нафтонових і ароматичних. Під дією електронного бомбардування відчепляються атоми водню, в принципі, від молекул будь-який з цих фракцій. Поряд з відривом водню відбувається реакція гідрогенізації, тобто приєднання атомів водню. В реакції гідрогенізації беруть участь, в основному, молекули ароматичної фракції, мають бензольні кільця з подвійними (тобто ненасиченими) зв'язками між атомами вуглецю.

Якщо розглядати тільки процеси відриву водню, то, знаючи енергію зв'язку водню в молекулі парафіну, нафтену або ароматики, можна підрахувати кількість газу, який виділяється з масла при витраті енергії в 1 Дж. Енергія зв'язку С-Н становить близько 100 ккал /моль, тобто близько 4 еВ.

Таблиця 2.1

Значення коефіцієнта ерозії V_e для плівкових полімерів і епоксидних компаундів.

| Матеріал | $V_e, \text{мм}^3/\text{Дж}$ | $V_e, \text{г Дж}$ |
|---|------------------------------|----------------------|
| Поліетилен..... | $1,3 \times 10^{-3}$ | $1,2 \times 10^{-6}$ |
| Поліетилентерефталат..... | $1,4 \times 10^{-3}$ | $1,4 \times 10^{-6}$ |
| Фторопласт-4..... | $5,7 \times 10^{-3}$ | $1,2 \times 10^{-5}$ |
| Аральдит з затверджувачем..... | 2×10^{-3} | 2×10^{-6} |
| Аральдит з затверджувачем і наповнювачем..... | $5,9 \times 10^{-3}$ | 1×10^{-5} |

За розрахунками під дією енергії в 1 Дж виділяється приблизно $3 \times 10^{-2} \text{ см}^3$ водню, а при визначенні експериментальним шляхом ця величина виявляється набагато менше. Дослідження, проведені на зразках ізоляції і в реакторах для визначення газостійкості масел, дали значення коефіцієнта газовиділення V_g , рівні $(1 - 3) \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{Дж}$. Значно менші, у порівнянні з обчисленими, значення коефіцієнта V_g пояснюються, по-перше, тим, що на руйнування йде не вся енергія розрядів, а тільки менша її частина (решта енергії перетворюється в теплові коливання молекул діелектрика і йде на розширення каналу розряду) . По-друге, в маслі йдуть не тільки реакції розкладання, але і реакції гідрогенізації, інтенсивність яких збільшується зі збільшенням вмісту ароматики.

Експериментальні дані по визначенню терміну служби ізоляції на основі полімерів і епоксидних смол також показують, що можна пов'язати одиницю витраченої енергії до кількості зруйнованого діелектрика, тобто визначити коефіцієнт ерозії (табл. 2.1).

2.4 Вплив температури на електричне старіння ізоляції

Електричне старіння і руйнування діелектрика під дією ч. р. багато в чому пов'язано з хімічними процесами, що протікають в області розвитку ч. р. Це головним чином відноситься до хімічних реакцій, що протікають при впливі на діелектрик продуктів, що виникли в результаті ч. р., або реакцій мікро-радикалів, що утворилися під дією ч. р., з киснем газової середовища або іншими активними речовинами, що виникли в результаті ч. р. Швидкість протікання цих процесів визначається кінетикою хімічних реакцій.

Якщо позначити через A_0 початкове число молекул речовини в одиниці об'єму, а через A_t — те ж число молекул через проміжок часу t , то швидкість хімічних реакцій в більшості випадків може бути виражена формулою:

$\left(-\frac{dA_t}{dt}\right) = K_t A_t$, де K_t — середня ймовірність розпаду однієї молекули в

одиницю часу, що визначає швидкість хімічних реакцій.

Залежність швидкості реакції від температури підкоряється закону Арреніуса:

$$K_t = K e^{-W_a/(kT)}. \quad (2.2)$$

де K — постійна, що залежить від структури речовин, що вступають в реакцію; W_a — енергія активації; k — постійна Больцмана.

З останніх двох рівнянь з урахуванням початкових умов (при $t = 0$, $A = A_0$) отримуємо $A_t = A_0 e^{-K_t t}$.

Для органічної ізоляції інтенсивність хімічних процесів зазвичай зростає приблизно вдвічі зі збільшенням температури на кожні 10°C .

При старінні на постійній напрузі необхідно враховувати, що з ростом температури істотно зростає кількість ч. р. в одиницю часу і струм ч. р. Це призводить до збільшення потужності ч. р. і зниження терміну служби ізоляції. У зв'язку з цим при постійній напрузі з ростом температури зниження терміну

служби відбувається як в результаті збільшення швидкості хімічних реакцій, так і в результаті збільшення потужності ч. р., Причому в різних умовах може сильніше проявлятися або одна, або інша причини. У зв'язку з викладеним, вплив температури на термін служби ізоляції сильніше позначається при старінні на постійній напрузі, ніж на змінній.

2.5 Визначення допустимих напруг

Допустимі напруги можуть визначатися наступними умовами надійної безаварійної роботи: 1) при робочій напрузі протягом необхідного терміну служби; 2) при впливі перенапруг (внутрішніх, грозових), що виникають на електрообладнанні в процесі експлуатації.

Як перша, так і друга умова можуть бути визначальними для вибору допустимих робочих напруг і габаритів ізоляційних конструкцій.

Перша умова пов'язана з процесами електричного старіння при тривалому впливі робочої напруги з тепловим режимом ізоляційної конструкції і визначає вибір допустимих робочих напруг. Якщо визначальними в процесі електричного старіння є ч. р., То робочі напруги вибираються на підставі допустимих характеристик ч. р. Якщо визначальними є теплові процеси, то робочі напруги вибираються з міркувань відсутності неприпустимого перегріву ізоляції і відсутність можливості розвитку теплового пробою. В окремих випадках допустимі робочі напруги можуть визначатися електрохімічними процесами старіння (наприклад, електролітичні процеси при постійній напрузі).

Друга умова визначається головним чином короткочасною електричною міцністю і допустимою напругою при перенапруженнях визначаються з умов відсутності (або досить малу ймовірність) пробою ізоляції при очікуваному числі перенапруг певної амплітуди і форми. При цьому необхідно також враховувати, щоб вплив очікуваних перенапруг не приводили до незворотних змін в ізоляції, що знижує тривалу електричну міцність ізоляції. В цьому

випадку допустимі напруженості можуть визначатися також допустимими характеристиками ч.р. при впливі перенапруг.

Розглянемо більш докладно вибір допустимих робочих напруг по характеристиках ч. р.

В цьому випадку допустимі робочі напруги визначаються за умовами допустимої інтенсивності ч. р. при заданому терміні служби. Для різних видів ізоляції і різних ізоляційних конструкцій визначальними можуть бути різні характеристики ч. р.

Для ізоляційних конструкцій, що містять рідкі діелектрики, схильні до інтенсивної циркуляції та обміну, визначальною характеристикою найчастіше є значення уявного заряду ч. р. Ця ж характеристика може бути визначальною, якщо виникнення ч. р. певної інтенсивності призводить до незворотних змін у твердій або комбінованій ізоляції і виникнення нового розвивається процесу руйнування ізоляції.

Для цих конструкцій допустимі робочі напруженості, а в ряді випадків і допустимі напруги при перенапруженнях визначаються умовою відсутності ч.р. з уявним зарядом певного небезпечного значення.

Для робочих напруженостей і напруг визначальними є характеристики початкових ч. р. Зазвичай в цих випадках допустима робоча напруженість $E_{\text{раб}}$ і аналогічно допустима робоча напруга $U_{\text{раб}}$ вибираються з умов:

$$E_{\text{раб}} = E_{\text{н}} - 3\sigma_{\text{нЕ}} \quad (2.3)$$

$$U_{\text{раб}} = U_{\text{н}} - 3\sigma_{\text{нU}} \quad (2.4)$$

де $E_{\text{н}}$ і $U_{\text{н}}$ — відповідно середні значення напруженості і напруги початкових ч. р. з уявним розрядом певного значення; $\sigma_{\text{нЕ}}$ і $\sigma_{\text{нU}}$ — середньоквадратичні відхилення напруженості і напруги зазначених початкових ч.р.

Формулами (2.3) і (2.4) можна користуватися при розподілі напруженості і напруги початкових ч. р., близьких до нормального, і обмеженому значенні коефіцієнта варіації $\sigma_{нЕ}/E_{н}$ або $\sigma_{нU}/U_{н}$, що не перевищує 0,15.

Для вибору допустимих випробувальних напруженостей $E_{ісп}$ і напруги $U_{ісп}$ можна виходити з умови допустимості при випробуваннях початкових ч. р., що не приводять до швидкого руйнування ізоляції, і не допускати критичних ч. р., що призводять до швидких незворотних змін. При цьому можна користуватися аналогічними формулами:

$$E_{ісп} = E_{кр} - 3\sigma_{крЕ} \quad (2.5) \quad \text{і} \quad U_{ісп} = U_{кр} - 3\sigma_{крU} \quad (2.6)$$

де $E_{кр}$ і $U_{кр}$ — відповідно середні значення напруженості і напруги критичних ч. р.; $\sigma_{крЕ}$ і $\sigma_{крU}$ — середньоквадратичні відхилення напруженості і напруги критичних ч. р.

Зазвичай функції розподілу напруженості або напруги критичних ч. р. досить добре відповідають нормальному закону, а коефіцієнти варіації $\sigma_{крЕ}/E_{кр}$ або $\sigma_{крU}/U_{кр}$ не перевищують 0,1.

Формули (2.3) - (2.6) відповідають ймовірності виникнення неприпустимих ч.р. при робочих або випробувальних напругах, що дорівнює приблизно 10^{-3} .

Якщо в ізоляції процеси руйнування діелектрика ч. р. накопичуються і поступово приводять ізоляцію до руйнування, причому в процесі їх розвитку практично аж до пробою або різкого зниження електричної міцності фізика і характер процесу руйнування ізоляції залишаються незмінними, то в цьому випадку визначальними характеристиками ч. р. є потужність або струм ч. р.

Як показують експерименти, допустима робоча напруженість в цих випадках визначається найчастіше ч. р. з інтенсивністю на рівні

$10^{-14} - 10^{-15}$ Кл, що істотно ускладнює експериментальне визначення необхідних параметрів. У цьому випадку характеристики ч.р. на рівні $10^{-12} - 10^{-11}$ Кл (наприклад, напруга виникнення цих розрядів) не можуть характеризувати тривалу електричну міцність ізоляції і можуть з'явитися тільки фактом, яка контролюватиме стан ізоляції в цілому: відсутність грубих дефектів, якість технології виготовлення ізоляції, відсутність зволоження, розшарування і т.п.

3 Часткові розряди в маслонаповненому обладнанні

3.1 Основні види часткових розрядів в силових трансформаторах.

У силових високовольтних трансформаторах застосовується, головним чином, масло-бар'єрна ізоляція, яка складається з шарів, що чергуються електрокартоном і нафтовим маслом. З цих двох компонентів при впливі змінної і імпульсної напруги найбільш навантажені масляні канали. Так, наприклад, в області рівномірного поля співвідношення між напруженням в маслі E_M і в електрокартоні E_K дорівнює:

$$\frac{E_M}{E_K} = \frac{\epsilon_K}{\epsilon_M} \approx 2. \quad (3.1)$$

Так як електрична міцність масла в 3-4 рази менше міцності просоченого, електрокартону, то ч. р. виникають насамперед у прошарках масла.

У силових трансформаторах локальні підвищення напруженості електричного поля, достатні для виникнення ч. р., Можуть виникати в різних місцях, причому небезпека ч. р. певної інтенсивності істотно залежить від місця їх виникнення. Так, інтенсивні ч. р. у вигляді стримерної корони в чисто масляному проміжку (наприклад, з фланця прохідного ізолятора) при впливі робочої напруги або перенапруги представляють істотно меншу небезпеку, ніж аналогічні ч. р. в масло-бар'єрній ізоляції (наприклад, пробій масляного каналу), так як в останньому випадку ці ч. р. призводять до незворотних руйнувань твердої ізоляції. Крім того, ч. р. однакової інтенсивності, що виникають в різних місцях по довжині обмотки, призводять до різних реєструється значенням удаваного розряду внаслідок загасання сигналу при його проходженні по обмотці. Ці обставини істотно ускладнюють встановлення небезпечних рівнів ч. р. при різних впливах.

Можна виділити наступні види ч. р. в ізоляції силових трансформаторів:

1) пробою масляного каналу в масло-бар'єрній ізоляції середній частині обмотки;

- 2) пробою масляного каналу в області краю обмотки;
- 3) пробою масляного зазору в місці зіткнення ізолюваного проводу та електрокартону або паперу (ізоляція відводів, перемичок, міжфазна ізоляція);
- 4) ч. р. в бумажномасляній ізоляції на відводах, перемичках і т.п.;
- 5) пробою масляного каналу між котушками (в поздовжньої ізоляції);
- 6) частковий пробій виткової ізоляції;
- 7) ковзний розряд по поверхні електрокартону.

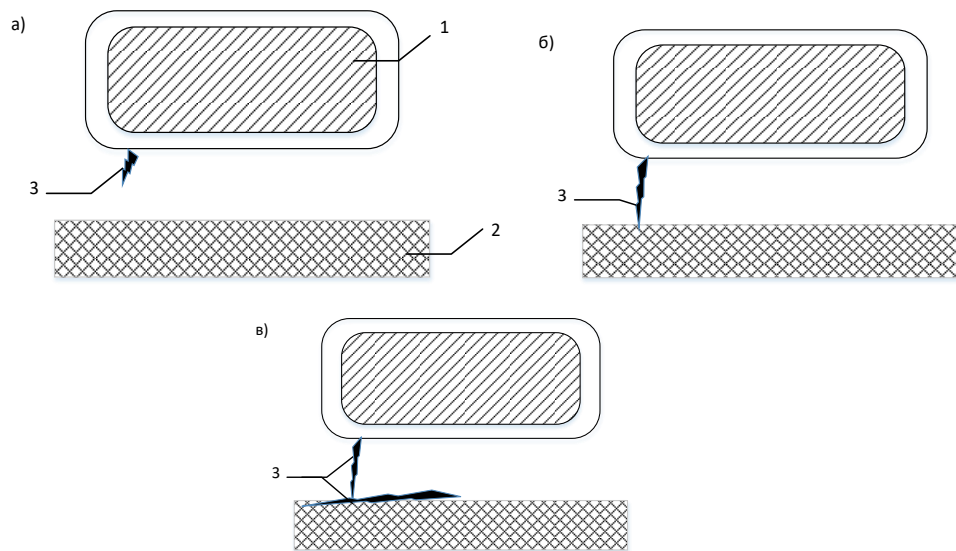


Рисунок 3.1. Схема розвитку пробою масляного каналу.

1 - обмотка; 2 - бар'єр; 3 - розряд.

Схема розвитку пробою масляного каналу приведена на рис. 3.1. Такий пробій найчастіше призводить до місцевих незворотних ушкоджень твердої ізоляції (обвуглені сліди на поверхні або в товщі твердої ізоляції електрокартону або паперу) і можливого подальшого розвитку цих ушкоджень. Для ізоляції трансформатора важливо не тільки збереження її ізолюючих властивостей в момент пробою масляного каналу, а й збереження її тривалої міцності в процесі подальшої експлуатації. Тому напруга, що приводить до пробою масляного каналу, прийнято ототожнювати з пробивною напругою масло-бар'єрної ізоляції, яка визначає її короточасну електричну міцність.

У головній ізоляції трансформаторів висока напруженість виникає біля поверхні проводу обмотки $E_{max} = (2 \div 2.5)E_M$, де E_M — напруженість в середині масляного каналу, яка визначається за формулою:

$$E_M = \frac{U}{r_{cp} \sum_i \frac{1}{\epsilon_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}. \quad (3.2)$$

де r_{cp} — радіус поверхні, що проходить через середину масляного каналу; r_i — радіус граничної поверхні i -го шару; ϵ_i — діелектрична проникність i -го шару.

У зв'язку зі значним спотворенням поля в першому масляному каналі, як правило, пробої настають перш за все в цьому каналі, що розділяє обмотку і перший бар'єр з картону.

Характерними особливостями умов роботи масло-бар'єрної ізоляції в трансформаторах і реакторах є відсутність відкритих металевих поверхонь електродів в місцях найбільшої напруженості поля і відсутність гострих кромek і кутів на електродах. Тому початкові ч. р. локалізуються не у поверхні металу, а у поверхонь ізоляції, в першу чергу — в місцях стиків ізоляційних деталей. Іншим осередком початкових ч. р. є місця торкання бар'єрів і ізольованого проводу обмотки в переходах і перемичках. На рис. 3.2 показано виконання ізоляції у внутрішній поверхні обмотки і картина електричного поля в цьому вузлі.

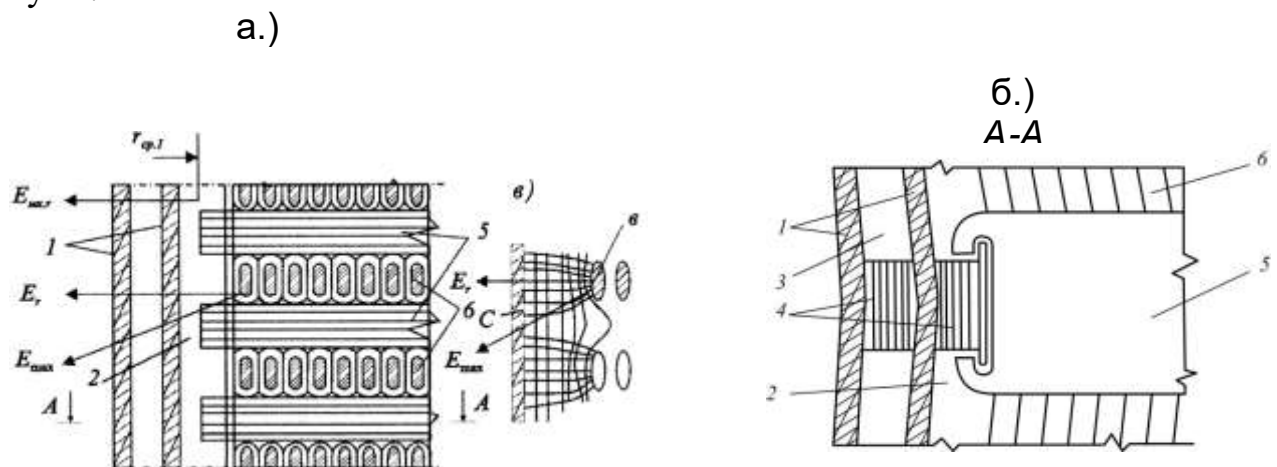


Рисунок 3.2. Ескіз виконання ізоляції у внутрішній поверхні обмотки (а) і картина електричного поля в масляному каналі поблизу обмотки (б)

3.2 Руйнування масло-бар'єрної ізоляції часткових розрядів

Електричне старіння масло-бар'єрної ізоляції полягає в тому, що в результаті початкових ч. р. малої інтенсивності відбувається розкладання масла, що супроводжується виділенням газу (головним чином, водню) і утворенням важких смолистих речовин, частково випадають з масла і осідають на поверхні ізоляційних деталей або на дні бака у вигляді чорного шламу. Освіта газу небезпечно тим, що він може накопичуватися в таких вузлах ізоляції, звідки вихід бульбашок є важким. З плином часу газовий міхур може досягти таких розмірів, що в ньому самому почнуться ч. р. високої інтенсивності, які сприятимуть подальшому газовиділенню і можуть зруйнувати тверду ізоляцію. Освіта шламу, частково розчиняється в маслі, частково осідає на поверхні ізоляції, небезпечно тим, що збільшується $\tan \delta$ ізоляції в цілому і погіршується відвід тепла з поверхні ізоляції.

Інтенсивність слабких початкових ч. р. в масло-бар'єрній ізоляції лежить в межах від 10^{-12} – 10^{-10} Кл. Якщо ці розряди відбуваються навіть поблизу відкритої поверхні паперу і картону, з їх впливом на тверду ізоляцію можна не рахуватися. Вельми тривалий (протягом декількох років) вплив початкових ч. р. на папір і картон призводить тільки до відкладення на поверхні нерозчинного шламу. При цьому ізоляція залишається цілком працездатною.

Більш інтенсивні ч. р. на рівні 10^{-9} – 10^{-8} Кл найчастіше виникають при пробоях масляного прошарку, вузького масляного клина або газових бульбашок з діаметром більше 1 мм. Такі повторювані пробої викликають рясне газовиділення і розвиток ч.р. вздовж поверхонь картону або в його товщі. При цьому можлива поява сильно розгалуженого обвуглене каналу по поверхні або в товщі електрокартону, захоплюючого великі поверхні (десятки квадратних дециметрів) і отримав назву «повзе розряду». На рис. 3.3 приведена фотографія ізоляційної прокладки, що знаходилася в зоні розвитку такого розряду.

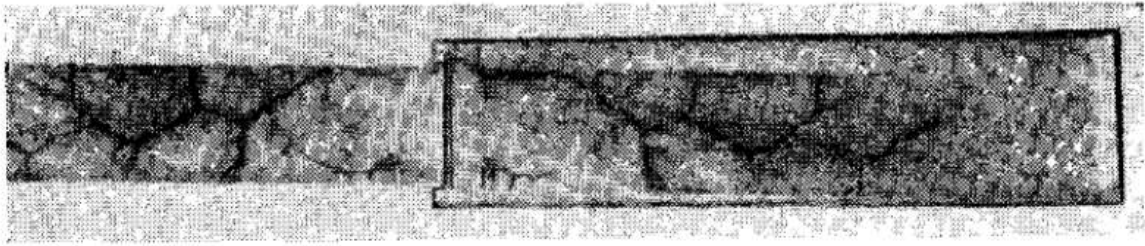


Рис. 3.3 Фотографія прокладки зі слідами повзучого розряду.

Повзучий розряд розвивається, як правило, в вузькій щілині між двома притиснутими один до одного поверхнями ізоляційних деталей або в товщі електрокартону, між його шарами. Розрядний канал замикає вузький масляний зазор, наприклад між виступаючим переходом обмотаного ізоляцією проводом і картонним циліндром. Цей розрядний канал має високу температуру, при якій може виникнути обвуглювання картону вздовж каналу. Його можна розглядати як провідник, на кінці якого різко збільшується напруженість електричного поля і утворюються нові пробої в маслі, нове обвуглювання картону і т. д. Весь процес розвивається тривало і має пульсуючий характер: при пробі нові ділянки зростає струм, з ростом струму збільшується падіння напруги в каналі і падає напруга на кінці каналу, який просувається. При цьому поле в кінці слабшає і пробої масла припиняються. Відповідно зменшується падіння напруги на обвугленому картоні і знову зростає напруженість поля в кінці каналу розряду. Для просування повзучого розряду велике значення мають газові бульбашки, що утворилися у кінця каналу за рахунок розкладання масла. Енергія, передана електронами стримера молекулам рідини, витрачається в основному на збільшення кінетичної енергії молекул рідини, тобто на підвищення температури. Коли остання досягне температури кипіння, відбудеться місцеве закипання рідини і утворення високопровідного каналу лідера в газі (плазми) з дуже малим падінням напруги. Такий канал обмеженої довжини викликає різке збільшення напруженості поля у його межі і виникнення більш інтенсивних ковзаючих розрядів по поверхні ізоляційного бар'єру. Там, де канал розряду, що має високу температуру, доторкається поверхні ізоляційного бар'єру (електрокартону, ізоляційної паперу), масло, яке

просякнуло картон або папір, випаровується і утворюються білі пагони, зникаючі незабаром після припинення розряду.

Якщо енергія, що виділяється в каналі розряду, досить велика, то температура каналу може досягти 2-3 тис. градусів, в результаті чого на поверхні ізоляції, по якій розвивається розряд, виникають обвуглені сліди у вигляді гіллястих чорних пагонів.

Оцінімо інтенсивність ч. р., Що призводять до тих чи інших руйнувань на поверхні ізоляції.

Оскільки температура інтенсивної термічної деструкції картону лежить в інтервалі 275-400 ° С, можна прийняти температуру картону в місці пошкодження ч. р. рівній 350-380 ° С.

Енергія, необхідна для нагрівання картону в місці ч.р.

$$W_T = m_K c_K \Delta T \quad (3.3)$$

де m_K — маса обвугленого картону; c_K — теплоємність картону; $\Delta T \approx 300$ К — різниця температур.

Як показує аналіз пошкоджень ізоляції силових трансформаторів; сумарна, довжина обвуглених доріжок в початковій стадії руйнування приблизно дорівнює 1 см, перетин — біля 10^{-4} см², а маса обвуглені картону — приблизно 10^{-4} г. Енергія, витрачена на нагрівання цього обсягу паперу на 300 ° С, становить ~ 0, 1 Дж. Якщо припустити внаслідок короткочасності процес нагрівання адіабатичним і знехтувати тепловідводом від місця виникнення ч. р., то енергія ч. р., що призводить до обвуглювання прийнятого обсягу картону, дорівнює також 0,1 Дж. Для ізоляції силових трансформаторів класу 220 кВ це відповідає уявному заряду ч. р. $q_{чр} = 3 \times 10^{-7} — 10^{-6}$ Кл.

За експериментальними даними в силових трансформаторах при робочій напрузі мають місце ч. р. з уявним зарядом від 3×10^{-12} до 3×10^{-9} Кл.

Аналіз показує, що тривале існування ч. р. з інтенсивністю $10\text{-п-}10 \sim 10$ Кл при робочому напрузі не призводить до помітних пошкоджень ізоляції і, очевидно, є безпечним. Тривале існування (протягом десятка годин і більше) ч. р. з інтенсивністю $10^{-11}—10^{-10}$ Кл призводить до появи слідів на картоні; кілька імпульсів з інтенсивністю $10^{-7}—10^{-6}$ Кл викликають обвуглювання картону.

3.3 Тривала міцність масло-бар'єрної ізоляції і допустимі напруженості

Визначення тривалої електричної міцності масло-бар'єрної ізоляції нашоувхується на значні труднощі. Це пов'язано з тим, що електрична міцність цієї ізоляції дуже слабо знижується зі збільшенням тривалості впливу. У зв'язку з цим незначне зниження напруги витримки призводить до різкого збільшення часу витримки до пробою.

На рис. 3.4 приведена залежність відносного значення, що ушкоджує напрузі від тривалості впливу, отримана на моделях масло-бар'єрної ізоляції типу МБІС і МБІК. Як впливає з цього малюнка, зниження напруги витримки на 10-15% нижче однохвилинної пробивної напруги призводить до збільшення часу витримки до пробою, (терміну служби) від 1 хв до 100 ч. При терміні служби від 10^{-1} с до десятків хвилин пробою каналу не підготовується попередніми ч. р. з інтенсивністю менше 10^{-7} Кл. На ділянці від десятків хвилин до 100 ч в ряді випадків при витримці моделей протягом $10^4—10^5$ с було відзначено зростання інтенсивності ч. р. в процесі витримки.

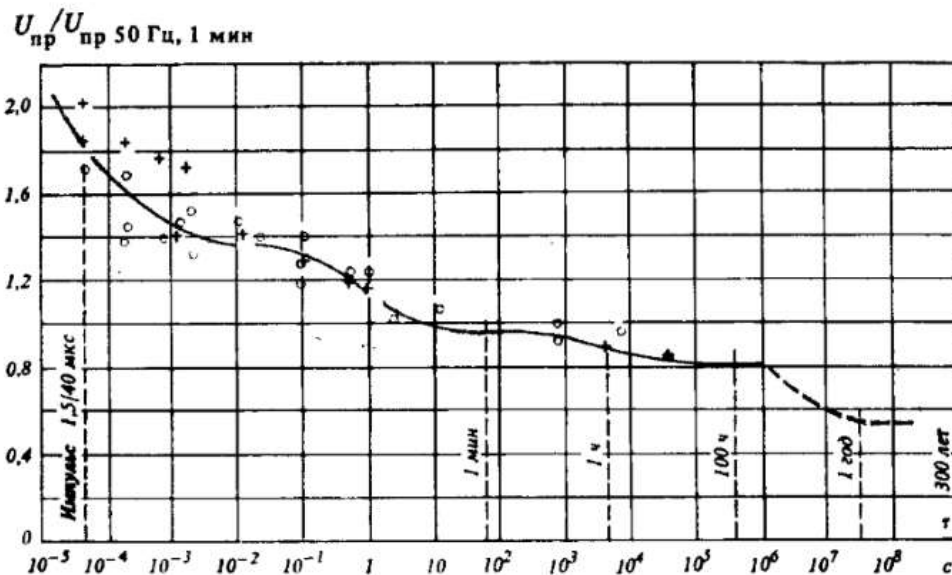
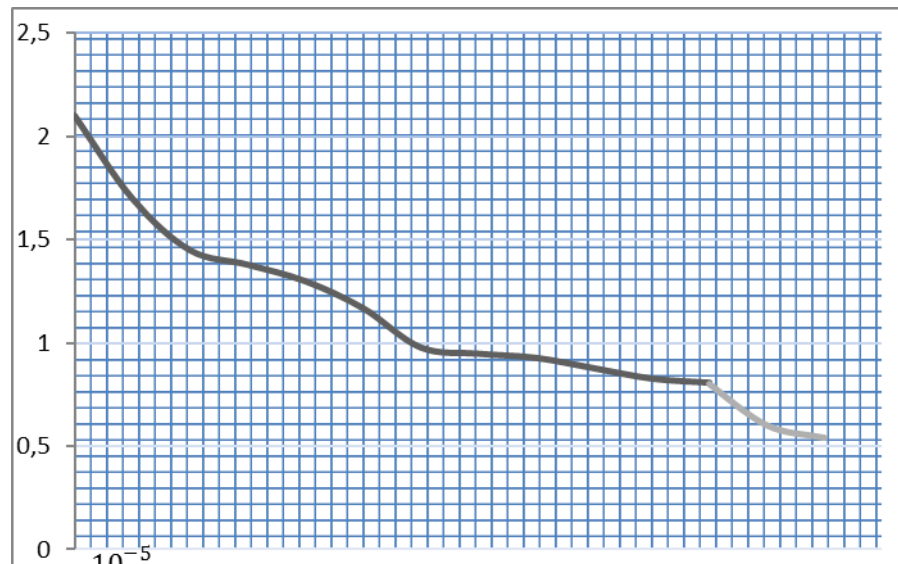


Рис. 3.4 Залежність відносної ушкодженої напруженості від тривалості впливу.

Проте подальші випробування аналогічних моделей за часів витримки до 100 ч не підтвердили зростання інтенсивності ч. р. в процесі витримки і перед пробом. За часів витримки від 1 хв до 100 ч порушення міцності масло-бар'єрної ізоляції не пов'язане з будь-якими тривалими, що готують процес пробом. За даними відносна міцність масло-бар'єрної ізоляції при часах витримки від 1 хв до 100 ч зменшується приблизно на 15%.

Для залежності $U_{пр}$ від часу витримки τ може бути запропонована формула:

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \left(\frac{U_{пр1}}{U_{пр2}} \right)^a. \quad (3.4)$$

де а за даними різних авторів лежить в межах від 55 до 74.

При визначенні допустимих напруженостей електричного поля при короткочасних діях в ізоляції силових трансформаторів на підставі випробування моделей можна користуватися наступною методикою. За цією методикою в залежності $E_{\text{МК пр min}}$ вводиться поправочний коефіцієнт, що враховує невелику кількість дослідів, використаних для отримання цієї залежності; менші в порівнянні з реальним трансформатором розміри зразка (з урахуванням розподілу напруги по обмотці реального трансформатора і обмеженості зони з граничними напруженням електричного поля); можливі відхилення в розмірах елементів ізоляції.

Інтервал між $E_{\text{МК пр min}}$ і напруженістю при однохвилинних випробуваннях напругою промислової частоти $E_{\text{ісп}}$ може бути прийнятий 15%, тобто $E_{\text{ісп}} = 0,85E_{\text{МК пр min}}$.

Наприклад, для конструкції ізоляції середини обмотки з масляним каналом 10 мм допустима напруженість в масляному каналі при однохвилинне впливі напруги 50 Гц дорівнює 70 кВ/см, при впливі внутрішніх перенапруг — 140 кВ/см і при впливі атмосферних перенапруг — 190 кВ/см. $E_{\text{ісп}}$ є допустимою сумарною напруженістю з урахуванням осьового поля обмотки, причому осьова складова напруженості повинна визначатися окремо, наприклад по картині поля обмотки для моменту часу, відповідного максимальній напрузі в найближчому до середини обмотки каналі.

Допустимі напруженості при короткочасних впливах можуть бути визначені також на підставі статистичного розкиду характеристик маслобар'єрної ізоляції. З достатнім ступенем надійності (більш 0,99) допустима напруженість може бути визначена за формулою:

$$E_{\text{ісп}} = k_s (E_{\text{МК пр}} - 3\sigma_E). \quad (3.5)$$

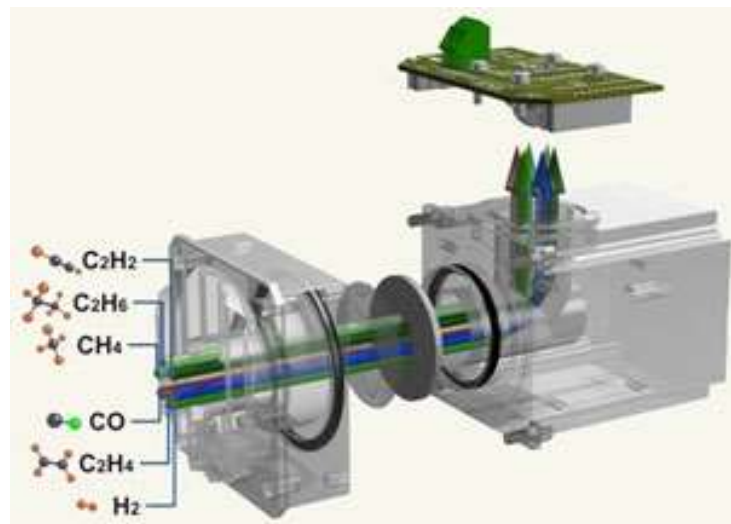
де $E_{\text{мк пр}}$ і σ_E — середня пробивна напруженість і середньо-квадратичне відхилення напруженості пробою масляного каналу; k_s — коефіцієнт, що враховує відмінність в площах електродів моделі і еквівалентного електрода для обмотки (з урахуванням розподілу напруги по обмотці).

З огляду на, що при однохвилинне додатку напруги 50 Гц в разі заземленої нейтралі в області досить високих напруженостей знаходиться приблизно 0,15 довжини обмотки, і приймаючи $\sigma_E/E_{\text{мк пр}} = 0.08$ маємо $E_{\text{ісп}} = 0.7E_{\text{мк пр}}$, що в підсумку практично збігається з рекомендаціями.

Допустима напруженість при робочій напрузі для масло-бар'єрної ізоляції в даний час може бути визначена орієнтовно, виходячи з ряду міркувань: відсутність ч. р. з удаваним зарядом більш 10^{-10} Кл, дослідження тривалої електричної міцності масло-бар'єрної ізоляції з урахуванням електротермоокислювального старіння, відсутність газовиділення в маслі (збільшення газомісткості масла) за рахунок процесів при впливу напруженості. Цим умовам відповідає допустима середня напруженість в масляному каналі від 30 до 50 кВ/см в залежності від ряду конструктивних і технологічних характеристик ізоляції.

3.4 Дослідження газів в маслі на основі пристрою HYDROCAL

HYDROCAL 1001 — Комбінований датчик газів в маслі.



Пристрій HYDROCAL 1001 це стаціонарно встановлюваний комбінований датчик газів в маслі, призначений для аналізу наступних розчинених в трансформаторному маслі ключових газів (ЗПКГ = Зважена повна концентрація горючих газів).

Ключові гази:

- Водень (H₂) приблизно 25 %
- Чадний газ (CO) приблизно 15 %
- Метан (CH₄) < 5 %
- Ацетилен (C₂H₂) приблизно 45 %
- Етилен (C₂H₄) приблизно 20 %
- Етан (C₂H₆) < 5 %

На підставі залучення майже всіх важливих ключових газів у зважену повну концентрацію газів HYDROCAL 1001 реагує незалежно від конкретної причини пошкодження.

Таким чином, він ідеальний, компактний і недорогий інструмент особливо для раннього виявлення пошкоджень.

Пристрій HYDROCAL 1001 обладнаний одним аналоговим виходом 4-20 mA для результату аналізу концентрації газів в маслі і 3 цифровими релейними виходами (аварійний сигнал Ні, аварійний сигнал Ні-Ні, несправність).

Основні переваги:

- Комбінований вимір водню (H₂), чадного газу (CO), метану (CH₄), ацетилену (C₂H₂), етилену (C₂H₄) і етану (C₂H₆).
- Комунікаційні інтерфейси ETHERNET 10/100 Мбит/с (мідний або оптоволоконний кабель) і RS 485 (протокол комунікації специфічний, MODBUS, підготовка до стандарту MEK 61850, DNP3, і т.д.).
- Конструкція приладу значно спрощена і габарити скорочені в порівнянні з іншими продуктами на ринку.

Загальні дані про прилад HYDROCAL:

Додаткове живлення: 88 В АС_{мін} ... 276 В АС_{макс}

Опція: 88 В DC_{мін} ... 390 В DC_{макс}

Енергоспоживання: макс. 250 ВА

Корпус: алюміній

Габарити: (Ш) 164 x (В) 164 x (Т) 170 мм

Вага: приблизно 4 кг

Температура зовнішнього середовища: -55°C ... +55°C

Температура масла: -20°C ... +90°C

Тиск масла: не більше ніж 800 кПа

Підключення до клапану: DIN ISO 228: G 1½

Опція: NPT 1½.

4 Аналіз методів, що використовуються для розпізнавання типів дефектів обладнання, за результатами аналізу розчинених в маслі газів

4.1 Діагностичні схеми для розпізнавання типу дефекту

Однією з найбільш поширених діагностичних схем для розпізнавання типу дефекту, прогнозованого за результатами АРГ, є аналіз найбільш характерних відношень газів. Рішення про тип дефекту приймається на основі порівняння значень відношень газів, отриманих в результаті розрахунку за вимірними концентраціям, зі значеннями відношень газів, що регламентовані чинними стандартами. Наприклад, в стандартах [1-4] для розпізнавання типу дефекту регламентовані значення трьох відношень газів: CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ і $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$. В методиці Дорненбурга [5] використовуються чотири відношення: CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$, $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$ і $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$. В методиці Роджерса [6] також використовуються значення чотирьох відношень: CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ і $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$. Як приклад у табл. 1 приведені значення відношень газів, регламентовані останньою редакцією стандарту ІЕС 60599 [1], в табл. 2 та табл. 3 діагностична схема розпізнавання типу дефекту відповідно до методики Роджерса. По цій методиці гази розміщуються по зростанню температури розкладу ізоляції. В залежності від значення відношень газів їм присвоюються кодові числа (див. табл. 2), за якими ставиться діагноз. Слід зазначити, що в діючому в Україні нормативному документі і кількість відношень газів, і їх значення збігаються з методикою МЕК.

Діагностичний висновок ґрунтується на поєднанні кодів, що присвоюються в залежності від відношення концентрацій газів, та значення (чи інтервалу значень) відповідних відношень концентрацій газів. Діагностичні висновки по комбінації кодів представлені в табл. 3.

Таблиця 4.1 – Інтерпретація результатів АРГ по стандарту МЕК 60599

| Діагностичний висновок | Співвідношення концентрацій характерних газів | | |
|--|---|----------------------|---------------------------|
| | R_2 (C_2H_2/C_2H_4) | R_1 (CH_4/H_2) | R_6 (C_2H_4/C_2H_6) |
| Часткові розряди | NS ¹⁾ | <0,1 | <0,2 |
| Розряди низької енергії | >1 | 0,1-0,5 | >1 |
| Розряди високої енергії | 0,6-2,5 | 0,1-1 | >2 |
| Перегрів при $t < 300^\circ C$ | NS* | >1 (NS)* | <1 |
| Перегрів в діапазоні температури $300^\circ C < t < 700^\circ C$ | <0,1 | >1 | 1-4 |
| Перегрів при $t > 700^\circ C$ | <0,2** | >1 | >4 |

Таблиця 4.2 – Співвідношення концентрацій газів та їхні коди по методу Роджерса

| Співвідношення концентрацій газів | Значення | Коди |
|-----------------------------------|----------|------|
| CH_4/H_2 (R_1) | <0,1 | 5 |
| | >0,1<1,0 | 0 |
| | >1<3 | 1 |
| | >3 | 2 |
| C_2H_6/CH_4 (R_5) | <1 | 0 |
| | >1 | 1 |
| C_2H_4/C_2H_6 (R_6) | <1 | 0 |
| | >1<3 | 1 |
| | >3 | 2 |
| C_2H_2/C_2H_4 (R_2) | <0,5 | 0 |
| | >0,5<3 | 1 |
| | >3 | 2 |

В методиці CIGRE SC-15 [7] значення кожного відношення задаються без урахування значень решти відношень: якщо $C_2H_2/C_2H_6 > 1$, то прогноуються розряди, якщо $H_2/CH_4 > 10$, то часткові розряди, а якщо $C_2H_4/C_2H_6 > 1$, то перегрів.

Наведені приклади наочно ілюструють, що відомі методики по розпізнаванню типу дефекту відрізняються не тільки кількістю

використовуваних відношень, але і їх значеннями, а також кількістю дефектів, що розпізнаються, та використовуваними діагностичними схемами.

Таблиця 4.3 – Діагностичні висновки по комбінації кодів

| Коди | | | | Діагностичний висновок |
|--------------------------|-------|-------|-------|---|
| R_1 | R_5 | R_6 | R_2 | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | Нормальний стан |
| 5 | 0 | 0 | 0 | Часткові розряди |
| 1,2 | 0 | 0 | 0 | Незначний перегрів < 150 °С |
| 1,2 | 1 | 0 | 0 | Незначний перегрів (150–00) °С |
| 0 | 1 | 0 | 0 | Незначний перегрів (200–300) °С |
| 0 | 0 | 1 | 0 | Перегрів провідників |
| 1 | 0 | 1 | 0 | Циркуляційні струми в обмотках |
| 1 | 0 | 2 | 0 | Струми в магнітопроводі та бакові, «гаряча» точка |
| 0 | 0 | 0 | 1 | Поверхневі розряди |
| 0 | 0 | 1,2 | 1,2 | Дугові процеси |
| 0 | 0 | 2 | 2 | Тривале іскріння |
| 5 | 0 | 0 | 1,2 | «Повзучий» розряд |
| CO ₂ /CO > 11 | | | | Підвішена температура в твердій ізоляції |

В роботі [8] виконано аналіз графічних методів розпізнавання, показано, що як координати, за якими визначається тип дефекту, можуть бути використані різні діагностичні критерії. Наприклад, значення відношень газів використовуються в прямокутнику Дорненбурга [1, 5] та в квадраті ETRA [3, 9]. В трикутниках Дюваля [10] і GATRON [9] тип дефекту визначається по значенню відсоткового вмісту газів (CH₄, C₂H₄, C₂H₂ в методі Дюваля і H₂, C₂H₂ та зважена сума вуглеводневих газів CH₄, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₆, и C₃H₈ в методі GATRON). А в методі ключового газу [11] тип дефекту визначається по відсотковому вмісту п'яти газів H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄ и C₂H₂. В методі номограм [12] тип дефекту визначається по графічному образу, який будується по відношенню п'яти газів (H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄ і C₂H₂) до газу з

максимальним вмістом. При цьому тип дефекту визначається шляхом порівняння отриманої номограми з еталонною.

На додаток до методів, що регламентуються відомими стандартами, в літературних джерелах наведено велика кількість публікацій, в яких описані авторські методи розпізнавання типу дефекту. Значний об'єм публікацій [13-19] присвячений використанню нейронних мереж для розпізнавання типу дефектів. Слід відзначити, що в більшості робіт [13-16] як вхідні дані для розпізнавання типу дефекту використовувались значення відношень газів регламентовані в [1]. У [17] вхідними даними для нейронної мережі були як відношення з [1], так і відношення газів регламентовані в [6], а в [18] тільки відношення регламентовані в [6]. В [19] як вхідні дані використані відсоткові вмісти газів вуглеводневого ряду та водень. Ще одним напрямком вдосконалення процедури розпізнавання типу дефекту, що прогнозується за результатами АРГ, є використання апарату нечіткої логіки [20-23]. Однак, в цих роботах для розпізнавання типу дефекту використовуються виключно значення відношень газів, регламентовані стандартами [1, 2, 5-6]. В [25] розпізнавання типу дефектів пропонується виконувати, використовуючи правила асоціації, но при цьому для розпізнавання використовуються відношення з [1]. В [25] для розпізнавання типу дефекту розроблена інтелектуальна експертна система, але в ній також використовуються значення відношень газів регламентованих в [5] та [6]. А в роботі [26] запропоновано гібридний метод розпізнавання з використанням методу ключового газу та відношень газів зі стандартів [1, 2, 6]. В роботах [26-30] для діагностики стану МНО використано метод векторної релевантності. При цьому в [26-29] тип дефекту визначається на основі аналізу концентрацій газів вуглеводневого ряду та водню, а в [30] для розпізнавання дефекту використовувались координати графічних образів.

Досить велика кількість опублікованих робіт [15, 17, 18, 21, 31] присвячена оцінці достовірності різних методів розпізнавання. Виконаний аналіз наведених в цих роботах результатів показує, що при використанні

різних методів достовірність розпізнавання суттєво відрізняється для дефектів різного типу. Більш того, в роботі [32] показано, що графічні образи дефектів, побудовані за результатами АРГ обладнання зі схожими значеннями відношень газів і близьким відсотковим вмістом газів, можуть відрізнитися. Водночас значення відношень газів для дефектів, що мають схожі графічні образи також суттєво різняться. Крім того в МНО зі схожими значеннями відношень газів, відсотковий вміст газів, також може відрізнитися. У зв'язку з цим вдосконалення методів розпізнавання типу дефектів високовольтного обладнання за результатами АРГ є актуальною та практично значущою задачею.

4.2 Аналіз вмісту газів в обладнанні з дефектами різного типу

Результати АРГ по 2567 одиницям обладнання з дефектами різного типу були використані як вихідні дані. Ці дані отримані автором в результаті як співробітництва з енергетичними компаніями України, так і наведені у відкритих літературних джерелах.

Результати АРГ були розбиті на окремі масиви по типу встановленого дефекту. Для кожної одиниці обладнання були розраховані значення відношень газів. В процесі розрахунку аналізувались значення відношень газів: C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6 , значення яких регламентовані в [1-4]. Крім того розраховувались значення відношень C_2H_2/CH_4 і C_2H_2/C_2H_6 , які регламентовані методикою Дорненбурга [5], і значення відношення C_2H_6/CH_4 , яке регламентовано методикою Роджерса [6]. Для зниження погрішності, розрахунок виконувався тільки за умови, якщо значення концентрацій газів, що складають дане відношення, перевищували значення, що відповідають «межі появи газів в маслі». Ці значення залежать як від чутливості хроматографа, так і від методики вимірювання і, згідно з [3], складають: $H_2=50$, $CH_4=C_2H_6=C_2H_4=15$ та $C_2H_2=3$ мкл/л. Якщо розраховані значення відношень виходили за межі діапазону значень, регламентованого чинними стандартами для даного

дефекту, то результати АРГ для даної одиниці обладнання переносились в інший масив.

Після цього для кожної одиниці обладнання визначався відсотковий вміст газів [33]:

$$A_{i\%} = 100 \frac{A_i}{\Sigma},$$

де $A_{i\%}$ – відсотковий вміст даного газу; A_i – значення концентрації даного газу;

Σ – сума концентрацій газів вуглеводневого ряду та водню в пробі масла.

Розраховані значення порівнювались між собою та у випадку різниці у відсотковому вмісті результати АРГ переносились в інший масив.

Як графічний метод інтерпретації було використано метод номограм. Суть методу [13, 3] полягає в тому, що в пробі масла визначається газ з максимальною концентрацією, далі розраховуються величини відношень кожного газу до газу з найбільшою концентрацією. Будується графік номограми, на якому по осі абсцис розміщують гази строго в наступному порядку: H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , а по осі ординат відкладають розраховані відношення. Отримані точки сполучаються лінією. Отриманий графік порівнюється з еталонними номограмами і вибирається та, де досягається максимальний збіг. Ця номограма і визначає вид дефекту. Використовуючи даний метод для кожної одиниці обладнання, були побудовані номограми. Ці номограми порівнюються між собою і у випадку наявності візуальних відмінностей між ними, навіть при близьких значеннях відношень газів і їхнього відсоткового вмісту, результати АРГ переносились в інший масив.

В результаті сформовано 118 масивів з ідентичними значеннями відношень газів, близьким вмістом газів і схожими номограмами. В даних масивах представлені результати АРГ обладнання як з електричними розрядами з різним ступенем інтенсивності, так і з перегрівами з

температурами нижче 150°C, 150-300°C, 300-500°C, 500-700°C та вище 700°C, а також перегрівими з різною температурою, які супроводжуються електричними розрядами з різним ступенем інтенсивності. В таблиці 4 наведено розподіл масивів з однорідними значеннями відношень газів, відсоткового вмісту газів і схожими графічними образами дефектів (фактично з різними типами дефектів) по критерію газу з максимальним вмістом.

Таблиця 4.4 – Розподіл масивів з однорідними значеннями відношень газів, відсоткового вмісту газів і схожими графічними образами дефектів (фактично з різними типами дефектів) по критерію газу з максимальним вмістом

| Газ з максимальним вмістом | Кількість однорідних масивів |
|-------------------------------|------------------------------|
| H ₂ | 41 |
| CH ₄ | 20 |
| C ₂ H ₆ | 13 |
| C ₂ H ₄ | 30 |
| C ₂ H ₂ | 14 |
| Загалом | 118 |

Як видно з таблиці найбільше число різновидів дефектів трапилося в обладнанні, в результатах АРГ якого газом з максимальним вмістом є водень. Такими дефектами є відкладення X-воску, часткові розряди низької та високої енергії, розряди низької енергії, іскрові розряди з різним ступенем інтенсивності, повзучі розряди та розряди по поверхні, дугові розряди, а також перегриви з температурою менше 150°C, і розряди з різним ступенем інтенсивності, що супроводжуються перегрівими.

Для обладнання, в результатах АРГ якого газом з максимальним вмістом є метан, основними дефектами є часткові розряди, перегриви в діапазонах температур 150-300°C і 300-700°C, а також перегриви, що супроводжуються частковими розрядами, розряди низької та високої енергії.

Максимальна концентрація етану виявлена у 252 одиницях МНО. Для

цього обладнання основними дефектами є відкладення X-воску, часткові розряди, перегрів в діапазоні температур 150-300°C і перегриви, що супроводжуються розрядами с з різним ступенем інтенсивності. Слід відзначити, що в жодному з чинних стандартів по інтерпретації результатів АРГ не наведені графічні образи для дефектів з максимальним вмістом етану. Водночас, як видно з таблиці 4, авторами виділено 13 таких дефектів.

Для обладнання, в пробах АРГ якого етилен має максимальний вміст, основними дефектами є перегриви в діапазоні температур 500-700°C, перегриви температурою вище 700°C, а також перегриви, що супроводжуються частковими розрядами і розрядами низької та високої енергії.

Для 239 одиниць дефектного обладнання, для якого газом с максимальною концентрацією є ацетилен, виділено 13 груп дефектів, в тому числі часткові розряди, розряди низької та високої енергії, а також часткові розряди, розряди низької та високої енергії, що супроводжуються нагрівом.

Сформовані 118 масивів з ідентичними значеннями відношень газів, близьким вмістом газів і схожими номограмами зі вказанням типу та причини дефектів були використані як навчальна вибірка для розробки багатокритеріального методу розпізнавання типу дефекту за результатами АРГ.

4.3 Багатокритеріальний метод розпізнавання типу дефектів високовольтного обладнання за результатами аналізу розчинених в маслі газів

Отримані значення відношень газів і відсоткового вмісту газів для обладнання з дефектами різного типу, а також значення координат графічних образів (відношення газів до газу з максимальним вмістом) є координатами об'єктів, що діагностуються та визначають тип

прогнозованого пошкодження. Слід відзначити, що і значення відношень газів, і їх відсотковий вміст задаються у вигляді діапазонів значень. Як приклад в таблиці 5 наведені значення відсоткового вмісту газів в обладнанні, в якому виявлені іскрові, повзучі розряди, а також розряди з низькою та високою щільністю енергії. Значення відношень газів для даного обладнання наведені в таблиці 6. Як видно з таблиці 5, навіть для дефектів одного типу вміст газів може суттєво відрізнятися, що істотно обмежує можливість розпізнавання типу дефекту тільки з використанням цього критерію, як регламентовано в методі ключового газу. Порівнюючи дані з таблиці 6 з регламентованими значеннями відношень газів з табл. 1-3 легко побачити, що для деяких дефектів (наприклад №1, 2, 10, 11, 12) значення відношень газів відповідають одночасно декільком типам дефектів, наприклад частковим розрядам (значення відношень $\text{CH}_4/\text{H}_2 < 0,1$) і розрядам з високою щільністю енергії (значення відношень $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 > 2$ і $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 > 1$), що також ускладнює визначення типу дефекту і, в деяких випадках, може призвести до відмови від розпізнавання, що рівносильно пропуску дефекту.

Таблиця 4.5 – Значення відсоткового вмісту газів в обладнанні, в якому виявлені іскрові, повзучі розряди, а також розряди з низькою і високою щільність енергії

| № | Тип дефекту | Вміст газів, % | | | | |
|----|---------------------------------|----------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | H_2 | CH_4 | C_2H_6 | C_2H_4 | C_2H_2 |
| 1 | Іскрові розряди. $N=5$ | 48-70 | 0,5-6 | 0,3-10 | 25-40 | 0,04-1,5 |
| 2 | Іскрові розряди. $N=6$ | 45-77 | 4-7,5 | 0-2 | 8-34 | 6-18 |
| 3 | Іскрові розряди. $N=48$ | 35-80 | 6-29 | 0-13 | 3-40 | 0-3,3 |
| 4 | Іскрові розряди. $N=65$ | 26-89 | 6-32 | 0,01-15 | 0,5-30 | 0,1-28 |
| 5 | Повзучі розряди $N=41$ | 29-74 | 5-42 | 0-5,5 | 5,5-35 | 2-25 |
| 6 | Розряди низької енергії. $N=17$ | 40-86 | 8-31 | 0,1-23 | 0,01-8 | 0,7-32 |
| 7 | Розряди низької енергії. $N=5$ | 33-48 | 32-45 | 5-22 | 0,3-3 | 0,5-13 |
| 8 | Розряди низької енергії. $N=16$ | 40-65 | 4-17 | 8,5-25 | 1,0-10 | 10-38 |
| 9 | Розряди низької енергії. $N=12$ | 5-37 | 1,2-16 | 10-32 | 2-22 | 25-60 |
| 10 | Розряди низької енергії. $N=7$ | 55-83 | 2,5-6,5 | 1,0-10 | 1,5-11 | 10-30 |
| 11 | Розряди низької енергії. $N=77$ | 44-90 | 1-8 | 0-5 | 0,1-22 | 5,5-44 |
| 12 | Розряди низької енергії.. $N=3$ | 25-45 | 1-4 | 0,2-15 | 4-15 | 35-55 |
| 13 | Розряди низької енергії. $N=31$ | 34-75 | 5-25 | 1-15 | 1,8-15,2 | 5-36 |
| 14 | Розряди низької енергії. $N=10$ | 10-36 | 4-25 | 4-14 | 5-22 | 33-67 |

| | | | | | | |
|----|----------------------------------|-------|--------|------|--------|-------|
| 15 | Розряди високої енергії. $N=139$ | 30-78 | 0,1-29 | 0-14 | 0,1-28 | 10-45 |
| 16 | Розряди високої енергії. $N=114$ | 0-2 | 0-1 | 0-5 | 1-45 | 50-98 |
| 17 | Розряди високої енергії. $N=122$ | 4-44 | 0-23 | 0-11 | 1-36 | 28-88 |

В таблиці N – кількість одиниць МНО, за якими отримані значення відсоткового вмісту газів.

Як показано в [36], навіть при одному й тому ж дефекті, для обладнання одного і того ж типу, отримані номограми можуть суттєво відрізнятися, як один від одного, так і від еталонних номограм. Для врахування дрейфу значень координат номограм, в [37] запропоновано використовувати не еталонні номограми, а еталонні області, які будуються за результатами АРГ обладнання з одним і тим же типом дефекту.

Як значення меж еталонних областей використовуються максимальні та мінімальні значення координат (відношень кожного з газів до газу з максимальною концентрацією), отриманих однорідних масивів результатів АРГ обладнання.

Таблиця 4.6 – Значення відношень газів в обладнанні, в якому виявлені іскрові, повзучі розряди, а також розряди з низькою і високою щільністю енергії.

| № | Значення відношення газів | | | | | |
|----|---------------------------|------------------------------------|---|------------------------------------|---|---|
| | CH_4/H_2 | $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$ | $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ | $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$ | $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_6$ | $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ |
| 1 | 0,02-0,096 | 0,2-10 | 4-16 | 0,003-0,23 | 0,01-0,04 | 0,005-0,05 |
| 2 | 0,02-0,09 | 0,2-0,35 | 4,2-10,3 | 0,25-3,3 | 3,4-9,9 | 0,13-0,96 |
| 3 | 0,12-0,5 | 0,07-1,3 | 1,3-18,6 | 0,002-0,19 | 0,012-0,6 | 0,002-0,099 |
| 4 | 0,1-0,93 | 0,06-1,3 | 1-4,92 | 0,001-4,3 | 0,11-3,73 | 0,1-0,99 |
| 5 | 0,12-0,86 | 0,03-0,35 | 5,2-14,1 | 0,02-3,57 | 0,65-11,5 | 0,1-0,982 |
| 6 | 0,1-0,71 | 0,02-0,87 | 0,12-0,88 | 0,03-1,4 | 0,141-4,14 | 1,05-4,47 |
| 7 | 0,92-0,98 | 0,14-0,63 | 0,06-0,23 | 0,014-0,39 | 0,1-0,63 | 1,1-9,9 |
| 8 | 0,11-0,39 | 0,88-2,22 | 0,11-0,66 | 0,99-5,90 | 0,47-4,13 | 1,8-35,6 |
| 9 | 0,78-0,922 | 2,0-6,14 | 0,49-1,0 | 2,4-11,6 | 1,04-4,65 | 1,33-8,5 |
| 10 | 0,05-0,08 | 0,29-1,47 | 1,0-1,26 | 1,9-2,87 | 1,9-8,2 | 1,8-6,7 |
| 11 | 0,014-0,099 | 0,007-1,03 | 3,4-35,6 | 0,09-30,5 | 5,88-180,6 | 1,361-11,7 |
| 12 | 0,05-0,086 | 0,01-0,08 | 2,75-15,2 | 12,9-44 | 3-161 | 2,8-10,6 |
| 13 | 0,12-0,509 | 0,107-0,68 | 1,0-1,88 | 0,39-4,1 | 2,06-7,29 | 1,1-4,92 |
| 14 | 0,353-0,854 | 0,194-1,45 | 1,0-1,765 | 1,48-4,032 | 2,77-7,64 | 1,78-4,33 |
| 15 | 0,1-0,774 | 0,05-1,25 | 2,8-22 | 0,1-8,2 | 3,1-69,6 | 1,01-12,7 |
| 16 | 0,147-0,66 | 4,8-67,2 | 7,8-104,4 | 103-1020 | 15-167,2 | 1,2-92 |

| | | | | | | |
|----|----------|----------|----------|--------|-----------|-----------|
| 17 | 0,1-0,99 | 0,06-1,4 | 2,0-30,9 | 1,2-32 | 3,4-249,3 | 1,02-18,5 |
|----|----------|----------|----------|--------|-----------|-----------|

Як приклад на рис. 3.1 -3.3 наведені графічні області дефектів, побудовані за результатами АРГ обладнання зі значеннями відсоткового вмісту газів і відношень газів з табл. 4.5 і табл. 4.6. Суцільною лінією на рисунках вказано центр області, який збігається з номограмою дефекту, пунктирними лініями виділені нижня та верхня межа області дефекту. Номер графічної області збігається з порядковим номером дефекту з табл. 5-6. Порівнюючи графічні області, наведені на рис. 3.1-3.3, зі значеннями відношень газів і їх відсотковим вмістом з табл. 5 і 6 легко побачити, що для дефектів зі схожими графічними областями (№1-5 на рис. 4.1) і значення відношень газів і їх відсотковий вміст можуть суттєво відрізнятися.

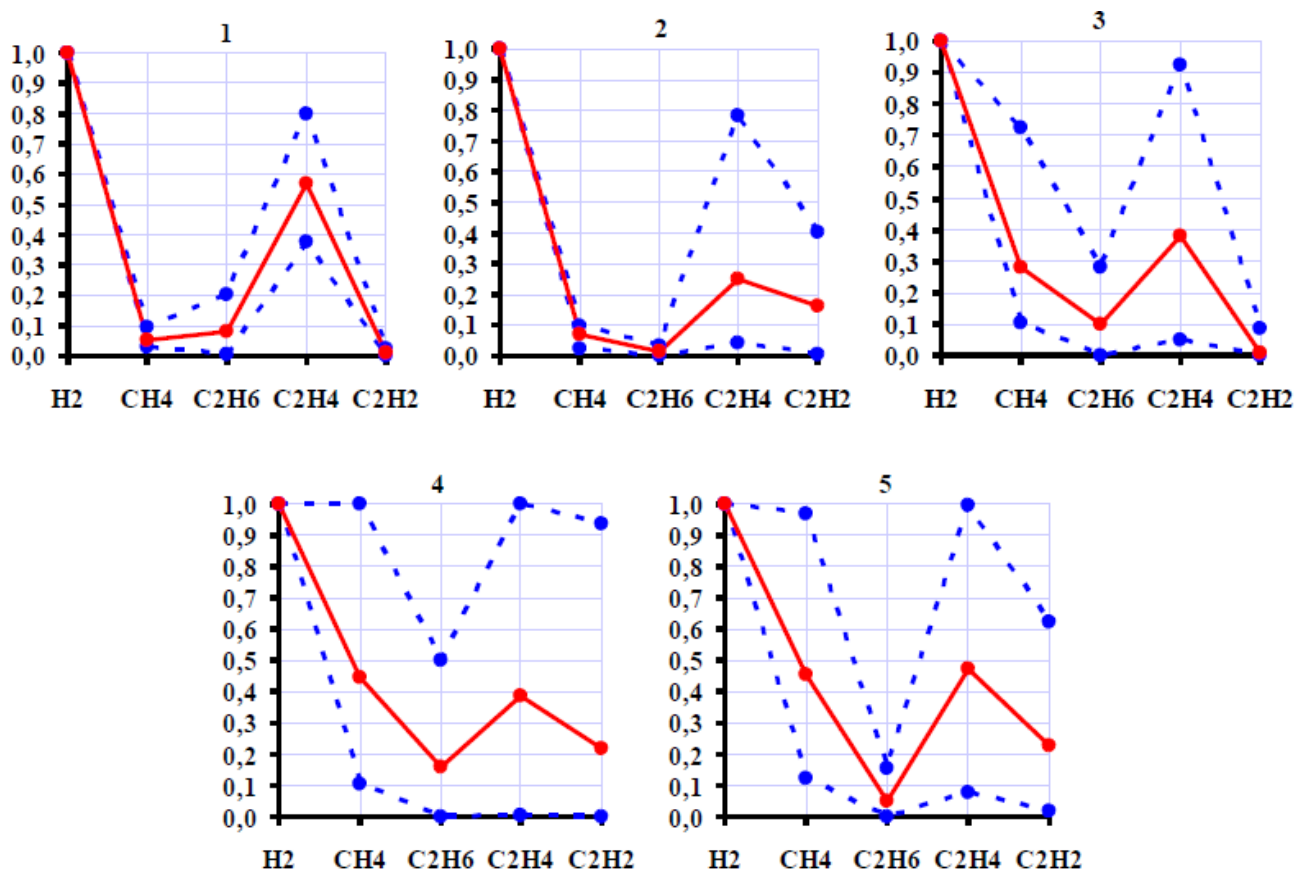


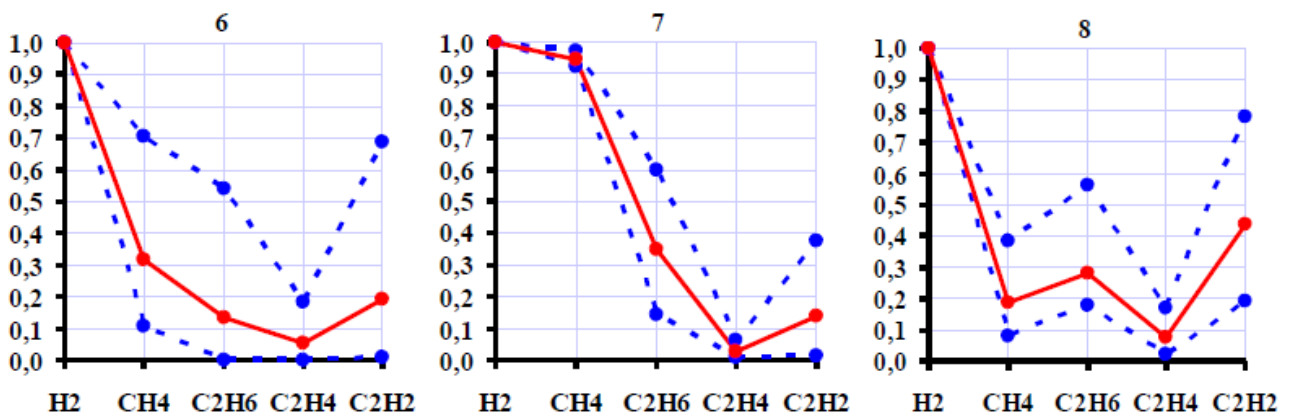
Рисунок 3.1 – Графічні області, побудовані за результатами АРГ обладнання в якому виявлені іскрові та повзучі розряди

Для розпізнавання типу дефекту з використанням графічних областей в

[37] запропоновано використовувати метод діагностики по відстані до множини (діагностика по прецеденту). В цьому методу оцінюється діагностична відстань від номограми дефекту, побудованої за результатами АРГ діагностованого обладнання до всіх номограм, що утворюють область з даним діагнозом:

$$l_i^S = \sqrt[\nu]{\left|H_{2i}^* - H_2\right|^\nu + \left|CH_{4i}^* - CH_4\right|^\nu + \left|C_2H_{6i}^* - C_2H_6\right|^\nu + \left|C_2H_{4i}^* - C_2H_4\right|^\nu + \left|C_2H_{2i}^* - C_2H_2\right|^\nu}$$

де H_{2i}^* , CH_{4i}^* , $C_2H_{6i}^*$, $C_2H_{4i}^*$, $C_2H_{2i}^*$ – значення координат i -тої номограми, яка входить в графічну область з S -тим діагнозом; H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 – значення координат номограми, розраховані по значенню концентрацій газів діагностованого обладнання; ν – міра відстані ($\nu=2$).



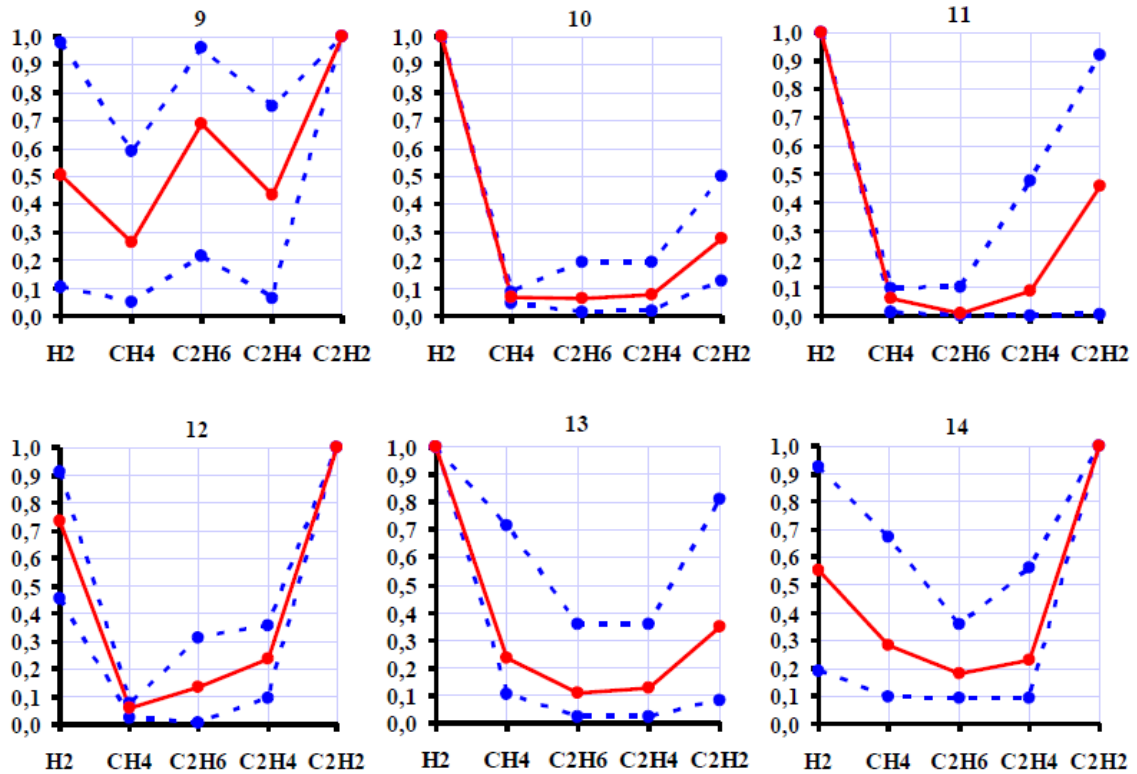


Рисунок 3.2 – Графічні області, побудовані за результатами АРГ обладнання в якому виявлені розряди з низькою щільністю енергії

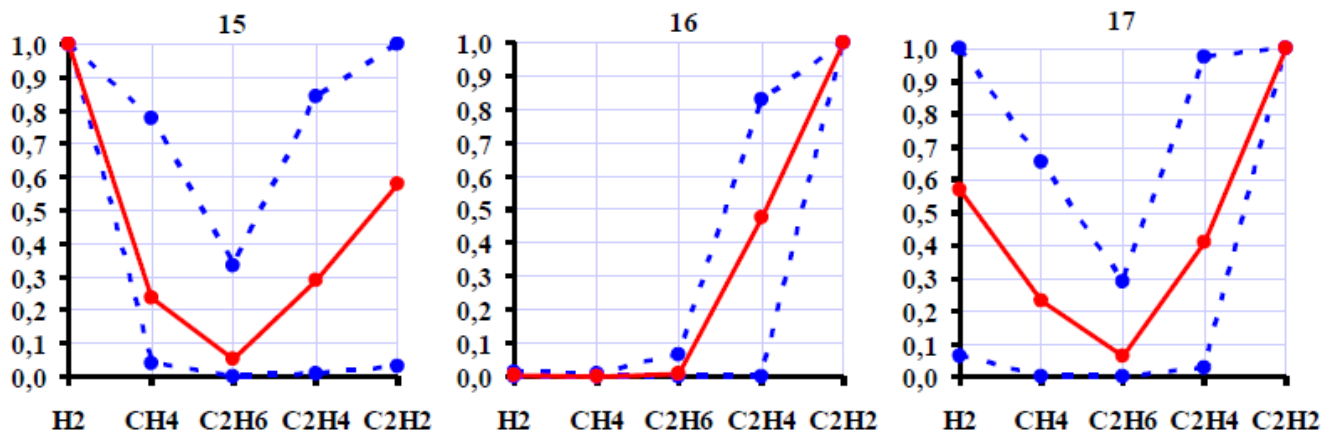


Рисунок 3.3 – Графічні області, побудовані за результатами АРГ обладнання в якому виявлені розряди з високою щільністю енергії

Отримані значення діагностичних відстаней порівнюються між собою і «запам'ятовується» мінімальна відстань. Діагностований об'єкт відноситься до області з мінімальним значенням діагностичної відстані:

$$\mathbf{x} \in S_i, \text{ если } l_i = \min \left(\min_{a_k^s \in S_k} \right)$$

Такий підхід дозволяє не тільки безпомилково відносити номограму діагностованого об'єкта до характерної області, навіть в умовах перетину меж областей, але і знаходити всередині області ідентичний об'єкт з найбільше близькими значеннями координат, що дозволяє оцінити не тільки тип дефекту, але і можливу причину його появи.

4.4 Оцінка достовірності розпізнавання типу дефекту з використанням запропонованого методу

Для оцінки достовірності розпізнавання типу дефекту з використанням запропонованого методу, були використані результати АРГ обладнання, що не використовувались при формуванні навчальної вибірки. Для максимального ускладнення задачі аналізувались результати АРГ, отримані для обладнання, яке було пошкоджено в результаті пропуску дефектів. Більш того аналізувались дані, отримані за результатами АРГ, перед пошкодженням обладнання. Значення концентрацій газів для даного обладнання наведені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Значення концентрацій газів в обладнанні, що пошкоджено дефектами, що розвиваються

| № | Період відбору проб | Концентрації газів, % об. | | | | |
|----|---|---------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | H ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₂ |
| 1 | Трансформатор 250 кВ, гідростанція "Nelson River" Північна Канада, тепловий пробій ізоляції | | | | | |
| | за 10 місяців до пробою | 0,002 | 0,0015 | 0,0052 | 0,0009 | Відсут. |
| | після пробою | 0,162 | 0,414 | 0,6056 | 0,0291 | 0,0968 |
| 2 | Трансформатор 125 кВ, гідростанція "Nelson River" Північна Канада, пробій ізоляції між котушками | | | | | |
| | за 5 днів до пробою | 0,0032 | 0,0042 | 0,0098 | 0,0024 | 0,0001 |
| | після пробою | 0,788 | 0,755 | 0,473 | 0,03 | 0,297 |
| 3 | Реактор РОДЦ 750/110, внутрішнє коротке замикання | | | | | |
| | За 6 місяців до пошкодження | Відсут. | Відсут. | Відсут. | Відсут. | Відсут. |
| | після аварійного відключення | 0,223 | 0,077 | 0 | 0,108 | 0,13 |
| 4 | Автотрансформатор АДЦТН-125000/220/110, дуговий розряд | | | | | |
| | За два місяці до пошкодження | Відсут. | Відсут. | Відсут. | 0,016 | 0,025 |
| | Після пошкодження | 0,094 | 0,073 | 0,025 | 0,228 | 0,247 |
| 5 | Блоковий трансформатор 320 МВА 220/15,75 стійкий розвинений частковий розряд (амплітудою до 70 тис. пКл) з перекриттям по поверхні твердої ізоляції) і з переходом в пробій | | | | | |
| | За 4 місяці до пошкодження | 0,0045 | 0,003 | 0,0013 | 0,003 | 0,0018 |
| | Після пошкодження | 0,0009 | 0,0062 | 0,0011 | 0,0036 | 0,00267 |
| 6 | Трансформатор ТМН-4000/35, пошкоджений дуговим розрядом | | | | | |
| | за 15 днів до пошкодження | 0,00028 | 0,00417 | 0,00041 | 0,01087 | 0,07652 |
| | Після пошкодження | 0,18855 | 0,01951 | 0,00072 | 0,02247 | 0,24981 |
| 7 | Трансформатор 20 МВА 33/0,6 кВ, пошкоджений дуговим розрядом | | | | | |
| | За 3 місяці до пошкодження | 0,0129 | 0,019 | 0,0362 | 0,0142 | 0,0001 |
| | Після пошкодження | 0,0091 | 0,0033 | 0,0024 | 0,0092 | 0,0134 |
| 8 | Трансформатор ТДТНГ-31500/110, пошкоджений дуговим розрядом | | | | | |
| | За 4 місяці до пошкодження | 0,00239 | 0,00084 | 0,00028 | 0,0013 | Відсут. |
| | Після пошкодження | 0,01726 | 0,00524 | 0,00056 | 0,00543 | 0,0091 |
| 9 | Трансформатор ТДТН-110/35/10, пошкоджений дуговим розрядом | | | | | |
| | За 24 дні до пошкодження | 0,000304 | 0,000395 | 0,000054 | 0,00167 | 0,00391 |
| | Після пошкодження | 0,000546 | 0,000501 | 0,000056 | 0,00193 | 0,00498 |
| 10 | Трансформатор 35 кВ, пошкоджений повзучим розрядом | | | | | |
| | За 3 місяці до пошкодження | 0,00005 | 0,00016 | 0,00048 | 0,00184 | 0,00004 |
| | Після пошкодження | 0,006 | 0,00282 | 0,00065 | 0,00596 | 0,00171 |

Аналізуючи результати наведені в таблиці 7 легко побачити, що в пробах масла, отриманих перед пошкодженням МНО, значення концентрацій газів не завжди перевищували граничні значення, що в більшості випадків і було причиною пропуску дефектів.

Слід відзначити, що для всього обладнання, що аналізуються, пошкодження носили вкрай важкий характер. Як приклад на рис. 4.1 показані результати розкриття трансформатора ТМН-4000/35, пошкодженого дуговим розрядом.



Рисунок 4.1 – Результати розкриття трансформатора ТМН-4000 35 кВ, пошкодженого дуговим розрядом

Значення відношень газів, розраховані по значенню концентрацій пошкодженого МНО, які отримані до і після пошкодження наведені в таблиці 4.8. Значення відсоткового вмісту газів в даному обладнанні наведені в таблиці

4.9, а результати діагностування обладнання з використанням графічних областей відображені на рис 4.2. На рисунку графічні області пронумеровані наскрізною нумерацією, що збігається з номером обладнання з таблиці 7. Цифра 1 у верхньому індексі відповідає графічним образам, побудованим за результатами АРГ, отриманими перед пошкодженням МНО, а цифра 2 відповідає графічним образам, побудованим за результатами АРГ, отриманими безпосередньо після пошкодження. Суцільною лінією на рисунках позначено графічний образ дефекту, побудованого за результатами АРГ діагностованого обладнання, пунктирними лініями позначені верхня та нижня межі графічних областей, яким належить побудований образ.

Таблиця 4.8 – Значення відношень газів в обладнанні, пошкодженому дефектами, що розвиваються

| № | Значення відношень газів | | | | | |
|----|--------------------------|------------------------------------|---|------------------------------------|---|---|
| | CH_4/H_2 | $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$ | $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ | $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$ | $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_6$ | $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ |
| 1 | 0,750 | 3,467 | 0,173 | - | - | - |
| | 2,556 | 1,463 | 0,048 | 0,234 | 0,160 | 3,326 |
| 2 | 1,313 | 2,333 | 0,245 | 0,024 | 0,010 | 0,042 |
| | 0,958 | 0,626 | 0,063 | 0,393 | 0,628 | 9,900 |
| 3 | - | - | - | - | - | - |
| | 0,345 | - | - | 1,688 | - | 1,204 |
| 4 | - | - | - | - | - | 1,563 |
| | 0,777 | 0,342 | 9,120 | 3,384 | 9,880 | 1,083 |
| 5 | 0,667 | 0,433 | 2,308 | 0,600 | 1,385 | 0,600 |
| | 6,889 | 0,177 | 3,273 | 0,431 | 2,427 | 0,742 |
| 6 | 14,893 | 0,098 | 26,512 | 18,350 | 186,634 | 7,040 |
| | 0,103 | 0,037 | 31,208 | 12,804 | 346,958 | 11,117 |
| 7 | 1,473 | 1,905 | 0,392 | 0,005 | 0,003 | 0,007 |
| | 0,363 | 0,727 | 3,833 | 4,061 | 5,583 | 1,457 |
| 8 | 0,351 | 0,333 | 4,643 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | 0,304 | 0,107 | 9,696 | 1,737 | 16,250 | 1,676 |
| 9 | 1,299 | 0,137 | 30,926 | 9,899 | 72,407 | 2,341 |
| | 0,918 | 0,112 | 34,464 | 9,940 | 88,929 | 2,580 |
| 10 | 3,200 | 3,000 | 3,833 | 0,250 | 0,083 | 0,022 |
| | 0,470 | 0,230 | 9,169 | 0,606 | 2,631 | 0,287 |

Як видно з табл. 4.8 значення відношень газів, розраховані за результатами АРГ трансформатора 250 кВ гідроелектростанції "Nelson River" (№1 в табл. 4.7), що отримані за 10 місяців до пробою, відповідають як наявності розрядів ($CH_4/H_2 < 1$), так і наявності перегрівів в діапазоні температур 150-300°C ($C_2H_4/C_2H_6 < 1$, $C_2H_6/CH_4 > 1$). В чинних стандартах дефекти з такими значеннями відношень газів не регламентовані. Газом з максимальним вмістом є етан (див. табл. 9), а іншим газом – водень, що підтверджує комбінований характер дефекту. В чинних стандартах не регламентовані графічні образи, побудовані за результатами АРГ даного трансформатора.

Таблиця 4.9 – Значення відсоткового вмісту газів в обладнанні, пошкодженому дефектами, що розвиваються

| № | Вміст газів, % | | | | |
|----|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | H ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₂ |
| 1 | 20,833 | 15,625 | 54,167 | 9,375 | 0,000 |
| | 12,390 | 31,663 | 46,317 | 2,226 | 7,403 |
| 2 | 16,244 | 21,320 | 49,746 | 12,183 | 0,508 |
| | 33,632 | 32,224 | 20,188 | 1,280 | 12,676 |
| 3 | - | - | - | - | - |
| | 41,450 | 14,312 | 0,000 | 20,074 | 24,164 |
| 4 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 39,024 | 60,976 |
| | 14,093 | 10,945 | 3,748 | 34,183 | 37,031 |
| 5 | 33,088 | 22,059 | 9,559 | 22,059 | 13,235 |
| | 6,220 | 42,847 | 7,602 | 24,879 | 18,452 |
| 6 | 0,304 | 4,520 | 0,444 | 11,783 | 82,949 |
| | 39,195 | 4,056 | 0,150 | 4,671 | 51,929 |
| 7 | 15,655 | 23,058 | 43,932 | 17,233 | 0,121 |
| | 24,332 | 8,824 | 6,417 | 24,599 | 35,829 |
| 8 | 49,688 | 17,464 | 5,821 | 27,027 | 0,000 |
| | 45,916 | 13,940 | 1,490 | 14,445 | 24,209 |
| 9 | 4,800 | 6,237 | 0,853 | 26,370 | 61,740 |
| | 6,814 | 6,252 | 0,699 | 24,086 | 62,149 |
| 10 | 1,946 | 6,226 | 18,677 | 71,595 | 1,556 |
| | 35,006 | 16,453 | 3,792 | 34,772 | 9,977 |

Значення відношень газів, розраховані за результатами АРГ трансформатора 125 кВ гідроелектростанції "Nelson River" (№2 в табл. 4.7), що отримані за 5 днів до пробою, відповідають перегріву з температурою 150-

300°C. Про це також свідчать значення відсоткового вмісту газів з табл. 9. Графічні образи, побудовані за результатами АРГ даного трансформатора, не регламентовані чинними стандартами.

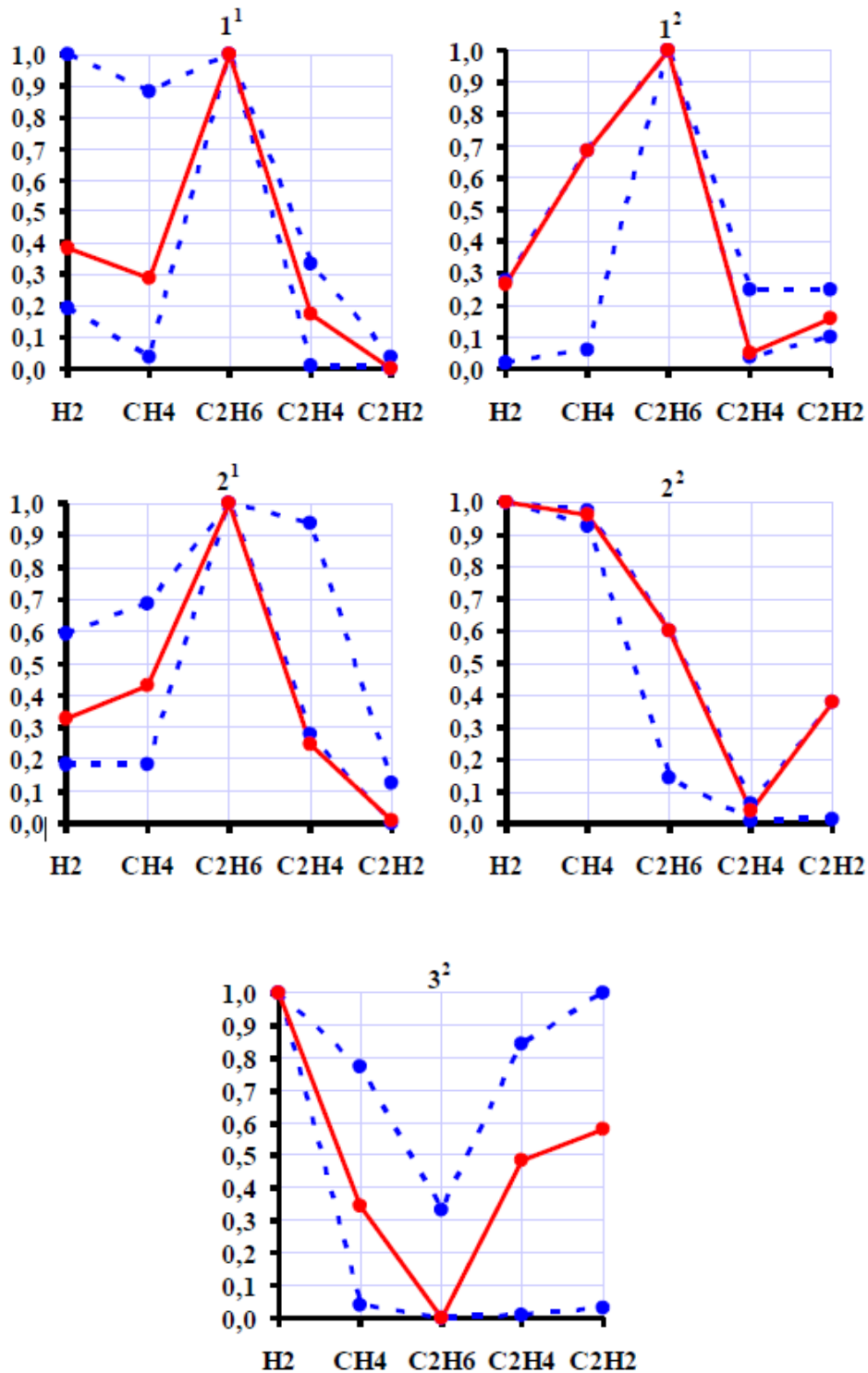
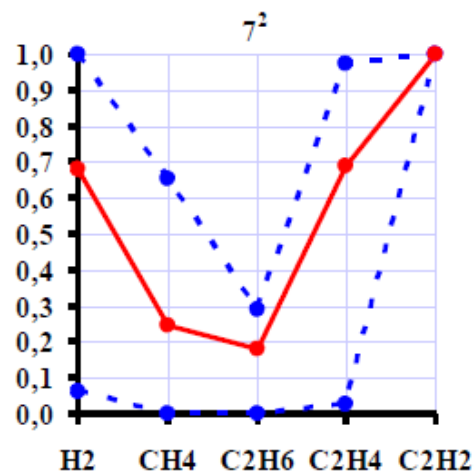
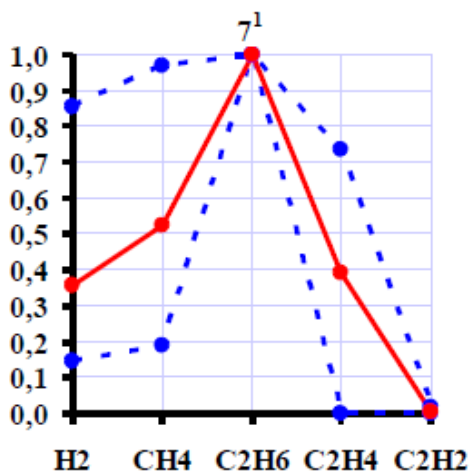
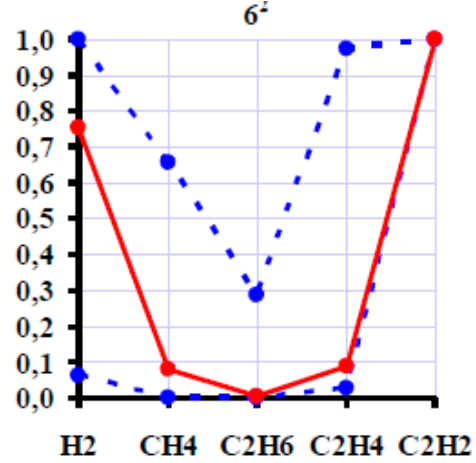
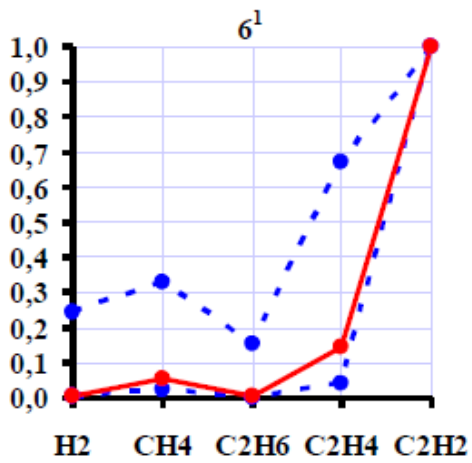
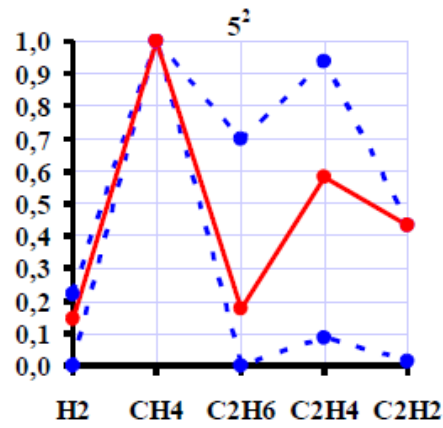
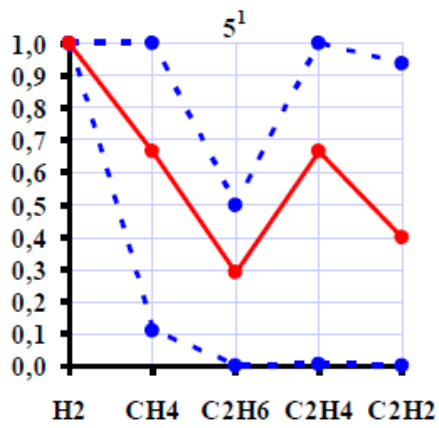
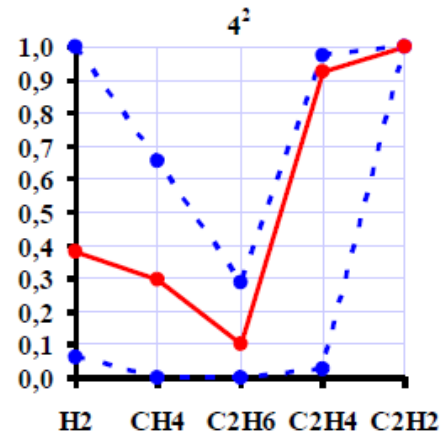
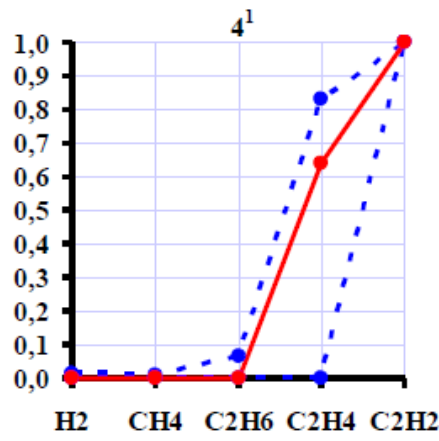
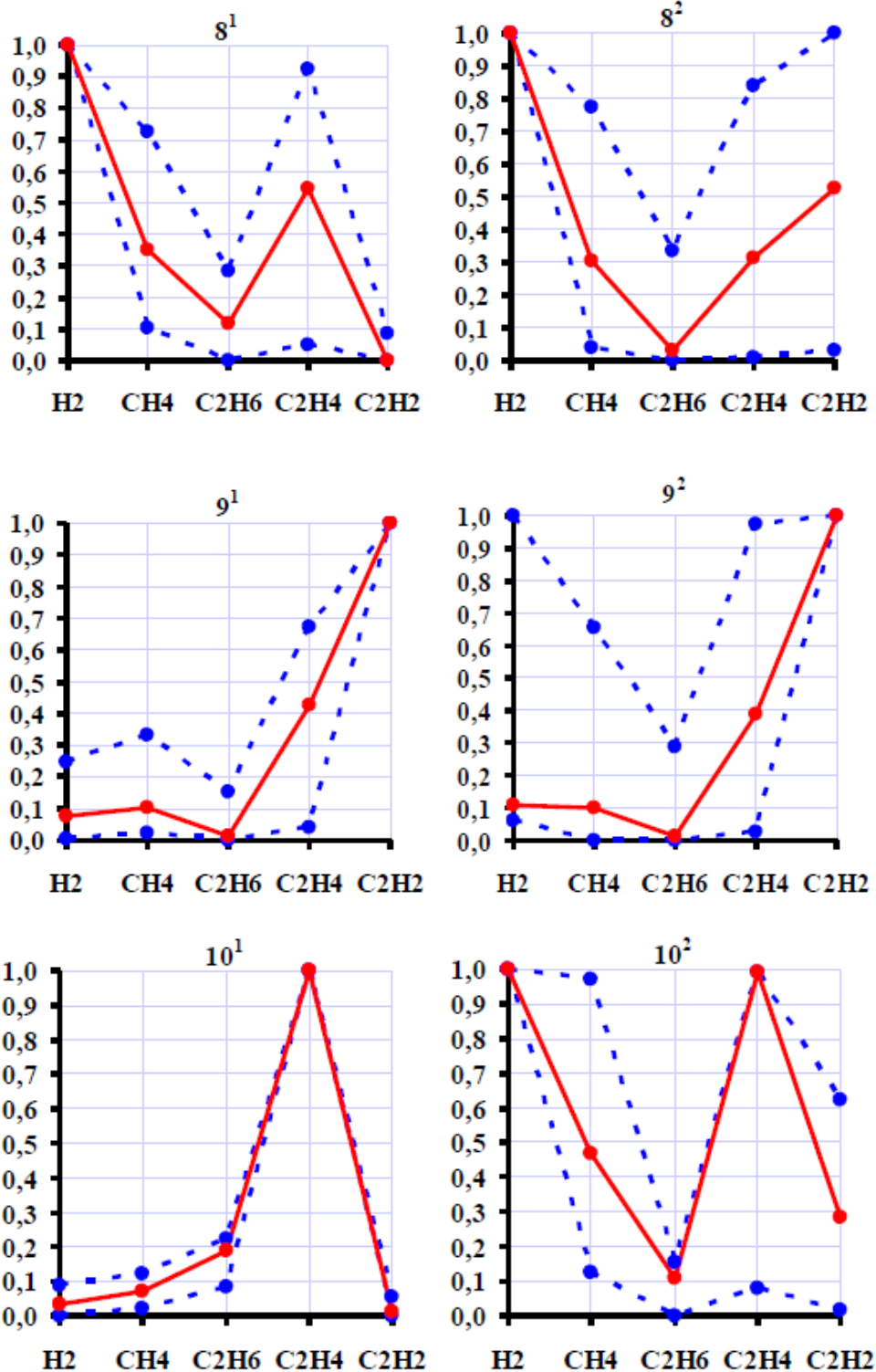


Рисунок 4.2 – Результати діагностики обладнання пошкодженого дефектами, що розвиваються, з використанням графічних областей



Продовження рисунку 4.2



Закінчення рисунку 4.2

В шунтувальному реакторі РОДЦ 750/110 за півроку до пошкодження концентрації газів вуглеводневого ряду та водню не перевищували границі виявлення газів хроматографом, що не дозволило розрахувати відношення газів, їх відсотковий вміст, а також побудувати графічний образ. Значення

відношень газів, їх відсотковий вміст і графічний образ, отримані за результатами АРГ реактора, після його пошкодження відповідають розрядам з високою щільністю енергії.

В автотрансформаторі АТДЦТН-125000/220/110 (табл. 4.7, №4) і значення відношень газів, і їх відсотковий вміст як до так і після пошкодження відповідають розрядам з високою щільністю енергії. Графічний образ, побудований за результатами АРГ автотрансформатора, отриманих перед пошкодженням, не регламентований в жодному з чинних стандартів. При цьому, як видно з табл. 4.9, в пробах масла даного автотрансформатора перед пошкодженням був присутній тільки ацетилен и етилен. Образ, побудований за результатами АРГ, отриманими після пошкодження, відповідає дуговому розряду.

Значення відношень газів, а також значення відсоткового вмісту, розраховані за результатами АРГ блокового трансформатора 320 МВА (табл. 4.7,

№5) як до, так і після пошкодження відповідають іскровим розрядам. При цьому, побудований за результатами АРГ, отриманими після пошкодження, графічний образ не регламентований чинними стандартами.

Розраховані за результатами АРГ значення відношень газів трансформатора ТМН 4000 кВА, 35 кВ (№6 в табл. 4.7) до його пошкодження, відповідають не тільки наявності розрядів з високою щільністю енергії ($C_2H_2/C_2H_4 > 1$, $C_2H_4/C_2H_6 > 1$), але і перегрівам ($CH_4/H_2 > 1$). В чинних стандартах дефекти з такими значеннями відношень газів не регламентовані. Водночас графічний образ, аналогічний побудованому за результатами АРГ даного трансформатора, наведений в [3]. А за результатами АРГ, отриманими після пошкодження, побудований образ відповідає дуговому розряду.

Згідно зі значеннями відношень газів в трансформаторі 20 МВА 33/0,6 кВ (№7 в табл. 4.7), перед пошкодженням відбувся перегрів з температурою 150- 300°C, об це також свідчать значення відсоткового вмісту газів з табл.

4.9. Графічний образ, побудований за результатами АРГ даного трансформатора до пошкодження, не регламентований чинними стандартами, а образ, побудований за результатами АРГ, отриманими після пошкодження, відповідає дуговому розряду.

В трансформаторі ТДТНГ-31,5/110, (№8 в табл. 4.7), перед пошкодженням, скоріше за все, мали місце іскрові розряди, про що свідчать як значення відношень газів, так і їх відсотковий вміст, а також побудований графічний образ.

За 24 дні до пошкодження трансформатора ТДТН-110/35/10, (№8 в табл. 4.7) значення відношень газів і їх відсотковий вміст, а також графічні образи відповідали розрядам високої енергії та перегрівам, по аналогії з трансформатором ТМН-4000/35 (№6 в табл. 4.7).

За 3 місяці до пошкодження трансформатора 35 кВ (№10. в табл. 4.7) значення відношень газів і їх відсотковий вміст відповідали перегрівам в діапазоні температур 500-700°C і розрядам. Однак в чинних стандартах дефекти з подібною комбінацією газів не регламентовані. Графічний образ, побудований за результатами АРГ цього трансформатора, отриманими до пошкодження, має схожість з образом, регламентованим в [3] для нагрівів з температурою вище 700°C, і з образом, характерним для перегрівів з температурою вище 700°C, які супроводжуються розрядами, згідно з [4].

Наведені приклади показують, що характер дефекту може змінюватися в процесі розвитку. При цьому використання окремих критеріїв не завжди дозволяє вчасно виявити та розпізнати дефекти, що розвиваються. Для порівняння в таблиці 10 наведені результати діагностики для обладнання, що аналізується, отримані з використанням розробленого методу. Як видно з таблиці 10, в 9 випадках з 10, дефекти в МНО були вірно виявлені та розпізнані ще до моменту пошкодження обладнання. Тільки в одному випадку (реактор РОДЦ 750/110), встановити діагноз не вдалося через відсутність розчинених в маслі газів. За результатами АРГ, отриманими після пошкодження обладнання, запропонований метод поставив правильний

діагноз в 10 випадках з 10.

Таблиця 4.10 – Результати діагностики обладнання, пошкодженого дефектами, що розвиваються, за допомогою запропонованого методу

| № | Тип дефекту |
|----|--|
| 1 | Перегрів в діапазоні температур 150-300°C, що супроводжується розрядами |
| | Перегрів в діапазоні температур 150-300°C, що супроводжується розрядами високої енергії. |
| 2 | Перегрів в діапазоні температур 150-300°C |
| | Розряди з низькою щільністю енергії, що переходять у пробій |
| 3 | Відмова від розпізнавання |
| | Розряди високої щільності енергії |
| 4 | Розряди високої щільності енергії |
| | Розряди високої щільності енергії |
| 5 | Іскровий розряд |
| | Іскровий розряд високої інтенсивності |
| 6 | Розряди високої щільності енергії та нагрівання |
| | Розряди високої щільності енергії |
| 7 | Перегрів в діапазоні температур 150-300°C |
| | Розряди високої щільності енергії |
| 8 | Іскровий розряд |
| | Розряди високої щільності енергії |
| 9 | Розряди високої щільності енергії та нагрівання |
| | Розряди високої щільності енергії та нагрівання |
| 10 | Перегрів з температурою 500-700°C, що супроводжується розрядами |
| | Повзучий розряд |

Наведені приклади показують, що практичне використання розробленого методу дозволило б запобігти 9 пошкодженням високовольтного МНО із 10.

4.5 Вимірювач характеристик часткових розрядів ІЧР 201

До роботи і обслуговування приладу допускаються особи, що мають кваліфікаційну групу по техніці безпеки не нижче III при роботі з електроустановками на напругу вище 1000 В.

Прилад призначений для використання при випробуваннях електричної міцності ізоляції електроустаткування стандартною випробувальною змінною

напругою промислової частоти (ГОСТ 1516.2 і МЕК 60060-1) в умовах спеціальних обладнаних випробувальних стендів і лабораторій.

Прилад дозволяє вимірювати миттєві значення випробувальної напруги і відповідні ним значення характеристик ч. р.: заряд імпульсів ч. р., що здається; їх полярність і фазу; частоту проходження, середній струм, енергію і середньоквадратичний параметр імпульсів ч. р. При вимірюваннях забезпечується шумова, порогова і позиційна фільтрації цифрового сигналу ч. р. і візуальне відображення осцилограм на екрані комп'ютера.

Прилад забезпечує можливість вимірювання характеристик ЧР відповідно до вимог ГОСТ 20074 або МЕК 60270 (два режими вимірювань) з реєстрацією і представленням результатів вимірювань в цифровій і графічній формах.

У комплект приладу входять: власне прилад-вимірювач часткових розрядів (ГЧР 201), вимірювальний елемент з розділовим трансформатором, два фільтри високих частот (ФВЧ), градуювальний генератор (калібратор) часткових розрядів (ГГЧР), з'єднувальні кабелі, мобільний персональний комп'ютер (ноутбук) і робоча програма управління приладом, обробки і реєстрації вимірювальної інформації «PDscan» (на CD-диску).

Склад і комплектація приладу приведені в таблиці 4.11

Таблиця 4.11

| Найменування | Позначення (тип) | Кільк. | Примітки |
|--------------------------------------|---------------------|--------|---------------------|
| Прилад-вимірювач ч. р. | ГЧР 201 | 1 | ТС.411733.002 РЕ |
| Вимірювальний елемент | ІЕ | 1 | ТС 110.121 |
| Фільтр високих частот | ФВЧ | 2 | ТС 110.117 |
| Градуювальний генератор часткових | ГГЧР-201 | 1 | БШИП.411733. |

| | | | |
|---|-----------------|---|--------------------|
| розрядів. | | | 002 PE |
| Переносний комп'ютер («ноутбук») | IBM PC | 1 | (див. п.п. 1.4) |
| Кабелі: | | | - |
| - мережений | № 1 | 1 | 1,5 м |
| - високочастотні | № 2 № 3 | 2 | RG - 58,6 м |
| - управління | №4 | 1 | 20м |
| - зв'язок з комп'ютером | №5 | 1 | USB |
| - управління калібратором | №6 | 1 | 5 м |
| Програма управління приладом і обробки інформації | "PDscan", v.2.0 | 1 | CD-диск |
| Керівництво по експлуатації | - | 1 | БШИП.411733.002 PE |
| Формуляр | - | 1 | БШИП.411733.002ФО |

Основні технічні параметри і характеристики приладу приведені в таблиці 4.12

Таблиця 4.12

| Параметри і характеристики | Значення |
|---|----------|
| Частота випробувальної напруги, Гц | 40-400 |
| Чутливість (при подачі сигналу безпосередньо на вхід приладу) не гірша, пКл | 0,1 |
| Мінімальний вимірюваний заряд ЧР, що здається, пКл, не більш | 1 |

| | |
|--|-------------------------------|
| Максимальний вимірюваний заряд ЧР, що здається, не менше, Кл | 2000 |
| Погрішність вимірювання зарядів ЧР в діапазоні 1-10 пКл, пКл, не більш | ± 1 |
| Погрішність вимірювання зарядів ЧР в діапазоні 11-2000 пКл %, не більш | ± 10 |
| Полярність вимірюваних імпульсів ЧР | "+"; "-"; "+/-" |
| Найбільша частота проходження вимірюваних імпульсів ЧР, кГц, не менше | 100 |
| Межі смуги пропускання, кГц | 50-450 |
| Час дозволу імпульсів, мкс, не більш | 5 |
| Розрядність оцифрування сигналу, битий | 14 |
| Характеристики входу випробувальної напруги: | |
| - вхідний опір, МОм, не менше | 1 |
| - вхідна місткість, пФ, не більш | 50 |
| - максимальна напруга частоти 40-400 Гц, В, не більша ніж | 100 |
| Напруга живлення (-50/60 Гц), В | 220 \pm 1 0% |
| Споживана потужність, В·А, не більша ніж | 150 |
| Габарити приладу, мм | 110 \times 170 \times 250 |
| Маса, кг | 2,6 |

Прилад призначений для живлення від однофазної мережі змінного струму напругою 220 В типу TN (трипровідна, із захисним провідником - провід РЕ).

Прилад забезпечує нормовані параметри і метрологічні характеристики після прогріву протягом часу не більш, ніж 5 хв. Час безперервної роботи - не обмежено.

По ступеню захисту від поразки електричним струмом прилад відноситься до електричного устаткування класу I по ГОСТ Р 51350.

Електрична ізоляція ланцюга мережевих висновків приладу витримує протягом 1 хвилини випробувальну напругу 1500 В частотою 50 Гц в нормальних (ГОСТ 1516.2) умовах випробувань. Опір ізоляції вказаного ланцюга щодо корпусу в нормальних кліматичних умовах експлуатації складає не меншого 20 МОм.

Нормальні умови експлуатації:

- температура навколишнього повітря - плюс (20 ± 5) °С;
- відносна вологість (65 ± 15) %;
- атмосферний тиск від 630 до 795 мм рт.ст.;
- напруга живлячої мережі $(220 \pm 4,4)$ В частотою $(50 \pm 0,5)$ Гц.

Робочі умови експлуатації приладу відповідають групі 3 по ГОСТ 22261:

- температура навколишнього повітря - від плюс 5 до плюс 40 °С;
- відносна вологість - до 90 % при температурі плюс 25 °С;
- атмосферний тиск від 630 до 800 мм рт.ст.;
- напруга живлячої мережі (220 ± 22) В частотою (50 ± 1) Гц.

Прилад має наступні параметри надійності:

- ресурс - 5000 ч;
- термін служби - 7 років.

Технічні характеристики генератора градуювальних імпульсів ЧР (ГГЧР), що входить в комплект приладу, представлені в таблиці 4.13

Таблиця 4.13

| Параметри і характеристики | Значення |
|----------------------------|----------|
|----------------------------|----------|

| | |
|---|--|
| Діапазон зміни градууювальних зарядів, пКл | 1-2000 |
| Діапазон зміни амплітуд імпульсів, В | 0,1 -20 |
| Діапазон зміни тривалості імпульсів, мкс | 0,1-6000 |
| Тривалість фронтів (переднього і заднього) імпульсів, не, не більш | 20 |
| Максимальна частота проходження імпульсів, кГц | 200 |
| Мінімальна тривалість затримки другого імпульсу щодо першого в режимі генерації здвоєних імпульсів, мкс | 0,1 |
| Діапазон частот синусоїдальної напруги синхронізації 120В (не більше ніж), Гц | 40 - 4000 |
| Діапазон частот синхронізації TTL, кГц, не більш | 100 |
| Номінальне навантаження, Ом | 1000 |
| Режими управління роботою генератора | ручною/авто матичний (програмований) |
| Живлення | Від приладу ГЧР 201/ батарейне |
| Напруга батарейного (акумуляторного) живлення, В | 7,2 |
| Характеристики акумуляторів: | |
| -тіп | NI-MH, Ni-cd |
| - тип корпусу | AA (R6) |
| - номінальна напруга, В | 1,2 |
| - місткість, мАч | 1600 |
| - кількість, шт. | 6 |
| Час роботи від акумуляторів, ч, не менше | 2 |

| | |
|-------------------------|------------|
| Габарити генератора, мм | 20X125X245 |
| Маса, кг | 0,6 |

Прилад є настільний пристрій, що підключається до шини USB 2.0 керівника приладом персонального комп'ютера.

Прилад укомплектований переносним персональним комп'ютером («ноутбук») типа IBM PC.

Основні параметри комп'ютера, що забезпечують роботу приладу:

- Процесор Celeron 1.7 ГГц;
- Оперативна пам'ять 256 Мб;
- USB 2.0;
- Дозвіл екрану 1280x800;
- Відеосистема 1915,1945 - не гірше;
- Відеопам'ять 128 Мб;
- CD дисковод (DVD);
- Операційна система Windows XP.

Інтерфейс випробувача при роботі з приладом забезпечується спеціальною програмою управління вимірюваннями, обробки і реєстрації вимірювальної інформації "PDscan", що працює в операційній системі Windows XP.

Зовнішній вигляд комплекту приладу ГЧР 201 приведений на рис. 4.13.

- Прилад ГЧР 201
- Вимірювальний елемент
- Фільтр високих частот (ФВЧ)
- Калібратор ГГЧР 201
- Комп'ютер "ноутбук"

Зовнішній вигляд лицьової і задньої панелей приладу ГЧР 201 приведений на рис. 4.11.

На задній панелі приладу розміщені: роз'єм XI, "Управління", - для підключення вимірювального елемента (кабель управління), роз'єм X2, "ПЗВ", - для підключення комп'ютера і коаксіальний роз'єм X3, "Випр. напруга", - для підключення контрольного кабелю з дільника напруги високовольтної випробувальної установки. Роз'єм для підключення шнура живлення 220 В 50 Гц розташований з правого боку задньої панелі приладу.

На передній панелі приладу розміщений вимикач живлення «Мережа».

Управління приладом оператор здійснює з клавіатури комп'ютера або маніпулятором типу "миша".

Вимірювальний елемент Що входить в комплект приладу і виконаний у вигляді окремого пристрою (блоку) виносний вимірювальний елемент (ІЕ) служить для прийому тих, що підлягають вимірюванню сигналів ЧР, що поступають з блоку (блоків) фільтру високих частот (ФВЧ), їх попередньої обробки і передачі в прилад ІЧР-201 для подальшої обробки, вимірювання і реєстрації.

ІЕ включає розділовий трансформатор, вхідний підсилювач, електронні інтегратори і вимірювальний міст. Вимірювальний вхід ІЕ - диференціальний, симетричний, ізолюваний від корпусу. З'єднання з корпусом здійснюється двома наборами резисторів, утворюючими плечі моста. Діапазон регулювань плечей моста забезпечує максимальні співвідношення місткостей об'єкту випробування і сполучного конденсатора від 0,1 до 10.

Лицьова і задня панелі ІЕ показана на рисунку 4.11:

А, В - роз'єми для підключення вимірювальних кабелів

X3 - роз'єм для підключення зовнішнього осцилографа

X2 - роз'єм для підключення до ГГЧР

XI - роз'єм для підключення до каналів управління ІЧР

На лицьовій панелі ІЕ розміщена також клемма для заземлення корпусу блоку.

Генератор градуювальних імпульсів ЧР

Цифровий генератор типа ГГЧР-201 призначений для градуювання приладів і систем вимірювання характеристик ЧР відповідно до вимог вітчизняного (ГОСТ 20074) і міжнародного (МЕК 60270) стандартів.

Конструктивно генератор виконаний у вигляді окремого переносного приладу з ручними органами управління на лицьовій панелі, має батарейне (або від ГЧР-201) живлення і може експлуатуватися автономно. Вид лицьової панелі ГГЧР приведений на рисунку 6.11.

Сигнальний світлодіод "Н11" (червоний) - спалахує під час вступу до ГГЧР імпульсів синхронізації від зовнішнього генератора. Тривалість післясвічення цього діода складає 0,5 с.

Сигнальний світлодіод "Н12" (зелений) - спалахує при обміні даними ГГЧР з ГЧР 201, а також відображає рівень заряду батарей в автономному режимі роботи ГГЧР.

Сигнальний світлодіод "Н13" (червоний) - спалахує при генерації градуювальних імпульсів.

На задній панелі ГГЧР розташований роз'єм для підключення кабелю управління.

Доступ до відсіку автономного (акумулятори) живлення - на нижній кришці ГГЧР.

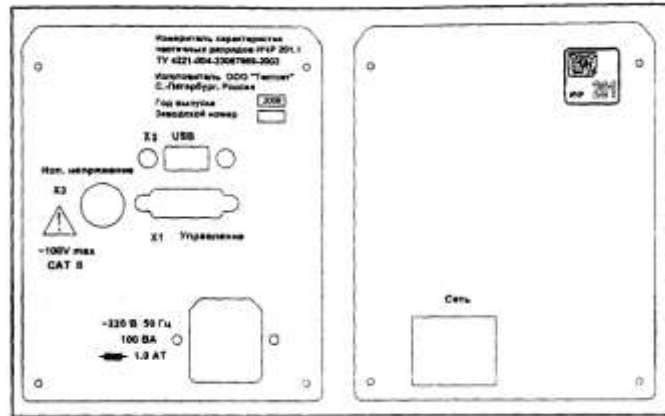
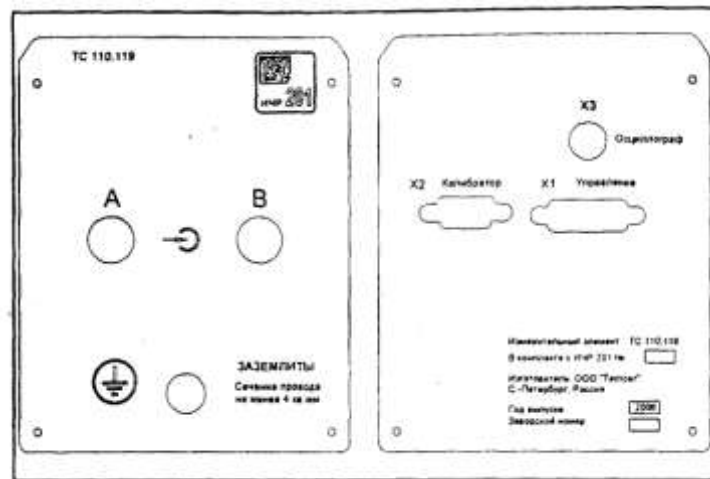


Рисунок 4.11 Задня і передня панелі приладу-вимірювача характеристик ч. р. типу ІЧР 201



а) лицьова панель

б) задня панель

Рисунок 4.11 Зовнішній вигляд панелей вимірювального елемента

Наявність автономного живлення у генератора дозволяє розміщувати його в безпосередній близькості від випробувальної схеми, забезпечуючи мінімальні паразитні місткості з'єднань.

ГГЧР має два режими роботи:

Управління від приладу ІЧР 201 - основний режим.

Процедура градування приладу в повністю зібраній випробувальній схемі вважається управлінням від приладу за допомогою панелі, що управляє, "Калібратор" основного вікна програми "PDscan". Живлення внутрішніх схем

ГГЧР в цьому режимі можливо як від джерела живлення приладу, так і від вбудованого акумулятора. Переклад на автономне живлення при підключеному кабелі управління здійснюється натисненням кнопки "Автономний" на панелі управління.

Автономний режим.

Живлення - тільки від акумулятора, включення і виключення здійснюється кнопкою 5 (рис. 6.12). Набір параметрів імпульсів, що генеруються, вибираються оператором уручну за допомогою селектора режимів 2 (рис. 6.12). Ці набори повинні бути заздалегідь записані в довготривалу пам'ять генератора з програми "PDscan", що управляє. В стані постачання режими не визначені. Користувачеві доступні режими з номерами 1-9, режим 0 - зарезервований, редагуванню не підлягає.

На виході генератора можуть бути як імпульси струму (заданого заряду), так і імпульси напруги заданої амплітуди. У режимі генерації імпульсів струму використовуються вбудовані в генератор зразкові конденсатори (місткість приблизно 7, 20 і 100 пФ). У режимі генерації імпульсів напруги повинен застосовуватися зовнішній зразковий конденсатор. Рекомендується застосування слюдяного конденсатора в металевій, добре екранованій коробці, що приєднується безпосередньо до вихідного роз'єму генератора (без сполучного кабелю). Місткість конденсатора повинна бути відома з точністю $\pm 1\%$, не гірше. Тоді заряди вихідних імпульсів будуть рівні $Q = U_{\text{ген}} \cdot C_0$.

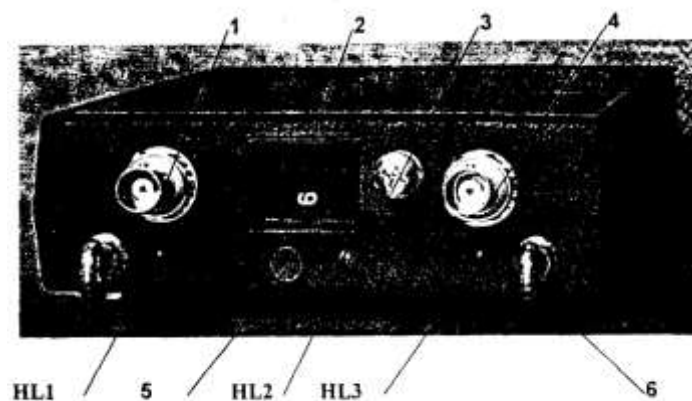


Рисунок 4.12 Зовнішній вигляд лицьової панелі ГГЧР

1 - роз'їм для підключення джерела зовнішній синхронізації (періодичний сигнал амплітудою не більше 5 В частоти до 100кГц); 2 - селектор режимів роботи; 3 - клемма заземлення; 4 - роз'їм для підключення ГГЧР до об'єкту випробувань («вихід»); 5 - вимикач батарейного живлення; 6 - петлі для кріпильного ремня; HL1-3 - сигнальні діоди

На задній панелі приладу методом гравіювання нанесено найменування, тип, номер, і рік випуску приладу. Спеціальна маркувальна етикетка виконує функцію пломби.

Маркування транспортної тари виконана відповідно до вимог ГОСТ 14192.

Прилад транспортується в транспортній тарі, що забезпечує його захист від механічних пошкоджень і атмосферних опадів. Упаковка виконана згідно вимогам ГОСТ 23216.

У пакувальний ящик також поміщена експлуатаційна документація (формуляр, керівництво по експлуатації).

Використання за призначенням

Прилад призначений для експлуатації в наступних умовах:

- температура навколишнього повітря: від плюс 5 до плюс 40 °С;
- атмосферний тиск: від 630 до 800мм рт.ст.;
- відносна вологість: не більше 90 % при температурі плюс 25 °С.
- напруга живлячої мережі (220 + 22) В частотою (50 ± 1) Гц.

Заходи безпеки.

При експлуатації приладу обслуговуючий персонал зобов'язаний виконувати заходи безпеки, викладені в сьогоденні РЕ, а також заходи безпеки, передбачені відповідними інструкціями по експлуатації випробувальної установки високої напруги і випробувального стенду.

Для забезпечення безпеки при поводженні з приладом необхідно:

- стежити за справністю мережевого шнура, включати і вимикати шнур, тримаючи його за вилку, а не за дріт;

- заземлити що всі підлягають заземленню пристрої, що входять в комплект приладу, використовуючи передбачені для цього клеми заземлення;

- не допускати попадання всередину блоків сторонніх предметів.

Підготовка ІЧР до використання

Розпакувати пристрої і кабелі, що входять в комплект приладу, перевірити комплектність постачання.

Візуальним оглядом переконатися у відсутності пошкоджень корпусу, індикаторів, органів управління кожного пристрою, що входить в комплект, а також цілісність пломбовальної етикетки на задній панелі приладу.

5 Оптимізація ізоляції силових трансформаторів

5.1. Структура ізоляції силових трансформаторів

Ізоляція силових трансформаторів розділяється на зовнішню (повітряну) і внутрішню. Зовнішня ізоляція трансформаторів складається із повітряних проміжків: між введеннями і заземленим баком, між введеннями різних обмоток, а також уздовж фарфорових покриттів введень. Її вибір проводять аналогічно вибору відповідної ізоляції будь-якого іншого електроустаткування підстанції. До внутрішньої ізоляції відносять ізоляцію обмоток, масляній частині введень, відведень і допоміжних пристроїв (наприклад, перемикачів). Ізоляцію обмоток розділяють на головну і поздовжню. До головної ізоляції відносять ізоляцію між обмотками, між обмоткою і магнітопроводом, ізоляцію між зовнішніми обмотками двох сусідніх стрижнів магнітопровода (міжфазову) і ізоляцію зовнішньої обмотки від стінки бака. До поздовжньої ізоляції відносять виткову ізоляцію між котушками або шарами витків.

На рисунку 5.1 схематично зображена головна ізоляція трьохобмоткового трансформатора і вказані основні ізоляційні проміжки: ізоляція між обмотками вищої (ВН) і середньої (СН), середньої і нижчої (НН) напруги (проміжки $S_{вн-сн}$ $S_{сн-нн}$), ізоляція обмотки нижчої напруги від стрижня магнітопровода $S_{нн-с}$ і ярмова ізоляція $S_{я}$, міжфазна ізоляція $S_{мф}$.

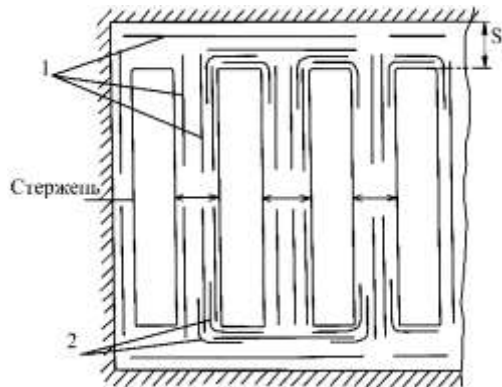
Головна ізоляція силових трансформаторів виконується маслбар'єрного типу і складається з електрокартонних бар'єрів, що чергуються, з масляними каналами (2, 3), див. рисунок 5.2. Рідко діелектриком є нафтові трансформаторні масла. Розділенням бар'єрами одного великого масляного ізоляційного проміжку на декілька менших досягають збільшення рівня ізоляції в цілому. Найбільший ефект збільшення має місце тоді, коли бар'єр розташовується перпендикулярно силовим лініям поля, завдяки чому відсутня тангенціальна складова напруженості поля уздовж поверхні картону.

Вертикальні (радіальні) циліндрові канали між обмоткою і циліндровими бар'єрами, а також між бар'єрами виконують за допомогою дистанціюючих рейок

(4), рисунок 5.2, які в першому випадку вставляють в горизонтально розташовані дистанціюючі прокладки (5), створюючи горизонтальні (аксіальні) канали між котушками (6). Рейки і прокладки виготовляють з електрокартону.

Верхнє яро

а.)



б.)

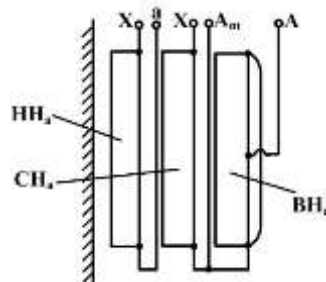
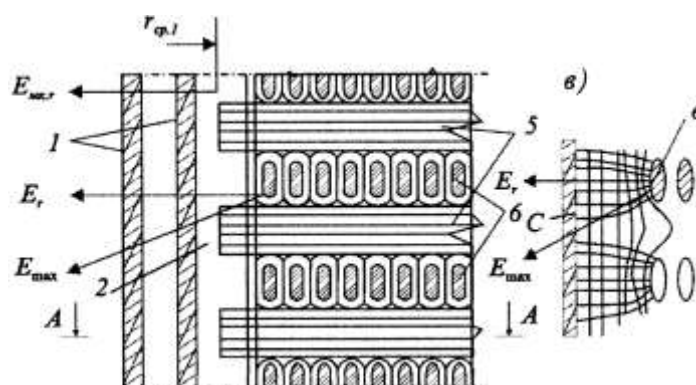


Рисунок 5.1. Схема головної ізоляції обмоток трансформатора: а - конструктивна схема; б - схема з'єднання обмоток

1 - бар'єри; 2 - кутові шайби; $НН_а$, $СН_а$, $ВН_а$ - обмотки нижчої, середньої і вищої напруг фази А; $ВН_в$ - обмотка вищої напруги фази В; а, х - виводи початку і кінця обмотки НН; А, A_T X - виводи вищої і середньої напруг і нейтралі.

У трансформаторах класів напруги 110 кВ і вище для ізоляції краю обмотки від ярма магнітопровода застосовують кутові шайби, які виготовляють з листового електрокартону (рис.5.3), або методом литва з паперової маси, або методом формування з електрокартону.

а.)



б.)

A-A

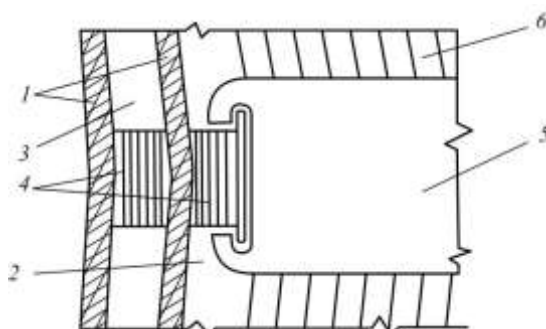


Рисунок 5.2. Ескізи виконання ізоляції біля внутрішньої поверхні обмотки (а, би) і картина електричного поля в масляному каналі поблизу обмотки (в):

1 - бар'єр; 2 - перший масляний канал; 3 - масляний канал між бар'єрами; 4 - дистанційуюча рейка; 5 - прокладка; 6 - котушки обмотки

Масляні канали є елементами ізоляції і одночасно шляхами для циркуляції масла, які забезпечують відведення тепла від активних частин (обмоток, магнітопровода). Бак трансформатора, в якому знаходиться активна частина (магнітопровід і обмотка, відведення і допоміжні пристрої) заповнюють під вакуумом трансформаторним маслом.



Рисунок 5.3. Конструкція кутової шайби з електрокартону

Ізоляція трансформаторів на напругу 3-35 кВ має схожу по конструкції маслобар'єрну головну ізоляцію, яка відрізняється тільки деякими розмірами. На рисунку 5.4 приведена конструкція ізоляції трансформатора 35 кВ.

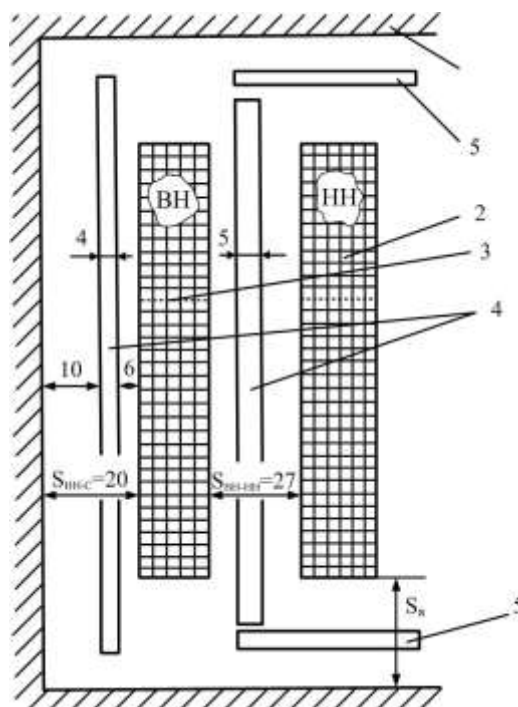


Рисунок 5.4. Конструкція ізоляції трансформатора 35 кВ

1 - магнітопровід; 2 - обмотка ВН; 3 - обмотка НН; 4 — бакелітові циліндри; 5 - щитки з електрокартону

Головна ізоляція між обмотками нижчої НН і вищої ВН напруг трансформаторів 3-35 кВ складається з двох масляних каналів, розділених бар'єром - бакелітовим циліндром завтовшки 3-6 мм. Головна ізоляційна відстань $S_{вн-нн}$ зазвичай складає 15-27 мм і визначається конструктивними і технологічними вимогами. Те ж саме можна сказати і про ярмову ізоляцію.

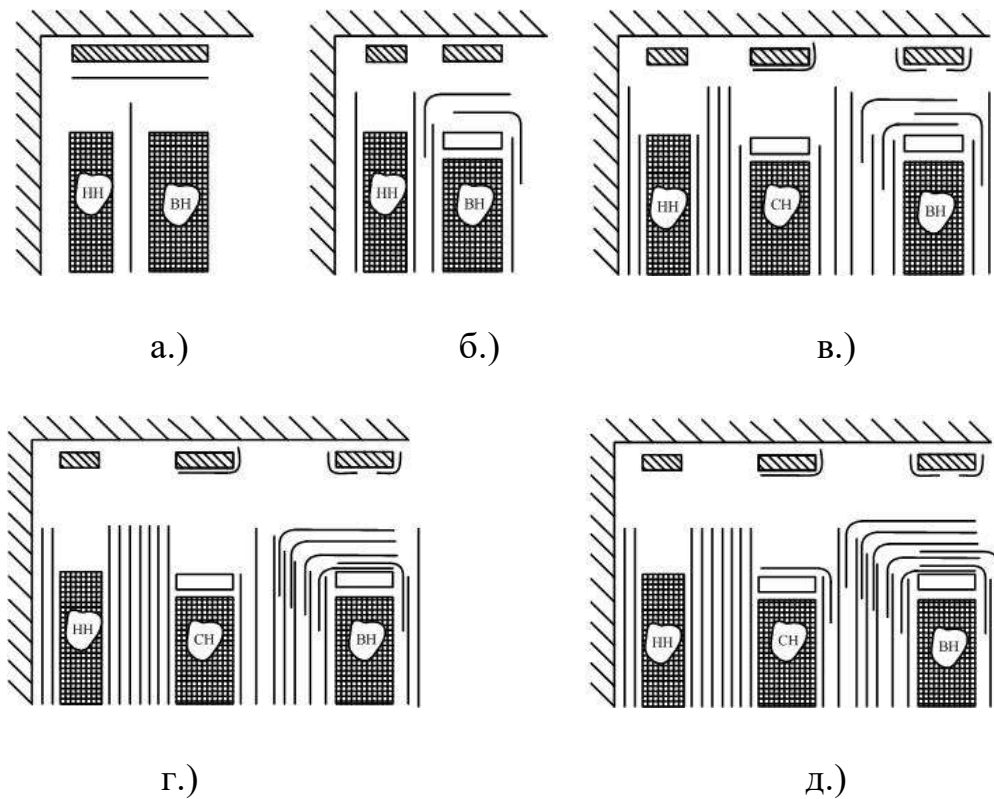
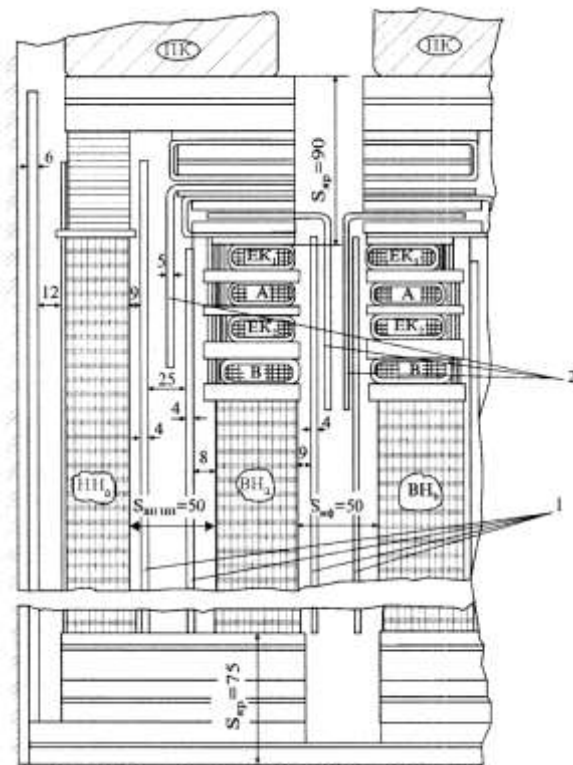


Рисунок 5.5. Характерна будова головної ізоляції трансформаторів 35 кВ (а), ПО кВ (б) і автотрансформаторів (введення напруги в середину обмотки ВН): 330/220 кВ (в), 500/330 кВ (г)

Кількість картонних бар'єрів і їх розташування розрізняються залежно від номінальної напруги і від конструкції трансформатора (див. рис.5-5).

Обмотки вищої напруги трансформаторів класів 110-330 кВ виконуються безперервними, а трансформаторів 500 кВ і вище - переплетеними. Виготовляють обмотки ВН з мідного обмоткового дроту прямокутного перерізу. У трансформаторах 220 кВ і вище часто роблять введення в середину обмотки, що приводить до зменшення напруженості і полегшує ізоляцію в області країв обмотки. У ряді випадків обмотка складається з двох послідовно сполучених частин (концентрів), що дозволяє застосовувати автотрансформаторну схему з'єднання обмоток і зменшує поздовжню складову напруженості електричного поля (див. рис.5. 1, б).



ЯРМО

Рисунок 5.6. Ескіз ізоляції двохобмоткового трансформатора 110 кВ з введенням на краю обмотки.

НН_а, ВН_а - обмотки нижчої і вищої напруг фази А; ВН_б - обмотка вищої напруги фази В; ПК - заземлене пресувальне кільце; ЕК₁, і ЕК₂ - ємнісні кільця; А і В - котушки вхідної зони; 1 - бар'єри з електрокартону; 2 - кутові шайби.

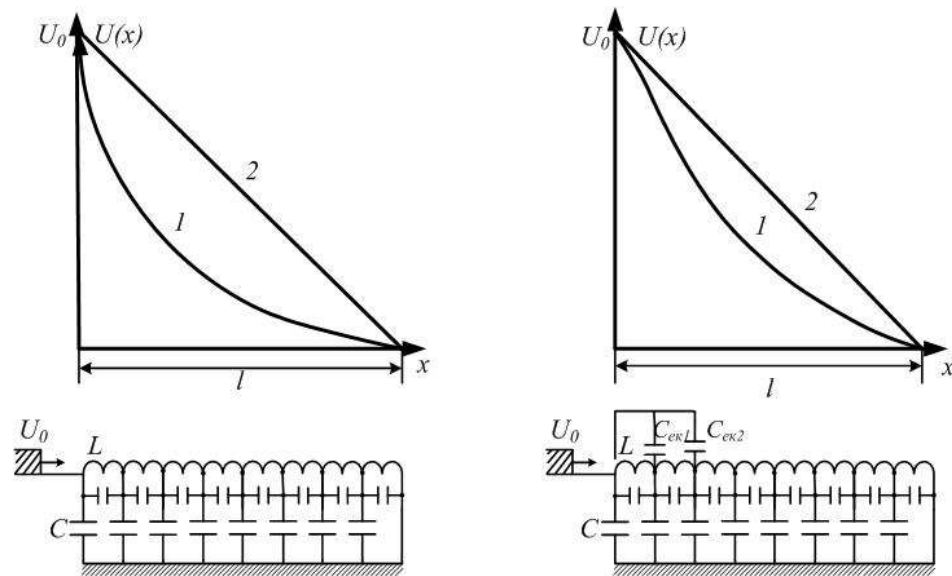


Рисунок 5.7. Еквівалентна схема і розподіл напруги уздовж обмотки при грозових перенапругах:

а - без ємнісного захисту; б - із ємнісним захистом і обмоткою.

1,2- початковий і кінцевий розподіли напруги; L - індуктивність і C – ємність відносно землі на одиницю довжини обмотки; K , K_n - поздовжня ємність на одиницю довжини звичайної і переплетеної обмоток ($K < K_n$); $C_{ек1}$, $C_{ек2}$ - ємність ємнісних кілець.

На рисунку 5.6 приведена конструктивна схема виконання ізоляції двохобмоткового трансформатора 110 кВ з введенням на краю обмотки. Котушки, що примикають до лінійного кінця, мають посилену поздовжню ізоляцію і утворюють вхідну зону.

Для поліпшення конфігурації електричного поля на краю обмотки і вирівнювання початкового розподілу напруги уподовж по обмотці при грозових перенапругах біля катушок вхідної зони обмотки ставлять ємнісне кільце, яке збільшує ємність між цими катушками і точкою входу в обмотку (рисунок 5.7). Ємнісне кільце повинне мати розриви з метою усунення струму в контурі кільця.

Розподіл імпульсної напруги по обмотці при грозових перенапругах може бути покращений також за рахунок збільшення поздовжньої ємності між котушками і витками обмотки. Це досягається шляхом використання переплетеної обмотки (див. рис.5.8).

5.2. Короткочасна електрична міцність маслобар'єрної ізоляції

У маслобар'єрної ізоляції, що складається з шарів електрокартону і масла, при дії змінної і імпульсної напруги, навантаженими виявляються прошарки масла. Наприклад, в області рівномірного поля співвідношення між напруженостями в маслі E_M , і в бар'єрі з електрокартону E_δ має вид $E_M/E_\delta = \epsilon_\delta/\epsilon_M$, де при $\epsilon_\delta = 4\epsilon_0$ і $\epsilon_M = 2,2\epsilon_0$ $E_M/E_\delta = 1,8$.

Електрична міцність масла в 3-4 рази менше міцності просоченого електрокартону, тому порушення електричної міцності маслобар'єрної ізоляції починається з пробією масляного каналу, що не приводить до повного пробією ізоляції. Такий пробій є по суті частковим розрядом достатньо великої інтенсивності, зазвичай із зарядом, що здається, близько 10^{-7} - 10^{-6} Кл і більш. При цьому в місці пробією масла в результаті енергії, що виділяється, і високої температури каналу розряду, утворюються незворотні пошкодження твердої ізоляції (картону, паперу), що знижують її тривалу міцність.

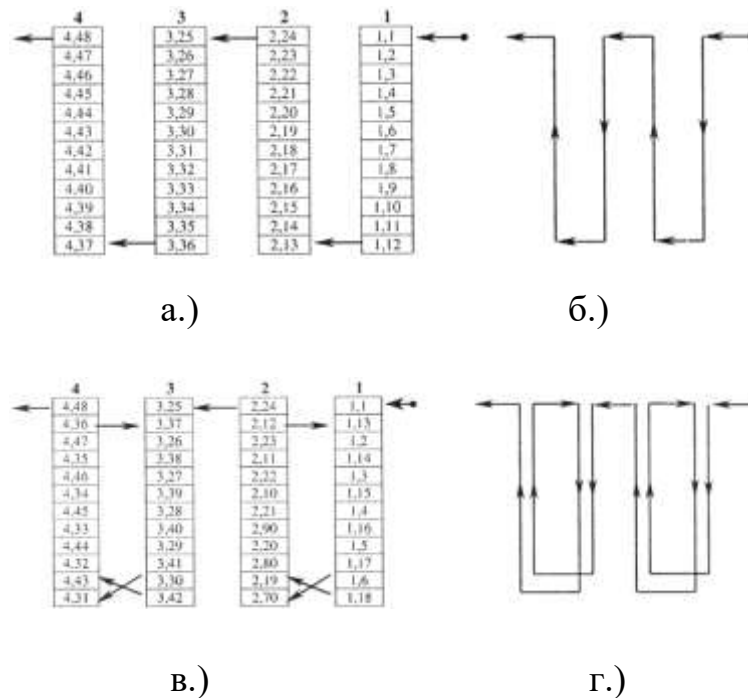


Рисунок 5.8. Схеми звичайної безперервної котушкової (дискової) (а, б) і переплетеної (у, г) обмоток; б, г — напрям струму у витках котушок 1-4. У прямокутниках перші номери (1-4) - номери котушок, другі номери (1-48) - номери витків

Надалі можлива поява сильно розгалуженого вуглицевого каналу, який отримав назву "Повзучого розряду", і захоплює великі поверхні бар'єру, що приводить до повного пробою ізоляції. У експлуатації і при випробуваннях виникнення таких пошкоджень не може бути допущене, і тому під короткочасним і тривалим рівнем маслбар'єрної ізоляції розуміють напругу, при якій відбувається пробій масляного каналу.

У головній ізоляції трансформатора, як правило, перш за все пробивається перший масляний канал, що розділяє обмотку і найближчий до неї бар'єр з електрокартону. Ширина першого масляного каналу в практично існуючих конструкціях лежить в межах від 5 до 16 мм. Електричне поле в першому масляному каналі (див. рис.5.2) істотно відрізняється від рівномірного за рахунок наявності котушок обмотки, розділених горизонтальними масляними каналами. При цьому максимальна напруженість поблизу поверхні ізоляції дроту $E_{max}=(1,2-1,5)E_{mk}$, де E_{mk} - напруженість електричного поля в середині першого масляного каналу.

Рівень ізоляції масляних каналів між бар'єрами приблизно в 1,5 рази вищий, ніж першого масляного каналу.

При розрахунку ізоляції силових трансформаторів враховують, що рівень ізоляції масляного каналу визначається середньою напруженістю упродовж найбільш довгої силової лінії від кута котушки до найближчого ізоляційного бар'єру. Ця напруженість E_{mk} визначається на підставі розрахунку електричного поля обмотки на ЕОМ з урахуванням розподілу напруги уздовж обмоток (осьовій напруженості електричного поля, що становить), див. рис.5.2:

$$E_{mk} = \frac{1}{\ell_{\text{вс}}} \int_a^c E_m d\ell \quad (5.1)$$

де $\ell_{\text{вс}}$ — довжина даної силової лінії в масляному каналі; E_m - напруженість в масляному каналі в даній точці силової лінії.

За відсутності картини електричного поля обмотки в першому наближенні рівень маслобар'єрної ізоляції може визначатися по напруженості в середині першого масляного каналу без урахування спотворення поля обмоткою (у припущенні коаксіальних циліндрових гладких електродів) з подальшою корекцією на поздовжню (осьову) складову електричного поля, обумовлену розподілом напруги уздовж обмотки. Це можливо тому, що досліди за визначенням рівня маслобар'єрної ізоляції проводять на зразках (макетах, моделях), які відтворюють картину поля в реальній ізоляції трансформаторів і реальні розміри країв котушок дроту, масляних каналів, бар'єрів, дистанційуючих рейок і прокладок.

У разі однопотенційної обмотки при визначенні середньої радіальної напруженості в масляному каналі падіння напруги на масляному каналі ΔU_m можна визначити з розрахунку, що прикладена до ізоляції напруга розподілятиметься обернено пропорційно до ємностей відповідних шарів ізоляції, сполучених послідовно.

При цьому

$$\Delta U_m = \frac{1/C_m}{\sum_{i=1}^n 1/C_i} \quad (5.2)$$

Якщо U - напруга між обмотками в даній області маслобар'єрної ізоляції; r_0 - зовнішній радіус внутрішньої обмотки; r_1 - внутрішній радіус першого бар'єру; r_i - радіус зовнішньої граничної поверхні i -го шару; ϵ_m - діелектрична проникність масла; ϵ_i - діелектрична проникність i -го шару, то радіальна напруженість в середині першого масляного каналу

$$E_{\text{мкр}} = \frac{\Delta U_{\text{м}}}{r_{\text{сп1}} \ln(r_1 / r_0)} = \frac{U}{r_{\text{сп1}} \varepsilon_{\text{м}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_i} \ln(r_i / r_{i-1})} \quad (5.3)$$

де $r_{\text{сп1}}$ — радіус поверхні, що проходить через середину першого масляного каналу.

Рівень ізоляції масляного каналу істотно збільшується із зменшенням його ширини (див. рис.5.9). Величину пробивної напруженості визначають по формулі (5.1), або в середині масляного каналу по формулі (5.3).

Залежність пробивної напруженості $E_{\text{мк.пр}}$ від ширини масляного каналу $S_{\text{мк}}$ для всіх видів короткочасно діючої напруги може бути представлена у вигляді:

$$E_{\text{мк.пр}} = A (S_{\text{мк}} / S_{\text{мк10}})^{-0.37}, \quad (5.4)$$

де $S_{\text{мк}} = 10 \text{ мм}$

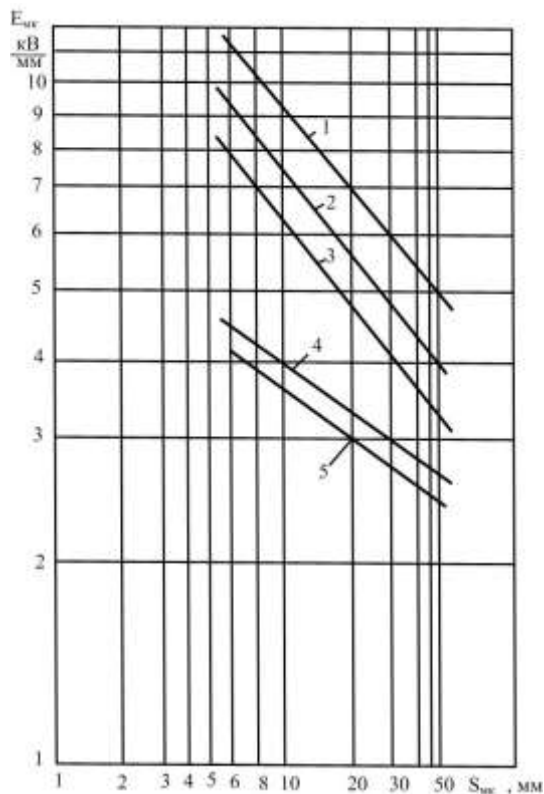


Рисунок 5.9. Залежності між середньою пробивною (5-1), мінімальною пробивною при ймовірності пробою 0,05 (5-2) і допустимою (5-3) напруженостями при однохвилинній дії напруги промислової частоти, а також середній робочій напруженості для середини обмотки (5-4) і для краю обмотки (5-5) в першому масляному каналі від його ширини.

Якщо $E_{мк.пр}$ виражене в кВ/мм, а $S_{мк}$ - в мм, то коефіцієнт А (кВ/мм) для середньої пробивної напруженості приймає наступні значення: 7,5 - для одногодинної напруги промислової частоти; 9,2 - для однохвилинної напруги промислової частоти; 16,0 - для напруги комутаційного імпульсу; 23,0 - для напруги повного грозового імпульсу.

Відповідно, для мінімальних значень $E_{мк.пр \min}$, що відповідають ймовірності пробою близько 0,05 коефіцієнт А у формулі (5.4) рівний: 6,5 - для одногодинної напруги промислової частоти; 7,2 - для однохвилинної напруги промислової частоти; 13,8 - для напруги комутаційного імпульсу; 20,0 - для напруги повного грозового імпульсу.

Електричну міцність при імпульсних діях можна виразити через коефіцієнт імпульсу, і $K_{имп} = U_{пр.имп} / \sqrt{2}U_{пр.50Гц.мін}$ де $U_{пр.имп}$ імпульсна пробивна напруга, а $\sqrt{2}U_{пр.50Гц,1мін}$ - амплітудне значення однохвилинної пробивної напруги промислової частоти. Величина $K_{имп}$, залежить від форми імпульсу, його тривалості, від конструкції ізоляції і може бути прийнята рівною: для комутаційного імпульсу $K_{имп.ком} = 1,35$; для повного грозового імпульсу $K_{имп.гроз} = 2,0$; для зрізаного імпульсу $K_{имп.срез} = 2,2$.

5.3. Тривала електрична міцність маслобар'єрної ізоляції

Основними чинниками, що викликають старіння маслобар'єрної ізоляції є:

- дія електричного поля і часткових розрядів;
- зволоження ізоляції за рахунок проникнення вологи з атмосферного

повітря і в результаті розкладання трансформаторного масла і целюлозних матеріалів;

- окислювальні процеси під впливом підвищеної температури і розчиненого в маслі кисню.

В результаті дії ч.р. на масло і тверду ізоляцію, процесів теплового старіння, місцевих перегрівань обмотки виникає розкладання ізоляції з виділенням газів, при цьому найшвидше розкладається масло. При різних пошкодженнях трансформатора склад розчиненого газу, що виділяється, може істотно розрізнятися. Так, високий вміст CO, CO₂ і H₂ указує на сильне місцеве перегрівання, що супроводжується термічним розкладанням масла. Поява H₂ і в невеликих кількостях C₂H₄, CO₂, CH₄ характерна для ч.р. у маслі. Іскрові розряди в маслобар'єрної ізоляції і потужні ч.р. приводять крім того до появи ацетилену C₂H₂.

На рисунку 5.10 приведена залежність відносної величини руйнівної напруги від тривалості дії, яка отримана на моделях маслобар'єрної ізоляції. Для залежності U_{np} від часу витримки напруги τ в діапазоні 10²—10⁵ с може бути запропонована формула

$$\tau_2/\tau_1 = (U_{np1}/U_{np2})^n \quad (5.5)$$

де n змінюється в межах 55-75

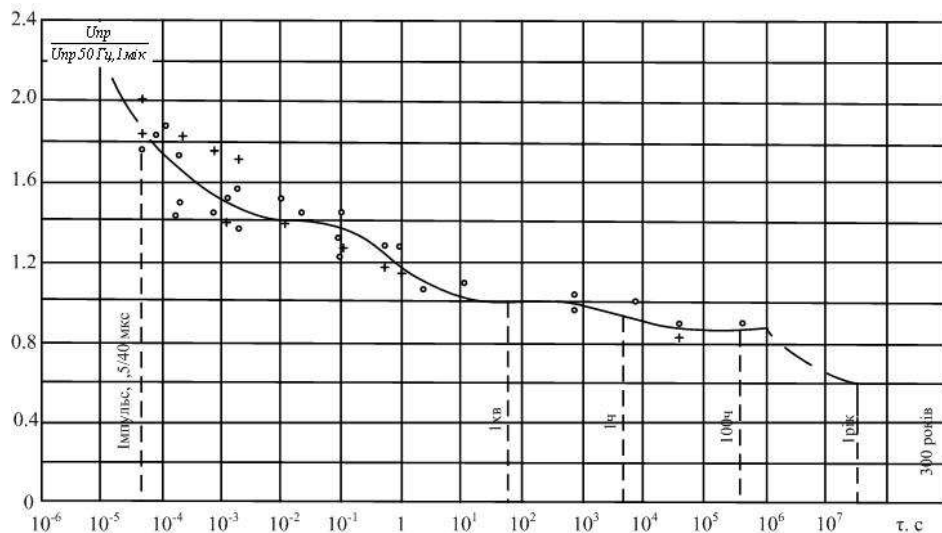


Рисунок 5.10. Залежність пробивної напруженості маслобар'єрної ізоляції від тривалості дії τ : $\tau < 0,1$ с - аперіодичні і коливальні імпульси; $\tau \geq 0,1$ с - змінна напруга 50 Гц; ° - моделі середньої частини обмотки; + - моделі краю обмотки

5.4. Вибір допустимих напруженостей при випробувальній напрузі.

При визначенні допустимих напруженостей електричного поля при короткочасних діях в ізоляції силових трансформаторів на підставі випробування моделей можна користуватися методикою, по якій в залежності $E_{мк.пр\ min}$ по (5.4) з урахуванням відповідних значень коефіцієнта A вводиться поправочний коефіцієнт, який враховує: невелику кількість дослідів, використану для отримання цієї залежності; менші в порівнянні з реальним трансформатором розміри зразка (з урахуванням розподілу напруги по обмотці реального трансформатора і обмеженості зони з граничними напруженостями електричного поля); можливі відхилення в розмірах елементів ізоляції. Інтервал між $E_{мк.пр\ min}$ і допустимою напруженістю при відповідних випробувальних діях $E_{мк.доп}$ може бути рівним 15%, тобто

$$E_{мк.доп} = 0,85E_{мк.пр.min} \quad (5.6)$$

Вибір допустимих робочих напруженостей. Допустима напруженість при робочій напрузі для маслобар'єрної ізоляції може бути визначена орієнтовно, виходячи з ряду міркувань: відсутність ч.р. із уявним зарядом, більш 10^{-10} Кл, дослідження тривалої електричної міцності маслобар'єрної ізоляції з урахуванням її електротермоокислювального старіння, відсутності газовиділення в маслі, збільшення газовмісту масла за рахунок процесів розкладання ізоляції при діючих напругах. Допустима напруженість електричного поля істотно залежить також від конструкції трансформатора: системи захисту бака трансформатора від впливу

навколишнього середовища, системи регенерації трансформаторного масла в процесі експлуатації, теплового режиму трансформатора.

У сучасних трансформаторах застосовують наступні способи захисту ізоляції: системи з розширювачем, термосифонним або адсорбційним фільтром (для класів напруги 110-220 кВ), системи із заповненням простору розширювача сухим азотом в еластичному мішку-азотний захист, і з герметизацією розширювача еластичною плівкою - плівковий захист (для класів напруги 220-750 кВ).

Для цих трансформаторів залежність допустимої робочої напруженості від ширини першого масляного каналу в межах 5-30 мм для області середини і краю обмотки з жорсткою кутовою шайбою визначається формулою типу (5.4), в якій коефіцієнт A приймає наступні значення: для області середини обмотки 4 кВ/мм, для області краю обмотки 3,6 кВ/мм, а показник ступеня рівний 0,26. Ці залежності приведені на рис.5-9. Так, наприклад, для ширини масляного каналу 6 мм для середини обмотки $E_{мк.до.роб} = 4,5$ кВ/мм і для краю обмотки $E_{мк.доп.роб} = 4$ кВ/мм.

Для ряду конструкцій трансформаторів через недосконалість систем захисту ізоляції від дії навколишнього середовища, старіння і зволоження може відбуватись накопичення продуктів деструкції, що призводить до помітного зниження ресурсу ізоляції. В цьому випадку робочі напруженості повинні бути зменшені приблизно в 2 рази.

5.5. Розрахунок ізоляції силових трансформаторів

Зазвичай розрахунок головної ізоляції ($S_{вн-сн}$ $S_{сн-нн}$) повинен проводитися в два етапи: на першому етапі виконують оцінний розрахунок, по якому орієнтовно вибирають основні розміри головної ізоляції, розміри масляних каналів, число і розташування бар'єрів. На другому етапі для вибраної конструкції ізоляції проводять уточнений розрахунок напруженостей електричного поля в першому масляному каналі (найближчому до обмотки) шляхом розрахунку

електростатичного поля обмотки на ЕОМ при всіх видах випробувальної напруги з урахуванням розподілу напруги на обмотці. Розрахунки виконують окремо для зони середини і для зони краю обмотки.

Для розподілу основних ізоляційних відстаней результуючою величиною є випробувальна напруга. При цьому залежно від схеми з'єднання обмоток і їх розташування розрахункову напругу визначають виходячи з імпульсної випробувальної напруги, або однохвилинної напруги промислової частоти.

За розрахункову приймають найбільшу напругу, яка впливає на певні ділянки головної або поздовжньої ізоляції при відповідних випробувальних діях. Розрахунок ведуть, виходячи з допустимих напруженостей електричного поля при відповідних випробувальних діях, які вибирають по формулі (5.6).

Слід зазначити, що для трансформаторів класу напруги 330 кВ і вище імпульсні випробування передбачають дію стандартних грозових (1,2/50 мкс і зрізаного) і аперіодичного 250/2500 мкс або коливального 100/1000 мкс імпульсів.

Розрахунок головної ізоляції в зоні середини обмотки. Радіальна ізоляційна відстань між обмоткою НН і стрижнем магнітопровода C , S_{HH-C} , визначається як електричною міцністю, так і конструктивними і технологічними особливостями.

Оскільки рівень маслобар'єрної ізоляції визначається рівнем першого масляного каналу, то перш за все з технологічних і конструктивних міркувань вибирають ширину першого масляного каналу S_{mk1} . Зазвичай ширина першого масляного каналу лежить в межах 5-10 мм, причому масляні канали менше 10 мм застосовують тільки в трансформаторах вищих класів напруги.

Для прийнятої ширини першого масляного каналу S_{mk1} по формулі (5.6) визначають розрахункову допустиму напруженість в масляному каналі при відповідній випробувальній напрузі $E_{mk.dop}$.

По вибраній розрахунковій напрузі розраховують основні розміри ізоляції трансформатора. У першому наближенні відстань між обмотками або між обмоткою і екраном може бути визначено по формулі

$$S_{\Sigma} = U_{\text{розрах}} \kappa_{i3} / E_{\text{мк.доп}}, \quad (5.7)$$

де κ_{i3} - 1,1 ÷ 1,2 - коефіцієнт, що враховує збільшення напруженості поля в масляному каналі із-за наявності бар'єрів і циліндричності конструкції головної ізоляції. Потім визначають радіальну будову ізоляції: кількість, розташування і товщину бар'єрів - циліндрів з електрокартону. При цьому враховується, що масляні канали між бар'єрами можуть мати велику ширину, оскільки рівень ізоляції цих каналів принаймні в 1,5 разу вище за рівень масляного каналу, прилеглого до обмотки, унаслідок відсутності спотворення поля котушками обмотки. Зазвичай канали між бар'єрами роблять не більше 25 мм. У трансформаторах вищих класів напруги другий від обмотки канал виконують не більше 12 мм, подальші - не більше 20 мм. Кількість бар'єрів n_{δ} приблизно оцінюють по формулі:

$$n_{\delta} \approx U_{\text{розрах}} / 100 \quad (5.8)$$

де $U_{\text{розрах}}$ виражають в кіловольтах.

При визначенні товщини бар'єру необхідно приймати до уваги вплив бар'єру на напруженість електричного поля $E_{\text{мк}}$ в масляному каналі.

Оскільки $\varepsilon_{\delta} > \varepsilon_{\text{м}}$, то збільшення сумарної товщини бар'єрів приводить до збільшення напруженості $E_{\text{мк}}$ в масляному каналі і погіршення роботи ізоляції.

При виборі товщини бар'єрів необхідно враховувати конструктивні міркування (можливість забезпечення необхідної ширини масляного каналу за всією площею циліндра), а також умову відсутності крізного пробою при пробіі одного з масляних каналів при дії перенапруг. З досвіду конструювання маслбар'єрної ізоляції зазвичай приймають $S_{\Sigma\delta} = (0,2 - 0,25) S_{\Sigma}$, товщину кожного бар'єру (циліндра)

$$S_{\delta} = \frac{S_{\Sigma\delta}}{n_{\delta}}.$$

Зазвичай $S_\delta = 3\text{мм}$

Знаючи зовнішній радіус внутрішньої обмотки r_0 , по визначеним набутих значень $S_{зл}$, $S_{мк1}$, $S_{мк}$, S_δ , n_δ можна визначити зовнішній і внутрішній радіуси кожного бар'єру (рис.5-11):

$$r_1 = r_0 + S_{мк1}, r_2 = r_1 + S_\delta, r_3 = r_2 + S_{мк}, \dots, r_n = r_{i-1} + S_{мк1}$$

причому $r_n - r_0 — S_{зл}$.

На підставі отриманих оцінок розмірів головної ізоляції на другому етапі розрахунку для вибраної конструкції ізоляції проводять уточнений розрахунок напруженості електричного поля в першому масляному каналі (найближчому до обмотки). Найточніше напруженість в першому масляному каналі $E_{мк}$ може бути визначена на підставі розрахунку електростатичного поля (див. рисунок 5.11 з урахуванням поздовжньої осьової складової напруженості. При цьому значення $E_{мк}$ розраховується по (7.1). Значення поздовжньої напруженості поля, що становить, залежатиме від того, при якій впливаючій напрузі проводять розрахунок електростатичного поля.

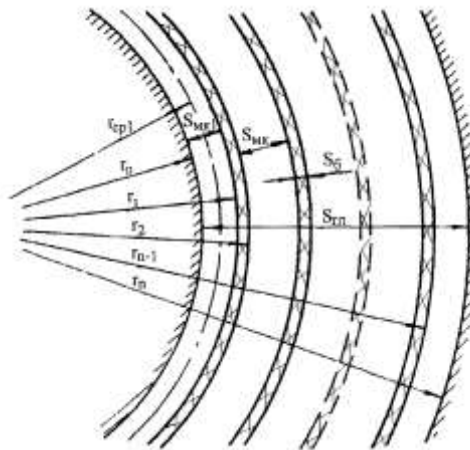


Рисунок 5.11. Схема головної маслобар'єрної ізоляції між обмотками трансформатора

За відсутності можливості розрахувати електростатичне поле можливий спрощений розрахунок, по якому визначають радіальну складову напруженості в середині першого масляного каналу по формулі (5.3). При $S_{mk}/S_{zl} = 0,1-0,25$ зазвичай $E_{mk} = (1,0-1,2) E_{mk r}$.

Отримана по (5.1) або (5.3) розрахункова напруженість E_{mk} повинна бути зіставлена з допустимою напруженістю $E_{mk доп}$, обчисленою по (5.4) і (5.6). Якщо для вибраного першого масляного каналу напруженість E_{mk} при розрахунковій дії напруги більше, ніж $E_{mk доп}$, то відстань між обмотками повинна бути збільшена за рахунок збільшення масляних каналів між бар'єрами.

Розрахунок головної ізоляції в зоні краю обмотки.

Ярмову ізоляційну відстань S_y зазвичай приймають в 1,5-2 рази більшою, ніж відстань між обмотками. Кількість кутових шайб приблизно удвічі менше, ніж кількість циліндрових бар'єрів між обмотками. У основу попереднього розрахунку кладеться картина електричного поля в даній зоні для відповідної розрахункової напруги. По картині поля вибирають найбільш напружені силові лінії, по яких найбільш ймовірний розвиток пробую: поблизу малого радіусу закруглення ємнісного кільця, у кутів першої котушки, в масляних каналах між кутовими шайбами (наприклад, силова лінія, ділянка $\ell_{\text{вс}}$ якої між поверхнею ізоляції кільця ємності і першою кутовою шайбою має найбільшу довжину).

Потім, так само, як і при розрахунку ізоляції в зоні середини обмотки по (5.1) визначають середню напруженість в масляному каналі E_{mk} по довжині силовій лінії $\ell_{\text{вс}}$. Напруженість E_{mk} порівнюють з допустимою напруженістю в масляному каналі $E_{mk доп}$, обчисленою по (5.4) і (5.6) для ширини масляного каналу $S_{mk} = \ell_{\text{вс}}$ при відповідній розрахунковій нарузі. Якщо напруженість в масляному каналі E_{mk} при цій дії більше допустимого значення $E_{mk доп}$ то треба або збільшити загальну

ярмову відстань, або наблизити кутову шайбу (зменшити довжину l_{ac}), або змінити конфігурацію ємнісного кільця з метою зменшення ступеня нерівномірності поля. У тих випадках, коли вибір силової лінії, по якій ймовірність пробоя найбільша, не очевидний, необхідно перевірити декілька силових ліній.

Розрахунок поздовжньої ізоляції. Виткова ізоляція виконується з шарів кабельного паперу, що накладаються на дріт обмотки в пів нахльостування. Ізоляція між котушками складається з масляного каналу шириною від 8 до 30 мм і паперової ізоляції дроту, яка посилюється у разі потреби додатковою підмоткою паперу, що охоплює всі витки котушки. Основою розрахунку поздовжньої ізоляції є визначення напруги ΔU_k між котушками і між витками при імпульсних діях. Значення ΔU_k знаходяться за допомогою обчислювальних машин, або на підставі імпульсних обмірів на моделі обмотки.

Спрощено розмір каналів S_k і твердої ізоляції d_{iz} проводять на підставі залежності $E_{mk,доп}$ від ширини каналу між котушками по (5.4) з урахуванням поправочного множника для коефіцієнта A , який змінюється від 0,7 при товщині твердої ізоляції на дві сторони, рівній 1,35 мм, до 0,9 при товщині ізоляції 2,96 мм.

Напруженість в маслі в аксіальному каналі між котушками

$$E_{mk} = \frac{\Delta U_k}{S_k + d_{iz}(\epsilon_M / \epsilon_\delta)} \quad (5.9)$$

Це значення порівнюють з допустимою напруженістю з формул (5.4) і (5.6).

Необхідна величина виткової ізоляції визначається по залежностях E_{np} від d_{iz} для імпульсів завдовжки від 3 до 20 мкс.

7 Економічна частина

6.1 Визначення кошторисної вартості ремонту основного і допоміжного енергетичного обладнання, передавальних пристроїв і споруд атомних електростанцій за однорівневою системою ціноутворення

Визначення вартості ремонту обладнання базується на нормативно–розрахункових показниках і поточних цінах на трудові і матеріально–технічні ресурси.

Нормативні трудовитрати визначаються на підставі норм часу на ремонт обладнання згідно нормативних документів за Додатком А.

За відсутності відповідних робіт в нормах часу або у випадку необхідності деталізації робіт, вартість ремонтних робіт визначається:

- на основі місцевих норм часу, затверджених в установленому порядку;
- розрахунковим шляхом відповідно до обсягів та змісту робіт, визначених технічним завданням, дефектною відомістю.

Заробітна плата робітників-ремонтників розраховується на підставі нормативних трудовитрат і поточної вартості людино–години відповідного розряду.

Поточну вартість людино–години за відповідними розрядами робіт, яка включає основну і додаткову заробітну плату, надає Міненерговугілля України (ДП НАЕК "Енергоатом").

Усереднені показники вартості людино–години для звичайних умов праці при 40-годинному робочому тижні за розрядами робіт наведено у додатку Б.

При виконанні ремонтних робіт у важких і шкідливих, особливо важких і особливо шкідливих умовах праці до прямої заробітної плати (усередненої вартості людино-години) робітників-ремонтників застосовуються коефіцієнти.

При визначенні вартості ремонтних робіт розраховується загальна

кошторисна трудомісткість, яка визначається як сума нормативної та розрахункової трудомісткості цих робіт, що передбачається:

– у прямих витратах – нормативна кошторисна трудомісткість, визначена на підставі норм часу, що враховує трудовитрати робітників–ремонтників (з урахуванням коефіцієнтів до трудовитрат) і розрахункової трудомісткості робітників*, зайнятих на керуванні та обслуговуванні машин і механізмів;

– у загальновиробничих витратах – розрахункова кошторисна трудомісткість, визначена на підставі усереднених розрахункових показників.

Загальна кошторисна трудомісткість розраховується за формулою:

$$T_k = (T_{пв} + T_{зв}), \quad (6.1)$$

де T_k – загальна кошторисна трудомісткість, люд.-год.;

$T_{пв}$ – нормативно–розрахункова кошторисна трудомісткість робіт, що передбачається в прямих витратах, яка враховує нормативні трудовитрати робітників–ремонтників і розрахункові трудовитрати робітників, зайнятих на керуванні та обслуговуванні машин і механізмів, люд.-год.;

$T_{зв}$ – трудовитрати працівників, заробітна плата яких враховується в загальновиробничих витратах, люд.-год.

Кошторисна вартість ремонту обладнання складається з:

а) прямих витрат;

б) загальновиробничих витрат;

в) кошторисного прибутку;

г) адміністративних витрат;

д) супутніх витрат;

е) податків, зборів, обов'язкових платежів, встановлених чинним законодавством і не врахованих складовими вартості ремонту обладнання.

Прямі витрати включають:

- заробітну плату ремонтного персоналу, у тому числі і заробітну плату працівників, зайнятих на обслуговуванні машин і механізмів;
- вартість експлуатації машин і механізмів;
- вартість матеріалів, виробів і конструкцій;
- вартість обладнання і запасних частин, транспортні витрати.

Заробітна плата ремонтного персоналу і працівників, зайнятих на обслуговуванні машин і механізмів, розраховується за формулою:

$$ЗП_{пв} = T_{пв} \cdot V_i, \quad (6.2)$$

де $ЗП_{пв}$ – заробітна плата робітників–ремонтників і робітників, зайнятих на керуванні та обслуговуванні машин і механізмів, грн.;

$T_{пв}$ – нормативно–розрахункова трудомісткість робіт, що передбачається в прямих витратах, люд.-год.;

V_i – поточна вартість людино–години і-го розряду робітників–ремонтників, грн.

Кошторисна вартість експлуатації машин і механізмів, зайнятих на виконанні ремонтних робіт, в прямих витратах визначається, виходячи з нормативного часу їх роботи, необхідного для виконання встановленого обсягу ремонтних робіт, та вартості експлуатації машин і механізмів за одиницю часу їх застосування (машино–година) у поточних цінах. Заробітна плата робітників, зайнятих на керуванні та обслуговуванні машин і механізмів, зазначається у вартості експлуатації машин і механізмів.

Найменування та час роботи машин і механізмів визначається на підставі обґрунтованої технології виконання робіт та погоджується із замовником.

Вартість машино–години власних машин підрядника в поточних цінах розраховується на підставі норм витрат трудових і матеріальних ресурсів, наведених в ДБН Д.2.7 та поточних цін на них з додаванням амортизаційних відрахувань на повне відновлення машин і механізмів, вартості матеріальних

ресурсів на заміну частин, що швидко спрацьовуються, витрат на ремонт та технічне обслуговування, перебазування та податки, передбачені чинним законодавством, або на підставі калькуляції затвердженою в установленім порядку.

При проведенні ремонтів із залученням бюджетних коштів або коштів підприємств, установ і організацій державної власності вартість машино–години приймається в межах, рекомендованих ДБН Д.2.7.

Вартість матеріалів, виробів і конструкцій (з урахуванням заготівельно–складських та транспортних витрат із доставки на приоб'єктний склад (майданчик)) визначається на підставі потреби в них, розрахованої виходячи з обсягів робіт, передбачених відомістю дефектів, складеною у відповідності до специфікацій і робочих креслень, та відповідних поточних цін.

Поточні ціни на матеріали для ремонту визначаються за ціною франко–приоб'єктний склад ремонтного майданчика і на встановлену одиницю виміру враховують такі елементи вартості:

- відпускну ціну;
- вартість тари, упаковки і реквізиту;
- вартість транспортування і вантажно–розвантажувальних робіт;
- заготівельно–складські витрати.

Вартість витрат на транспортування визначається у відповідності до ДСТУ–Н Б Д.1.1–9.

У складі вартості матеріальних ресурсів враховуються заготівельно–складські витрати, які розраховуються за відсотковими показниками:

- для матеріалів, виробів і конструкцій (крім металевих) – 2%;
- для металевих конструкцій – 0,75%.

Поточні ціни на матеріали, вироби, конструкції та обладнання при проведенні ремонтів із залученням бюджетних коштів або коштів підприємств, установ і організацій державної власності приймаються за вихідними даними підрядної організації, узгодженими замовником, але не можуть перевищувати

середніх цін регіону.

Якщо відпускні ціни на матеріальні ресурси не враховують доставку на приоб'єктний склад, при визначенні вартості матеріалів, виробів і конструкцій додатково враховуються витрати на це (в одиничній вартості матеріалів).

Витрати на доставку матеріальних ресурсів обчислюються або калькуляційним методом, або за усередненими показниками вартості транспортних витрат на 1 т відповідного вантажу за середньою відстанню перевезень, що надаються ДСТУ-Н Б Д.1.1-9.

Кошторисна вартість обладнання і запасних частин визначається як сума всіх витрат на придбання і доставку цього обладнання на приоб'єктний склад або місце його монтажу.

Складовими кошторисної вартості обладнання є:

- відпускні ціни;
- вартість запасних частин;
- вартість тари, упаковки і реквізиту;
- транспортні витрати;
- витрати на комплектацію;
- заготівельно–складські витрати.

Якщо відпускні ціни на обладнання не враховують будь-які з складових, перелічених у 6.6.4.1 то у разі їх виникнення, витрати враховуються додатково з обґрунтуванням. Ці витрати обчислюються або калькуляційним методом, або за усередненими показниками, що надаються ДБН Д.1.1-1.

7.2 Загальновиробничі витрати включають:

- заробітну плату працівників, заробітна плата яких враховується в загальновиробничих витратах;

- відрахування на єдиний внесок на загальнообов'язкове державне соціальне страхування відповідно законодавства;
- решту статей загальновиробничих витрат.

Положення цього підрозділу встановлюють основні правила визначення загальновиробничих витрат і застосовуються при визначенні вартості ремонтів і не залежать від відомчої належності підприємства.

Для розрахунку *загальновиробничих* витрат статті витрат групуються в три блоки:

I блок – заробітна плата працівників: апарату відокремлених структурних підрозділів (керівників, спеціалістів, службовців), старших виконробів (начальників дільниць), виконробів, майстрів, механіків ремонтних дільниць, тих, котрі здійснюють господарське обслуговування дільниць;

II блок – відрахування на єдиний внесок на загальнообов'язкове державне соціальне страхування (далі — єдиний внесок) страхувальниками, визначеними Законом України „Про збір та облік єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування” (відрахування від коштів на оплату праці робітників, зайнятих на ремонтних роботах обладнання, робітників, зайнятих на керуванні і обслуговуванні будівельних машин і механізмів, і працівників, заробітна плата яких враховується в загальновиробничих витратах).

III блок – решта статей загальновиробничих витрат.

Заробітна плата працівників, яка передбачається в загальновиробничих витратах (I блок) розраховується виходячи з трудовитрат цих працівників і відповідної вартості людино–години.

Трудовитрати працівників, заробітна плата яких передбачається в загальновиробничих витратах, визначаються за формулою:

$$T_{зв} = T_{пв} \cdot K_{зв}, \quad (6.3)$$

де $T_{зв}$ – трудовитрати працівників, заробітна плата яких враховується в загальновиробничих витратах, люд.-год.;

Т_{пв} – нормативно–розрахункова трудомісткість робіт, що передбачається в прямих витратах;

К_{зв} – усереднений коефіцієнт переходу від нормативно–розрахункової трудомісткості робіт, що передбачається в прямих витратах, до трудовитрат працівників, заробітна плата яких враховується в загальновиробничих витратах.

Усереднений коефіцієнт переходу від нормативно–розрахункової трудомісткості робіт, що передбачається в прямих витратах, до трудовитрат працівників, заробітна плата яких передбачається в загальновиробничих витратах, приймається в розмірах, рекомендованих Міненерговугілля України.

При визначенні заробітної плати працівників, заробітна плата яких враховується в загальновиробничих витратах, вартість людино–години приймається в розмірі, рекомендованому Міненерговугілля України за сьомим нормативним розрядом на виконання робіт:

$$ЗП_{зв} = Т_{зв} \cdot В_7, \quad (6.4)$$

де $ЗП_{зв}$ – заробітна плата працівників, яка передбачається в загальновиробничих витратах, грн.;

$Т_{зв}$ – трудовитрати працівників, заробітна плата яких враховується в загальновиробничих витратах, люд.-год.;

$В_7$ – поточна вартість 7-го розряду робітників–ремонтників, грн.

При виконанні ремонтних робіт у важких і шкідливих умовах праці, в особливо важких і особливо шкідливих умовах праці вартість людино-години робітників–ремонтників *7-го нормативного розряду* визначається з урахуванням коефіцієнтів.

Розмір єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування (II блок) встановлюється відповідно до Закону України для платників, зазначених у підпункті 5 статті 8 розділу III „Про збір та облік єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування” і кошторисної

заробітної плати.

Кошторисна заробітна плата визначається як сума заробітної плати:

- робітників–ремонтників і робітників, зайнятих на керуванні та обслуговуванні машин і механізмів;
- працівників, заробітна плата яких враховується в загальновиробничих витратах.

Кошторисна заробітна плата розраховується за формулою:

$$ЗП = ЗП_{пв} + ЗП_{зв}, \quad (6.5)$$

де $ЗП$ – кошторисна заробітна плата, грн.;

$ЗП_{пв}$ – заробітна плата робітників–ремонтників і робітників, зайнятих на керуванні та обслуговуванні машин і механізмів, грн.;

$ЗП_{зв}$ – заробітна плата працівників, яка передбачається в загальновиробничих витратах, грн.

Кошти на відрахування на єдиний внесок на загальнообов’язкове державне соціальне страхування, розраховуються за формулою:

$$К_{соц} = ЗП \cdot П_{соц}, \quad (6.6)$$

де $К_{соц}$ – кошти на відрахування на єдиний внесок на загальнообов’язкове державне соціальне страхування, грн.

$ЗП$ – кошторисна заробітна плата, грн.;

$П_{соц}$ – єдиний внесок на загальнообов’язкове державне соціальне страхування, %.

Кошти на покриття решти статей (III блок) загальновиробничих витрат розраховуються виходячи з нормативно–розрахункової трудомісткості робіт, передбачених у прямих витратах, і усереднених показників для визначення коштів на покриття решти статей загальновиробничих витрат, обчислених у грошовому еквіваленті на людино-годину зазначеної трудомісткості.

Ці показники надаються Міненерговугілля України.

Кошти на покриття решти статей загальновиробничих витрат визначаються за формулою:

$$K_{рзв} = T_{пв} \cdot П_{рзв}, \quad (6.7)$$

- де $K_{рзв}$ – кошти на покриття решти статей загальновиробничих витрат, грн.;
- $T_{пв}$ – нормативно–розрахункова трудомісткість робіт, що передбачається в прямих витратах, люд.-год.;
- $П_{рзв}$ – показник для визначення коштів на покриття решти статей загальновиробничих витрат, грн./люд.–год.

Усереднені показники, що рекомендуються Міненерговугілля України для визначення трудовитрат працівників, кошти на заробітну плату яких враховуються в загальновиробничих витратах, і коштів на покриття решти статей загальновиробничих витрат, призначені для здійснення ремонту обладнання підрядним способом.

При виконанні ремонтних робіт обладнання, до складу якого входять об'єкти (види робіт) різного призначення, загальновиробничі витрати (І та ІІІ блоки) розраховуються, виходячи з виду конкретного об'єкта (виду робіт).

Адміністративні витрати спрямовані на обслуговування та управління ремонтної організації, що не включаються до собівартості ремонтних робіт. Зазначені витрати включаються до вартості цих робіт пропорційно базі розподілу, яка обирається підприємством самостійно (собівартість відповідного об'єкта витрат, прямі витрати).

Кошти на покриття адміністративних витрат призначені на відшкодування розрахункової частки адміністративних витрат, що відноситься у визначеному обсязі на виконуваних ремонтні роботи.

Правила визначення адміністративних витрат застосовуються при визначенні вартості ремонтів і не залежать від відомчої належності підприємства.

У кошторисній документації розмір адміністративних витрат ремонтних підприємств приймається з урахуванням рекомендованих Міненерговугілля

України усереднених показників, виражених у грошовому еквіваленті в розрахунку на одну людину–годину загальної кошторисної трудомісткості (додаток В), визначається за формулою:

$$K_{\text{адм}} = T_{\text{к}} \cdot P_{\text{адм}}, \quad (6.8)$$

де $K_{\text{адм}}$ – адміністративні витрати, грн.;

$T_{\text{к}}$ – загальна кошторисна трудомісткість, люд.-год.;

$P_{\text{адм}}$ – показник для визначення розміру адміністративних витрат, грн./люд.–год.

При виконанні ремонтних робіт обладнання, до складу якого входять об'єкти різного призначення, показник для визначення розміру адміністративних витрат не залежить від об'єкту призначення.

Кошторисний прибуток в кошторисній документації враховується при здійсненні ремонту підрядним способом в обов'язковому порядку.

Розмір кошторисного прибутку приймається в межах усередненого показника рекомендованого Міненерговугілля України, який становить *2,92 грн.* на людину-годину загальної кошторисної трудомісткості, і визначається за формулою:

$$K_{\text{приб}} = T_{\text{к}} \cdot P_{\text{приб}}, \quad (6.9)$$

де $K_{\text{приб}}$ – кошторисний прибуток, грн.;

$T_{\text{к}}$ – загальна кошторисна трудомісткість, люд.-год.;

$P_{\text{приб}}$ – показник для визначення розміру кошторисного прибутку, грн.

При виконанні ремонтних робіт обладнання, до складу якого входять об'єкти різного призначення, показник для визначення розміру кошторисного прибутку не залежить від об'єкту призначення.

Супутні витрати включають:

– *витрати на відрядження* ремонтного персоналу, які визначаються, виходячи з визначених в установленому порядку термінів та чисельності

ремонтного персоналу, що знаходиться у відрядженні, відповідно до чинних нормативних документів;

– **витрати на перевезення робітників** ремонтної організації автомобільним транспортом, які враховуються у випадках, коли місце дислокації ремонтної організації (пункт збору) знаходиться на відстані більше ніж 3 км від місця роботи, а комунальний або приміський транспорт відсутній або не забезпечує перевезення працівників на об'єкт у зазначений час, обчислюються калькуляційним методом; порядок включення до кошторису та взаєморозрахунків обумовлюється контрактом;

– **витрати на доставку обладнання та механізмів**, вартість експлуатації яких враховується в прямих витратах.

Виготовлення та ремонт запасних частин, вузлів, конструктивних елементів енергетичного обладнання в умовах ремонтної бази (заводу) визначається калькуляційним методом з наданням відповідних розрахунків статей калькуляції.

В залежності від технічної і технологічної складності ремонтних робіт може виникнути необхідність **здійснення шеф-нагляду** за виконанням ремонтних робіт, ці витрати в кошторис включаються додатково. Витрати на здійснення шеф-нагляду обчислюються калькуляційним методом.

До кошторису вартості ремонту включаються встановлені чинним законодавством **податки, збори, обов'язкові платежі**, не враховані складовими вартості ремонту. Розмір цих витрат визначається виходячи із норм і бази для їх нарахування, встановлених законодавством.

Нормативні показники визначення вартості ремонту енергетичного обладнання (усереднені показники вартості розряду виконавців ремонту основного і допоміжного енергетичного обладнання, усереднені коефіцієнти переходу від нормативно-розрахункової трудомісткості робіт, які передбачаються у прямих витратах до трудовитрат працівників, заробітна плата яких враховується у загальновиробничих витратах, усереднені показники для визначення коштів на покриття решти статей загальновиробничих витрат, усереднені показники для визначення розміру адміністративних витрат) корегуються при зміні впливу економічних чинників на вартість ремонту обладнання.

РОЗРАХУНОК

показників загальновиробничих витрат (ЗВВ) в складі договірної ціни на виконання робіт в 2019 році за фактичними результатами діяльності ремонтного підприємства в 2018 році.

| Ч. ч. | Показники | Од. виміру | показники ремонтного підприємства на 2018 р. | Нормативи на 2019 рік | Примітка |
|-------|--|------------|--|-----------------------|--|
| 1 | <u>Фактична трудомісткість ремонту обладнання в 2018 році</u> (п.1.1.1. • п.1.2.) | люд./ год. | 79840,00 | 90045,00 | По даних обліку робочого часу |
| 1.1 | <u>Фактична заробітна плата (ЗП) робітників основного виробництва за 2018р.</u> Розрахункова на 2019 рік (п.1. • тариф середнього розряду робіт за роботами п.1.4.) | грн. | 2850500,00 | 1962981,00 | <u>Фактично згідно даних бух. обліку робочого часу</u> По розрахунку |
| 1.1.1 | <u>Кількість робітників основного виробництва</u> (по даних штатного розкладу та обліку чисельності на підприємстві) | люд. | 40 | 45 | По даних штатного розкладу та обліку чисельності на підприємстві |
| 1.1.2 | Середній розряд робіт з ремонту обладнання | | 4,5 | 4,5 | |
| 1.2 | <u>Норматив робочого часу в 2018</u> 2019 році (по даних Мінекономіки) | год. | 1996,00 | 2001,00 | <u>Норматив робочого часу в 2018</u> 2019 році (по даних Мінекономіки) |
| 1.3 | <u>Середньомісячна заробітна плата одного робітника</u> (п.1.1. / п.1.1.1. / 12 міс.) | грн. | 5938,54 | 3635,15 | По розрахунку |
| 1.4 | Усереднена погодинна тарифна ставка одного робітника на 2018р. (п.1.3. / 166,33, де 166,33- середня місячна норма тривалості робочого часу) на 2019 рік – за нормативами середній розряд робіт - 4,5 (згідно Порядку**, додаток Б) | грн. | 35,70 | 21,80 | <u>По розрахунку</u> Норматив згідно Порядку (додаток Б), тариф розряду 4.5 - 21,8 грн. |
| 2 | <u>Фактична трудомісткість лінійного персоналу, ЗП якого враховується в ЗВВ за 2018</u> | люд./ год. | 27944,00 | 30015,00 | Фактичні дані згідно обліку робочого часу По розрахунку |

| | | | | | |
|-----------|---|------|-----------------------|-----------------------|---|
| | Розрахункова на 2019 р. (п.2.1.1. • п.1.2.) | | | | |
| 2.1 | <u>ЗП за 2018 рік лінійного персоналу, витрати на оплату праці якого враховуються в ЗВВ</u> на 2019 рік - за розрахунком (п.2. • п.2.2.) | грн. | 11972 00,00 | 83381 6,70 | <u>Фактичні дані згідно бухгалтерського обліку</u> По розрахунку згідно п. 5.6.2.2.2 Порядку |
| 2.1 .1 | <u>Кількість лінійного персоналу</u> (по даних штатного розкладу та обліку чисельності на підприємстві) | люд. | 14 | 15 | По даних штатного розкладу та обліку чисельності на підприємстві |
| 2.2 | <u>Усереднена вартість люд/год. працівників, ЗП яких враховується в ЗВВ, за 2018 р.</u> на 2019 рік за нормативами - тариф 7 розряду (згідно Порядку, додаток Б) | грн. | 42,84 | 27,78 | <u>Фактично –по розрахунку</u> Норматив згідно Порядку (додаток Б), тариф 7р - 27,78 грн. |
| 3 | Фактична величина решти статей загальновиробничих витрат за 2018 рік за виключенням витрат на оплату праці та відрахувань на соціальні заходи | грн. | 15480 0,00 | 15980 0,00 | Фактичні дані згідно бухгалтерського обліку |

| Ч.ч. | Показники | Од. виміру | 2018 р. | розрахунок на 2019 р. | Примітка |
|--|--|----------------|--------------|-----------------------|---|
| I блок загальновиробничих витрат: | | | | | |
| 4 | Усереднений коефіцієнт переходу від нормативно-по розрахунку ї трудомісткості робіт, що передбачені в прямих витратах до трудовитрат працівників, заробітна плата яких враховується в загальновиробничих витратах По розрахунку | | 0,350 | 0,333 | Нормативний коефіцієнт згідно додатку В до Порядку поз.1: Норми часу на ремонт та технічне обслуговування основного та допоміжного обладнання АЕС з реакторами ВВЕР-1000. ч. 1. Ремонт <u>реактора ВВЕР-1000</u> По розрахунку |
| III блок загальновиробничих витрат: | | | | | |
| 5 | Усереднений показник для визначення коштів на покриття решти статей <u>загальновиробничих витрат</u> По розрахунку | грн./люд.-год. | 2,000 | 1,775 | Нормативний показник згідно додатку В до Порядку поз. 1: Норми часу на ремонт та технічне обслуговування основного та допоміжного обладнання АЕС з реакторами ВВЕР-1000. ч. 1. Ремонт <u>реактора ВВЕР-1000</u> По розрахунку |

I блок. Коефіцієнт (Кзв) переходу від трудомісткості робіт, передбачуваних у прямих витратах, до трудовитрат працівників, кошти на оплату праці яких враховуються в загальновиробничих витратах:

$$\text{Кзв} = y / a = 15 / 45 = 0,333$$

де: у - чисельність лінійного персоналу за штатним розкладом - 15 люд.

а - чисельність робітників за штатним розкладом - 45 люд.

III блок. Показник (Прзв) для визначення коштів на покриття решти статей загальновиробничих витрат:

$$\text{Прзв} = \text{Крзв} / \text{Тр} = 159800 / 90045 = 1,775 \text{ грн./люд.-год.}$$

Крзв – фактична величина коштів на покриття решти статей загальновиробничих витрат (п.3 гр. 5) 159800,00 грн.

Тр - нормативно-розрахункова трудомісткість виконаних за 2019 рік ремонтних робіт, вартість яких врахована у прямих витратах 90045,00 люд.-год.

7 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

7.1 Задачі розділу

Сформулюємо основні задачі щодо охорони праці за темою МКР:

1. Провести аналіз умов праці при виконанні робіт, пов'язаних з обслуговуванням маслонаповненого підстанції.
2. Дослідити технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта.
3. Провести розрахунок кількості та опору заземлюючих електродів і напруги кроку.
4. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.

7.2 Аналіз умов праці при виконанні робіт, пов'язаних з обслуговуванням маслонаповненого підстанції

На електротехнічний персонал служби ізоляції, який здійснює діагностування стану ізоляції трансформаторів тягової підстанції, впливають за ГОСТ 12.0.003-74 такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

а) фізичні:

- підвищена та знижена температура повітря робочої зони;
- підвищена та знижена рухомість повітря;
- рухомі машини і механізми, незахищені рухомі елементи виробничого обладнання;
- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена та знижена вологість повітря у робочій зоні;
- недостатність природного освітлення;

- недостатня освітленість робочої зони;
 - підвищений рівень шуму на робочому місці;
 - небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання якого може відбутись через тіло людини;
 - підвищений рівень вібрації,
- в) психофізіологічні:
- фізичні перевантаження (динамічні)
 - нервово-психічні перевантаження (монотонність праці, перенапруга аналізаторів).

7.3 Технічні рішення з безпечної експлуатації маслонаповненого обладнання

До робіт на маслонаповненому обладнанні допускаються особи, які мають відповідну групу з електробезпеки, які вивчили будову та принцип дії регенераційної установки і здали залік. Трансформаторне масло є не тільки легко займистою, але і отруйною рідиною. Тому працівники, пов'язані з обслуговуванням маслонаповненого обладнання, мають право на отримання спецхарчування.

Після відключення масляним вимикачем струму КЗ ні в якому разі не можна запалювати сірники або входити з відкритим вогнем в камеру вимикача, так як там може утворитися вибухова суміш.

При експлуатації регенераційних установок, що працюють за схемою «кислота-земля», слід вживати заходів обережності щодо поводження з сірчаною кислотою.

Очищення масла під напругою повинна застосовуватися лише в разі неможливості зняття напруги з апарату або в разі, якщо відключення трансформатора буде пов'язано з невідпуском електроенергії споживачам. До очистки масла під напругою може бути допущений лише персонал, повністю

освоїв методику очищення масла із застосуванням адсорберів або центрифуги, після перевірки знань відповідних інструкцій і правил безпеки.

Очищення масла під напругою може проводитися на відкритих підстанціях напругою 35 кВ і вище, причому кількість залитого в трансформатор масла повинно бути не менше 500 кг. Крім того, ємність розширювача трансформатора повинна бути такою, щоб після включення адсорбційної установки рівень масла в розширювачі не знизиться по відношенню до верхньої позначки початкового рівня більше ніж на 1/2.

Для виключення розтікання пролитого масла і забезпечення пожежної безпеки під обладнанням (трансформатором або установкою) влаштовують гравійну засипку для збору і регенерації масла.

При роботі персоналу з трансформаторним маслом звичайна спецодяг швидко просочується маслом, може викликати роздратування шкіри і легко загорається. Тому персоналу, який обслуговує Маслонаповнене обладнання, необхідно або надягати захисний одяг, що має покриття з капронової пластика, або використовувати спецодяг з просоченням розчином діамонійфосфат.

Для роботи всередині високовольтного обладнання в масляному господарстві повинен бути комплект одягу з захисне професійного покриттям, гумові маслостійкі рукавички і засоби захисту органів дихання (протигаз або респіратор).

При роботі на установці типу ПСМ2-4 необхідно строго стежити за правильністю складання барабана сепаратора для того чи іншого способу очищення, а також за ретельністю установки тарілок барабана.

Забороняється працювати на регенераційних установках при появі постійного шуму, що виникає при роботі установки.

З огляду на складності роботи з маслом, в деяких випадках краще застосовувати сухі трансформатори типу ТСЗ, що випускаються по розробці НШЕФА-ЕНЕРГО. Оптимізована геометрії муздраттеатру призвело до зниження

нагрівання вузлів на 20%, що збільшило надійність і термін служби трансформатора і, крім того, значно знизило пожежонебезпеку (в 10-15 разів). Порівняно невелика потужність виготовлених трансформаторів (від 100 до 3150 кВ·А) дозволяє використовувати їх на тягових підстанціях як трансформатори власних потреб.

7.4. Розрахунок кількості та опору заземлюючих електродів і напруги кроку.

Заземлення заземлюючого контуру виконане через круглий заземлюючий електрод діаметром 25мм, довжиною 300мм. Через заземлювач в наслідок електричного замикання в землю почав протікати електричний струм I . Для більшого спрощення припустимо, що ґрунт однорідний, тобто в будь-якій точці має однаковий питомий опір ρ , Ом·м.

Дано: $I_{\text{зам}}=20$ А; $x_{1c}=2$ м; $x_{2c}=7$ м; $x_{3c}=10$ м; $\rho=2000$ Ом·м;

Вид ґрунту – чорнозем; $r=0,7$ м.

Розв'язання

$$U_{\kappa} = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot x^2}$$

Напруга на відстані 1,2,3 кроки від заземлюючого електроду:

$$U_{\kappa 1} = \frac{20 \cdot 2000}{2 \cdot 3,14 \cdot 4} = 1592 \text{ В / м}$$

$$U_{\kappa 2} = \frac{20 \cdot 2000}{2 \cdot 3,14 \cdot 16} = 398,09 \text{ В / м}$$

$$U_{\kappa 3} = \frac{20 \cdot 2000}{2 \cdot 3,14 \cdot 64} = 99,5 \text{ В / м}$$

Розрахунок заземлюючого пристрою.

Дано: $d_B=40$ мм; $L_B=3,0$ м; $a=3,0$ м; $H_0=0,8$; $R_{\text{доп}}=3$ Ом; $R_{\text{п.з.}}=14$ Ом; $B_c=40 \times 4$ мм; ґрунт чорнозем, кліматична зона III

Розв'язок

$$\eta_r = \frac{a}{1} = \frac{3.0}{3.0} = 1$$

Згідно ПУЕ $R_g \leq 4$ Ом

$$\rho_{\text{табл}} = 100 \text{ Ом}, K_c = 1,3$$

$$\rho_{\text{розр}} = \rho_{\text{табл}} \cdot K_c = 100 \cdot 1,3 = 130 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$H = H_0 + \frac{L_B}{2} = 0,8 + \frac{3,0}{2} = 2,3 \text{ м}$$

$$d_{\text{екв}} = 0,95 \cdot 0,035 = 0,33 \text{ м}$$

$$R_B = \frac{\rho_{\text{розр}}}{2 \cdot \pi \cdot L_B} \left(\ln \frac{2 \cdot L_B}{d_{\text{екв}}} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot H + L_B}{4 \cdot H - L_B} \right) = \frac{130}{2 \cdot \pi \cdot 3,0} \left(\ln \frac{2 \cdot 3,0}{0,33} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,3 + 3,0}{4 \cdot 2,3 - 3,0} \right) = 22,329$$

$$R_D = 4 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{III}} = \frac{R_D \cdot R_{\text{п.з.}}}{R_{\text{п.з.}} - R_D} = \frac{4 \cdot 14}{14 - 4} = 5,6 \text{ Ом}$$

При $\eta_B = 1$

$$\eta_{\text{оп}} = \frac{R_B}{R_{\text{III}} \cdot \eta_B} = \frac{22,329}{5,6 \cdot 1} = 3,987 \approx 4 \text{ шт}$$

При $\eta_B = 0,66$

$$\eta_B = \frac{\eta_{\text{оп}}}{n} = 4 / 0,66 = 6 \text{ шт}$$

$$R_{\text{розрВ}} = \frac{R_{\text{В}}}{n \cdot \eta_{\text{В}}} = \frac{22,329}{6 \cdot 0,66} = 4,87 \text{ Ом}$$

$$L_{\text{С}} = 1,05 \cdot a \cdot n = 1,05 \cdot 3 \cdot 6 = 18,9 \text{ м}$$

$$R_{\text{Г}} = \frac{\rho_{\text{розр}}}{2 \cdot \pi \cdot L_{\text{С}}} \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot L_{\text{С}}^2}{H_0 \cdot B_{\text{С}}} = \frac{130}{2 \cdot \pi \cdot 18,9} \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot 18,9^2}{0,8 \cdot 0,04} = 12,162 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{грозр}} = \frac{R_{\text{Г}}}{0,40} = 12,162 / 0,40 = 30,406 \text{ Ом}$$

$$a / l = 1 \quad \eta_{\text{В}} = 6 \rightarrow \eta_{\text{Г}} = 0,4$$

$$R_{\text{грозр}} = \frac{R_{\text{розрВ}} \cdot R_{\text{розрГ}}}{R_{\text{розрВ}} + R_{\text{розрГ}}} = \frac{4,87 \cdot 30,406}{4,87 + 30,406} = 4,197 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{заг}} = \frac{R_{\text{п.з.}} \cdot R_{\text{розр}}}{R_{\text{п.з.}} + R_{\text{розр}}} = \frac{14 \cdot 4,197}{14 + 4,197} = 3,229 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{заг}} > R_{\text{доп}}$$

7.5. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.

Зняття з проводів ПЛ сторонніх предметів, дерев, які впали, сучків тощо, а також невідкладні роботи по усуненню полумок, які загрожують чи привели до порушення нормальної роботи електроустановок або електропостачання споживачів, тривалістю не більше однієї години, дозволяється виконувати по розпорядженню під наглядом чергового чи особи з числа оперативно-ремонтного персоналу. Кількість працюючих не повинна перевищувати трьох чоловік, включаючи працівника, який здійснює нагляд. Старша особа з чергового або оперативно-ремонтного персоналу, що виконує роботу чи здійснює нагляд, повинна мати групу 4 - при роботах в електромережах вище 1000 В і групу 3 - в електромережах до 1000 В. Всі інші члени бригади повинні мати групу 3. До роботи на приєднаннях, які живлять споживача, може бути задіяний персонал споживача.

Перед роботою повинні бути виконані всі технічні заходи по приготуванню робочого місця, крім його загородження у ВРУ канатом чи шнуром, яке в даному випадку не є обов'язковим.

При виявленні дефектів в електроустановках (іскріння, перегрів контактів, пошкодження ізоляції проводів, кабеля тощо) необхідно повідомити майстру (диспетчеру).

При виявленні обірваного і лежачого на землі або звисаючого невисоко над поверхнею землі провода діючої електромережі, необхідно організувати охорону цього місця для запобігання можливому наближенню до нього людей і тварин або встановити, при можливості, попереджувальні знаки і плакати і повідомити про це черговому диспетчеру ЕМ.

При замиканні на землю в електромережах 6-35 кВ наближатися до виявленого місця замикання ближче 4 м в ЗРУ і 8 м у ВРУ і на ПЛ можна тільки для здійснення оперативних переключень та звільнення людей, які потрапили під напругу. При цьому слід користуватися електрозахисними засобами (діелектричними калошами, ботами, рукавицями, ізолюючими штангами тощо).

Слід пам'ятати, що після зникнення напруги в електроустановці, вона може бути подана без попередження.

7.6. Висновок

В частині з охорони праці наведені технічні рішення з безпечної експлуатації маслonaповненого обладнання. Крім того розглянуті вимоги безпеки при аварійних ситуаціях

Також проведені розрахунки кількості заземлюючих електродів та їх опору та розрахунки крокової напруги.

Висновки

Таким чином, для профілактики ізоляції маслonaповненого обладнання, проаналізовано ефективність традиційних і нових методів і засобів, що дозволило дійти таких висновків:

1. В маслonaповнених трансформаторах вирішальним є стан масла, тому контроль головної ізоляції трансформаторів починається з контролю показників якості масла і порівняння результатів з гранично допустимими значеннями.
2. Найважливішим показником вимірювання для контролю ізоляції є величина $\text{tg}\delta$.
3. Для маслonaповнених трансформаторів іонізаційні криві $\text{tg}\delta = f(U)$ - дають цінну інформацію про природу пошкоджень. Залежність $\text{tg}\delta = f(U)$ ізоляції визначається за напруги від 0 до $1,5 U_n$.
4. Ємність головної ізоляції складає декілька сотень [пФ]. Пошкодження викликає помітну зміну ємності обмотки, але для вимірювання цих змін необхідна дуже висока чуттєвість, яку практично забезпечити складно внаслідок великих впливів паразитичних ємностей. Ось чому вимірювання ємнісних характеристик з метою контролю головної ізоляції трансформаторів є додатковим.
5. Дослідження характеристик часткових розрядів є ефективним діагностичним методом для трансформаторів.
6. З метою підвищення стійкості масла в умовах іонізації в складі масла повинна бути оптимальна кількість ($\approx 15\%$) ароматичних вуглеводнів, які можуть взаємодіяти з (H_2) воднем в момент його виділення із вуглеводневих молекул.
7. Застосування аналізу ХАРГ в маслі ефективно тому, що тверді продукти розкладання ізоляції трансформаторів осідають в зоні дефекту (перегріву), а рідкі газоподібні розчиняються в маслі.

Комплексна оцінка вищенаведених методів профілактики дає ефективний результат.

Література

1. Лежнюк П.Д., Лагутін В.М., Кравцов К.І. Проектування електричної частини електричних станцій. Навч.посібник.- Вінниця: ВДТУ,2002.- 167с.
2. Собчук В.С. Конспект лекцій по курсу "Изоляция и перенапряжения в электрических системах. Координация изоляции электрических систем." Винница: ВПИ, 1991.-24с.- На укр.яз.
3. Леонтьев В.О., Собчук В.С. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з технології електротехнічних матеріалів для студентів ФЕТЕ всіх форм навчання. Вінниця: ВПІ, 1992,-50с.
4. Собчук В.С., Лук'яненко Ю.В., Леонтьев В.О. Методичні вказівки і контрольні завдання з дисципліни "Техніка високих напруг." Вінниця: ВДТУ,1998.- 19с. Укр. мовою/.
5. Собчук В.С. Методичні вказівки і контрольні завдання з дисципліни "Технологія робіт під напругою." Вінниця: ВДТУ,2001.- 20с. Укр. мовою/.
6. Собчук В.С. Техніка та електрофізика високих напруг. Лабораторний практикум. Вінниця: ВДТУ,2002.- 81с.
7. Собчук В.С. Електроматеріалознавство. Навч. Посібник.- Вінниця: ВДТУ,2002.- 73с.
8. Лабораторные работы по технике высоких напряжений: Учеб. Пособие для вузов/ М.А. Аронов, В.В. Базуткин и др. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоиздат, 1982. - 352 с.
9. Цирель Я. А, Поляков В.С. Эксплуатация силовых трансформаторов на электростанциях и в электросетях.-Ленинград: Энергоатомиздат, 1985.- 75 с.
10. Авдеева А.А Хроматография в энергетике.
11. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов. РД 34.46.302-89. -М.: Союзтехэнерго.-1989.- 27.с.

12. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения.-М.: Энергоатомиздат, 1992.-240с.
13. IEC 60050 (191, 212,604) Міжнародний електротехнічний словник. Перша редакція. Стандарт Міжнародної Електротехнічної Комісії. Женева, Швейцарія, 1990р.
14. IEC 60076-1:1993—03 Трансформатори силові. Частина 1: Загальні положення. Перша редакція. Стандарт Міжнародної Електротехнічної Комісії. Женева, Швейцарія, 1993 р.
15. IEC 60076-2: 1993—03 Трансформатори силові. Частина 2: Нагрівання. Друга редакція. Стандарт Міжнародної Електротехнічної Комісії. Женева, Швейцарія, 1993 р.
16. IEC 60076-3: 1993 — 03 Трансформатори силові. Частина 3: Рівні міцності ізоляції та її випробовування на пробій. Друга редакція. Стандарт Міжнародної Електротехнічної Комісії. Женева, Швейцарія, 1993 р.
17. IEC 60599:1999 Експлуатаційне електрообладнання, заповнене мінеральним маслом — керівний документ по інтерпретації аналізів розчинених та вільних газів. Друга редакція. Стандарт Міжнародної Електротехнічної Комісії. Женева, Швейцарія, 1999 р.
18. IEC 61198:1993 Мінеральні ізоляційні масла — Методи визначення 2-фурфуролу та похідних компонентів. Перша редакція. Стандарт Міжнародної Електротехнічної Комісії. Женева, Швейцарія, 1993 р.
19. Матеріали робочої групи 15/12-01-11 СІ6РЕ «Останні розробки в інтерпретації результатів ХАРГ». «EI_ЕСТРА». Жовтень 1999. №186 90

ДОДАТОК А**Технічне завдання МКР**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій і систем

ЗАТВЕРДЖУЮЗавідувач кафедри ЕССд.т.н., професор Лежнюк П.Д.

(наук. ст., вч. зв., ініц. та прізви.)

(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи

**ДІАГНОСТУВАННЯ ІЗОЛЯЦІЇ МАСЛОНАПОВНЕНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ****08-13.МКР.009.00.005 ТЗ**

Науковий керівник: к.т.н., доц., каф. ЕСС

Собчук Н.В.

(підпис)

Магістр групи ЕСМ-18м

_____ Зарицький Р.Р.

(підпис)

Вінниця 2019 р.

1. Підстава для виконання магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)

а) електроенергетична галузь є базовою галуззю економіки будь-якої держави і від її функціонування залежить практично вся інфраструктура сучасної цивілізації. У зв'язку з цим забезпечення надійності електропостачання споживачів електричною енергією, особливо в умовах суттєвого постаріння парку маслonaповненого обладнання (МНО), є актуальною та практично значущою задачею. Одним зі шляхів її вирішення є як розробка та впровадження нових, так і вдосконалення уже наявних методів діагностики стану МНО;

б) наказ ректора ВНТУ № 254 від 02 жовтня 2019 р. про затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи.

2. Мета і призначення МКР

а) метою даної дипломної роботи є аналіз конструктивних особливостей масла та обладнання яке діагностує стан його ізоляції;

б) призначення розробки – виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

3. Вихідні дані для виконання МКР

Таблиця 1 – Значення відношень газів в обладнанні, в якому виявлені іскрові, повзучі розряди, а також розряди з низькою і високою щільність енергії.

| № | Значення відношення газів | | | | | |
|----|---------------------------------|--|--|--|--|--|
| | CH ₄ /H ₂ | C ₂ H ₆ /CH ₄ | C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆ | C ₂ H ₂ /CH ₄ | C ₂ H ₂ /C ₂ H ₆ | C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄ |
| 1 | 0,02-0,096 | 0,2-10 | 4-16 | 0,003-0,23 | 0,01-0,04 | 0,005-0,05 |
| 2 | 0,02-0,09 | 0,2-0,35 | 4,2-10,3 | 0,25-3,3 | 3,4-9,9 | 0,13-0,96 |
| 3 | 0,12-0,5 | 0,07-1,3 | 1,3-18,6 | 0,002-0,19 | 0,012-0,6 | 0,002-0,099 |
| 4 | 0,1-0,93 | 0,06-1,3 | 1-4,92 | 0,001-4,3 | 0,11-3,73 | 0,1-0,99 |
| 5 | 0,12-0,86 | 0,03-0,35 | 5,2-14,1 | 0,02-3,57 | 0,65-11,5 | 0,1-0,982 |
| 6 | 0,1-0,71 | 0,02-0,87 | 0,12-0,88 | 0,03-1,4 | 0,141-4,14 | 1,05-4,47 |
| 7 | 0,92-0,98 | 0,14-0,63 | 0,06-0,23 | 0,014-0,39 | 0,1-0,63 | 1,1-9,9 |
| 8 | 0,11-0,39 | 0,88-2,22 | 0,11-0,66 | 0,99-5,90 | 0,47-4,13 | 1,8-35,6 |
| 9 | 0,78-0,922 | 2,0-6,14 | 0,49-1,0 | 2,4-11,6 | 1,04-4,65 | 1,33-8,5 |
| 10 | 0,05-0,08 | 0,29-1,47 | 1,0-1,26 | 1,9-2,87 | 1,9-8,2 | 1,8-6,7 |
| 11 | 0,014-0,099 | 0,007-1,03 | 3,4-35,6 | 0,09-30,5 | 5,88-180,6 | 1,361-11,7 |
| 12 | 0,05-0,086 | 0,01-0,08 | 2,75-15,2 | 12,9-44 | 3-161 | 2,8-10,6 |
| 13 | 0,12-0,509 | 0,107-0,68 | 1,0-1,88 | 0,39-4,1 | 2,06-7,29 | 1,1-4,92 |
| 14 | 0,353-0,854 | 0,194-1,45 | 1,0-1,765 | 1,48-4,032 | 2,77-7,64 | 1,78-4,33 |
| 15 | 0,1-0,774 | 0,05-1,25 | 2,8-22 | 0,1-8,2 | 3,1-69,6 | 1,01-12,7 |
| 16 | 0,147-0,66 | 4,8-67,2 | 7,8-104,4 | 103-1020 | 15-167,2 | 1,2-92 |
| 17 | 0,1-0,99 | 0,06-1,4 | 2,0-30,9 | 1,2-32 | 3,4-249,3 | 1,02-18,5 |

Таблиця 2 – Значення концентрацій газів в обладнанні, що пошкоджено дефектами, що розвиваються

| № | Період відбору проб | Концентрації газів, % об. | | | | |
|---|---|---------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | H ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₂ |
| 1 | Трансформатор 250 кВ, гідроелектростанція "Nelson River" Північна Канада, тепловий пробій ізоляції | | | | | |
| | за 10 місяців до пробою | 0,002 | 0,0015 | 0,0052 | 0,0009 | Відсут. |
| | після пробою | 0,162 | 0,414 | 0,6056 | 0,0291 | 0,0968 |
| 2 | Трансформатор 125 кВ, гідроелектростанція "Nelson River" Північна Канада, пробій ізоляції між котушками | | | | | |
| | за 5 днів до пробою | 0,0032 | 0,0042 | 0,0098 | 0,0024 | 0,0001 |
| | після пробою | 0,788 | 0,755 | 0,473 | 0,03 | 0,297 |
| 3 | Реактор РОДЦ 750/110, внутрішнє коротке замикання | | | | | |
| | За 6 місяців до пошкодження | Відсут. | Відсут. | Відсут. | Відсут. | Відсут. |
| | після аварійного відключення | 0,223 | 0,077 | 0 | 0,108 | 0,13 |
| 4 | Автотрансформатор АТДЦТН-125000/220/110, дуговий розряд | | | | | |
| | За два місяці до пошкодження | Відсут. | Відсут. | Відсут. | 0,016 | 0,025 |
| | Після пошкодження | 0,094 | 0,073 | 0,025 | 0,228 | 0,247 |

| | | | | | | |
|----|---|----------|----------|----------|---------|---------|
| 5 | Блоковий трансформатор 320 МВА 220/15,75 стійкий розвинений частковий розряд (амплітудою до 70 тис. пКл) з перекриттям по поверхні твердої ізоляції) і з переходом в пробій | | | | | |
| | За 4 місяці до пошкодження | 0,0045 | 0,003 | 0,0013 | 0,003 | 0,0018 |
| | Після пошкодження | 0,0009 | 0,0062 | 0,0011 | 0,0036 | 0,00267 |
| 6 | Трансформатор ТМН-4000/35, пошкоджений дуговим розрядом | | | | | |
| | за 15 днів до пошкодження | 0,00028 | 0,00417 | 0,00041 | 0,01087 | 0,07652 |
| | Після пошкодження | 0,18855 | 0,01951 | 0,00072 | 0,02247 | 0,24981 |
| 7 | Трансформатор 20 МВА 33/0,6 кВ, пошкоджений дуговим розрядом | | | | | |
| | За 3 місяці до пошкодження | 0,0129 | 0,019 | 0,0362 | 0,0142 | 0,0001 |
| | Після пошкодження | 0,0091 | 0,0033 | 0,0024 | 0,0092 | 0,0134 |
| 8 | Трансформатор ТДТНГ-31500/110, пошкоджений дуговим розрядом | | | | | |
| | За 4 місяці до пошкодження | 0,00239 | 0,00084 | 0,00028 | 0,0013 | Відсут. |
| | Після пошкодження | 0,01726 | 0,00524 | 0,00056 | 0,00543 | 0,0091 |
| 9 | Трансформатор ТДТН-110/35/10, пошкоджений дуговим розрядом | | | | | |
| | За 24 дні до пошкодження | 0,000304 | 0,000395 | 0,000054 | 0,00167 | 0,00391 |
| | Після пошкодження | 0,000546 | 0,000501 | 0,000056 | 0,00193 | 0,00498 |
| 10 | Трансформатор 35 кВ, пошкоджений повзучим розрядом | | | | | |
| | За 3 місяці до пошкодження | 0,00005 | 0,00016 | 0,00048 | 0,00184 | 0,00004 |
| | Після пошкодження | 0,006 | 0,00282 | 0,00065 | 0,00596 | 0,00171 |

4. Технічні вимоги до виконання МКР

- методів неруйнівної діагностики стану маслонаповненого обладнання - аналіз розчинених в маслі газів;

5. Економічні показники

Визначити кошторисну вартість ремонту основного і допоміжного енергетичного обладнання, передавальних пристроїв і споруд атомних електростанцій за однорівневою системою ціноутворення.

6. Етапи МКР та очікувані результати

| № етапу | Назва етапу | Термін виконання | | Очікувані результати |
|---------|--|------------------|----------|---|
| | | початок | кінець | |
| 1 | Вступ | 01.09.19 | 06.09.19 | формування технічного завдання |
| 2 | Основні характеристики часткових розрядів | 07.09.19 | 16.09.19 | аналітичний огляд літературних джерел, задачі досліджень, розділ 1 ПЗ |
| 3 | Технологічна частина борошномельного виробництва | 17.09.19 | 25.10.19 | розділ 2 |
| 4 | Розрахунок ізоляції силових трансформаторів | 26.10.19 | 13.11.19 | розділ 3 |
| 5 | Дослідження газів в маслі на основі пристрою HYDROCAL | 14.11.19 | 16.11.19 | розділ 4 |
| 6 | Особливості вимірів характеристик часткових розрядів у силових трансформаторах | 17.11.19 | 22.11.19 | розділ 5 |
| 7 | Оптимізація ізоляції силових трансформаторів | 23.11.19 | 29.11.19 | розділ 6 |
| 8 | Охорона праці | 30.12.19 | 03.12.19 | розділ 7 |
| 9 | Оформлення пояснювальної записки | 04.12.19 | 06.12.19 | плакати, презентація |

7. Матеріали, що подаються до захисту МКР

Пояснювальна записка МКР, ілюстративні матеріали, протокол попереднього захисту МКР на кафедрі, відгук наукового керівника, відгук опонента, протоколи складання державних іспитів, анотації до МКР українською та іноземною мовами, довідка про відповідність оформлення МКР діючим вимогам.

8. Порядок контролю виконання та захисту МКР

Виконання етапів розрахункової документації МКР контролюється науковим керівником згідно зі встановленими термінами. Захист МКР відбувається на засіданні Державної екзаменаційної комісії, затвердженою наказом ректора.

9. Вимоги до оформлення МКР

Вимоги викладені в «Положенні про кваліфікаційну роботу у Вінницькому національному технічному університеті (БДР (БД), ДП (ДР), МКР)», 2015р.

10. Вимоги щодо технічного захисту інформації в МКР з обмеженим доступом

Відсутні.

Додаток Б

Образи дефектів

Графічні образи різних дефектів було запропоновано для визначення виду дефекту японськими дослідниками. Графічні образи дефектів будуються по концентраціях п'яти газів: H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 . Метод було розроблено на основі практичного досвіду зіставлення фактично виявлених дефектів в трансформаторі при внутрішньому огляді зі складом газів, які були визначені методом ХАРГ. В той же час образи дефектів відображають загальні залежності в співвідношеннях між окремими газами при нагріваннях різної температури чи розрядних явищах.

Порядок побудови графічного образу дефекту.

1. Графічні образи дефектів будуються для силових трансформаторів, що відповідають рівню 2 або 3, а для високовольтних вводів рівню 2, 3 або 4;
2. По результату ХАРГ серед газів H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 вибрати газ, що має найвищу абсолютну концентрацію (мкл/л);
3. Визначити величину відношення кожного газу до газу, що має найвищу концентрацію. Відношення газу з найвищою концентрацією буде дорівнювати 1, відношення всіх останніх газів менше 1.
4. Побудувати графік образу дефекту, на якому по осі абсцис розташувати газу в такій послідовності: H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , а по осі ординат відкласти вираховані відношення для кожного з цих газів. Отримані точки з'єднати лінією.

Приклад побудови графіка образу дефекту.

В результаті проведення ХАРГ були отримані такі концентрації окремих газів (мкл/л):

$$\text{H}_2 = 12, \text{CH}_4 = 458, \text{C}_2\text{H}_6 = 152, \text{C}_2\text{H}_4 = 571, \text{C}_2\text{H}_2 = 0.$$

Газ, що має найбільшу концентрацію – C_2H_4 .

Вираховуємо відношення всіх газів до C_2H_4 :

$$C_2H_4/C_2H_4 = 571/571 = 1,$$

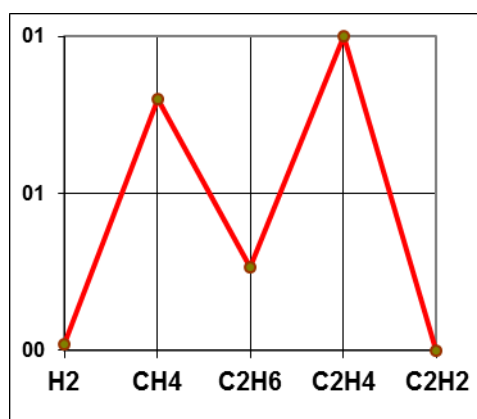
$$H_2/C_2H_4 = 12/571 = 0,02,$$

$$CH_4/C_2H_4 = 458/571 = 0,8,$$

$$C_2H_6/C_2H_4 = 152/571 = 0,27,$$

$$C_2H_2/C_2H_4 = 0/571 = 0.$$

По вирахованим відношенням будуюмо графік образу дефекту

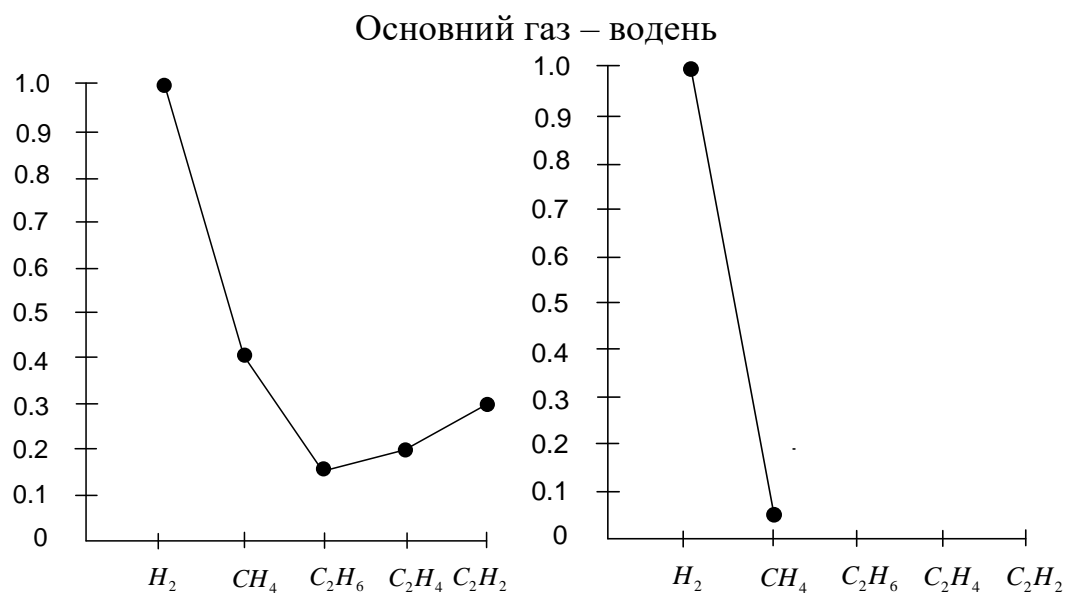


Порівнюючи отриманий образ дефекту з образами відомих дефектів, віднести його до того чи іншого виду. При порівнянні образів враховувати те, який газ має максимальну концентрацію, та співвідношення між окремими газами.

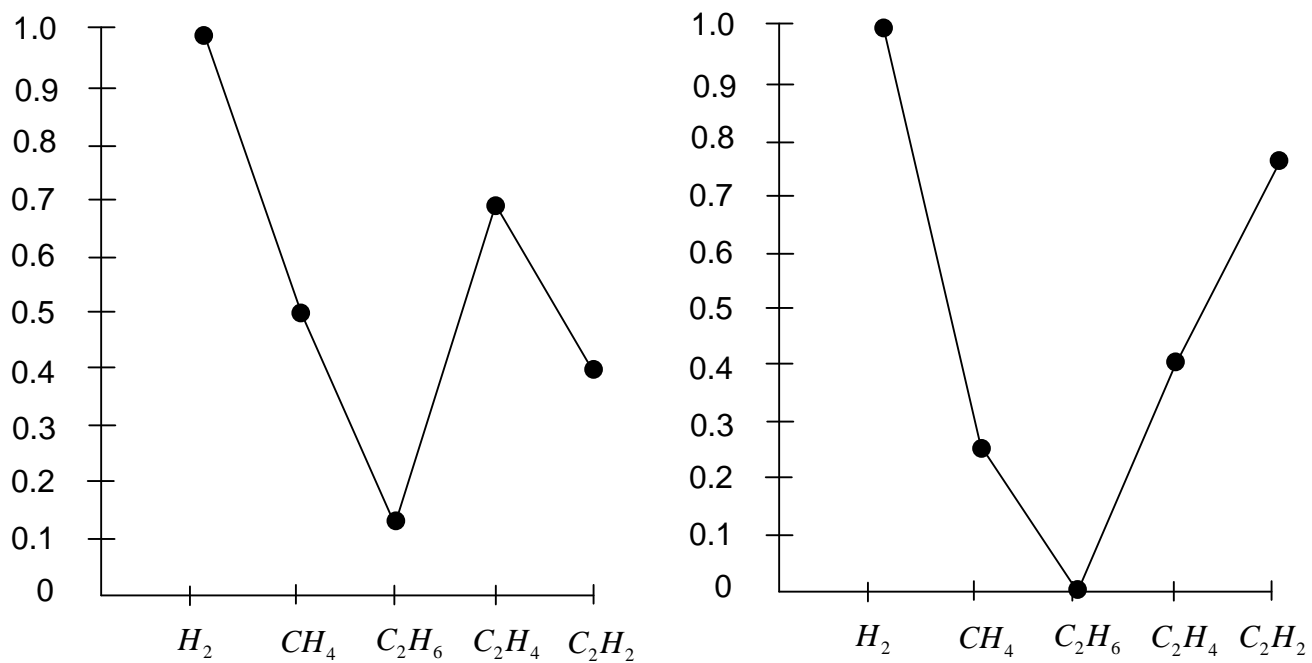
Хімічні назви та позначення газів

| Назва | Позначення |
|--------------|-------------------------------|
| Водень | H ₂ |
| Метан | CH ₄ |
| Етан | C ₂ H ₆ |
| Етилен | C ₂ H ₄ |
| Ацетилен | C ₂ H ₂ |
| Окис вуглецю | CO |

| | |
|-----------------|--------------------------|
| Двоокис вуглецю | CO_2 |
| Кисень | O_2 |
| Азот | N_2 |
| Пропан | C_3H_8 |
| Пропилен | C_3H_6 |
| 1-Бутен | $1-\text{C}_4\text{H}_8$ |

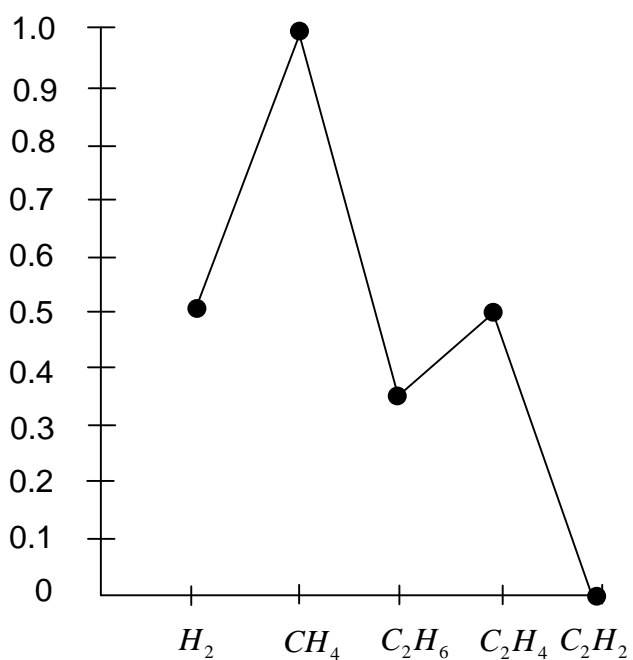


Дефекти, викликані іскрінням або дугою

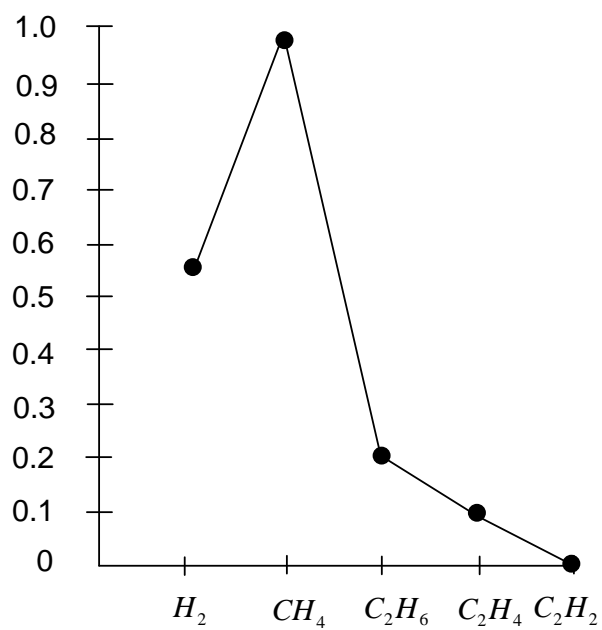
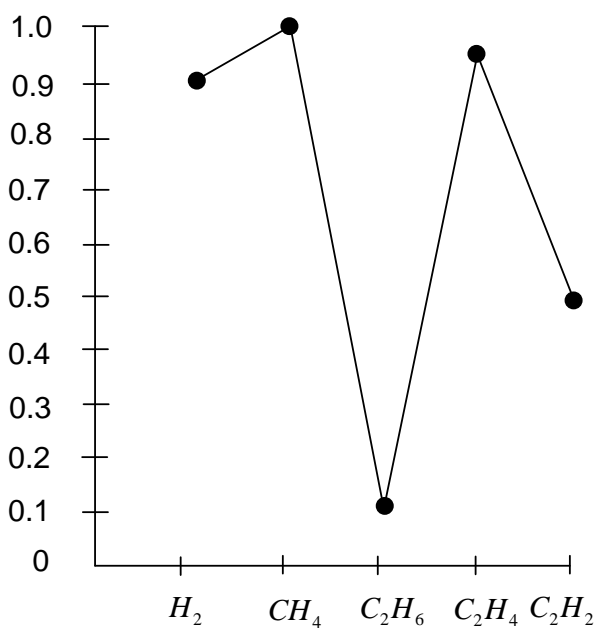
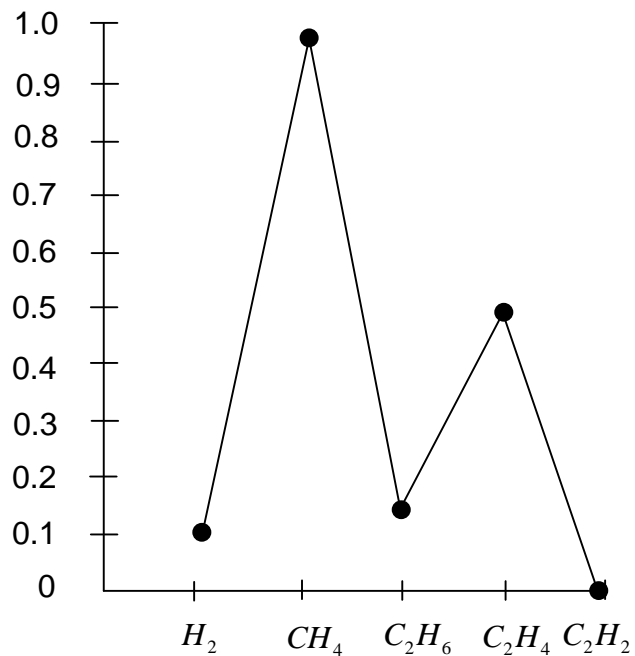


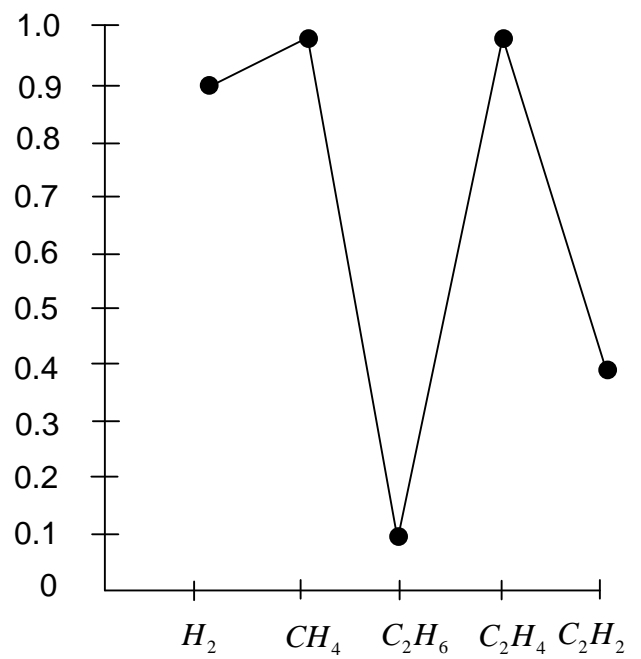
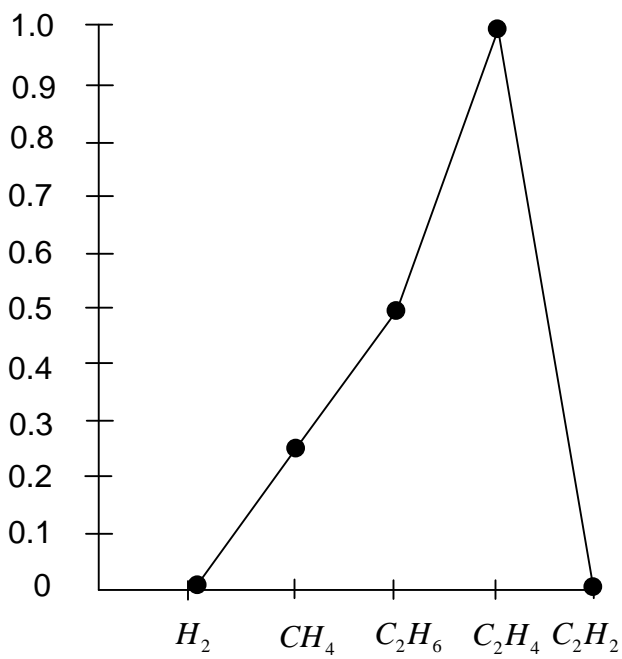
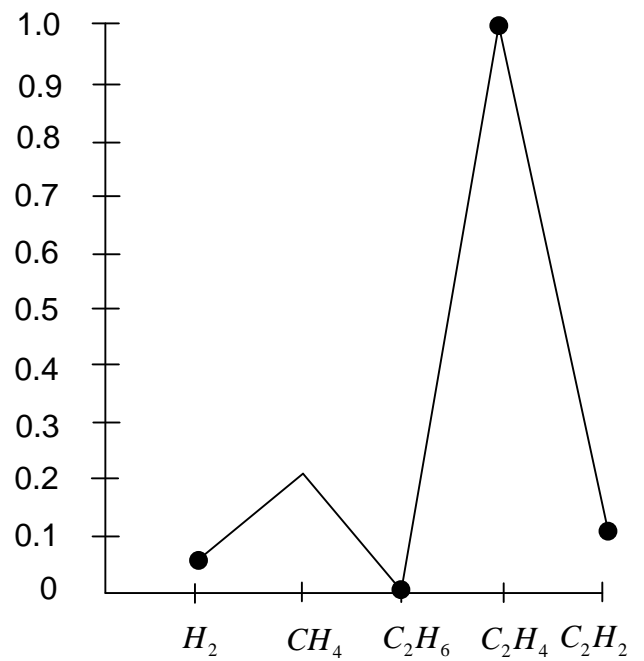
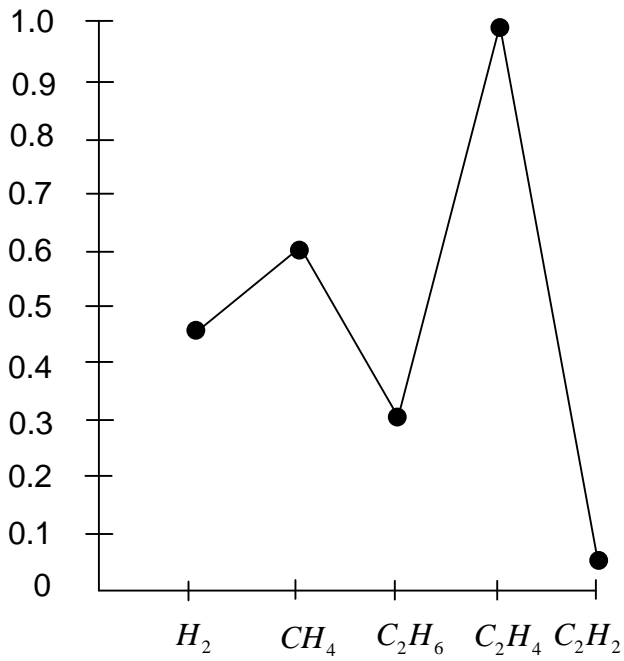
Основний газ - метан Дефекти термічного характеру

Дефект термічного характеру,



Дефект термічного характеру, перехідний в ЧР

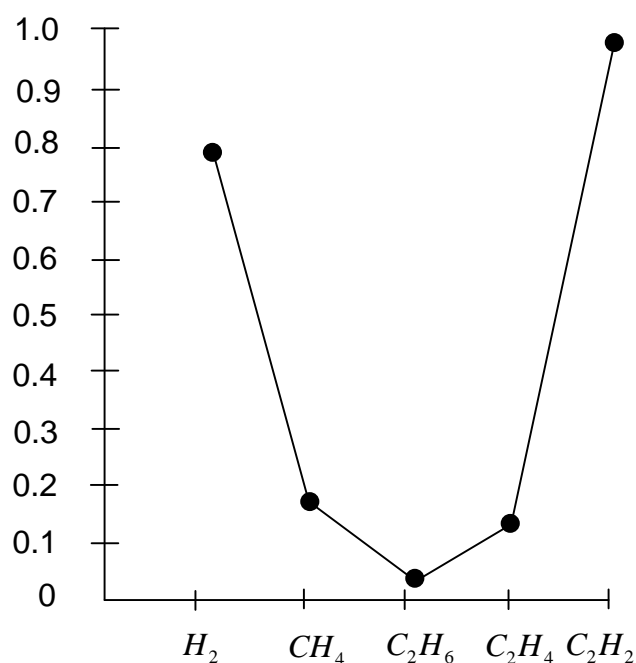




Основний газ - ацетилен Дефекти електричного характеру – елек

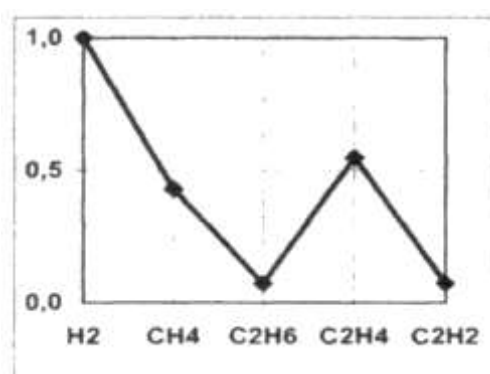
Дефект термічного характеру, перехідний в ЧР

Високотемпературний нагрів, перехідний в дугу



Приклади визначення дефектів у трансформаторному обладнанні з урахуванням графічних образів дефектів

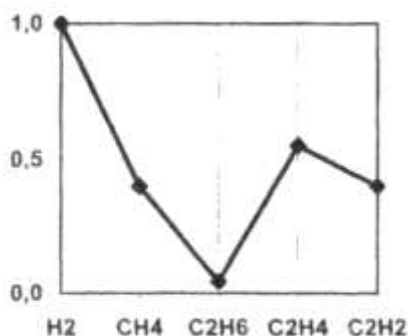
Об'єкт: Автотрансформатор АОДЦТН 333000/750 Результат ХАРГ (мкл/л): $H_2 = 84$, $CH_4 = 36$, $C_2H_6 = 6$, $C_2H_4 = 46$, $C_2H_2 = 6$



Образ дефекту відповідає іскрінню або повзучому розряду.

Під час внутрішнього обстеження в автотрансформаторі було виявлено сліди іскрових розрядів на ізоляції магнітних шунтів системи шунтування бака автотрансформатора.

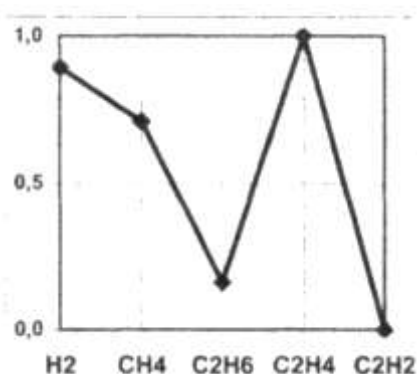
Об'єкт: автотрансформатор АОДЦТН 417000/750 Результат ХАРГ (мкл/л): $H_2 = 160$, $CH_4 = 90$, $C_2H_6 = 14$, $C_2H_4 = 140$, $C_2H_2 = 100$



Образ дефекту відповідає іскрінню або повзучому розряду.

Під час внутрішнього обстеження в автотрансформаторі було виявлено розгалужені сліди повзучих розрядів на поверхні та в товщі головної ізоляції.

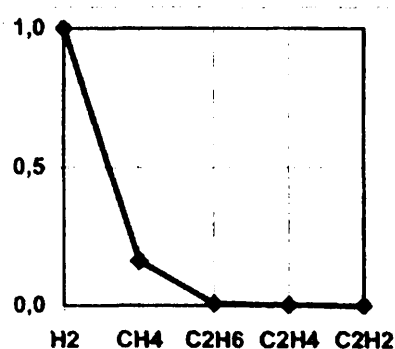
Об'єкт: автотрансформатор АОДЦТН 167000/500 Результат ХАРГ (мкл/л): $H_2 = 166$, $CH_4 = 132$, $C_2H_6 = 30$, $C_2H_4 = 186$, $C_2H_2 = 0$



Образ дефекту відповідає сумі двох образів: високотемпературному нагріванню та розрядам.

Під час внутрішнього обстеження в автотрансформаторі було виявлено сліди нагрівання та розрядів на елементах вибірнику пристрою РПН.

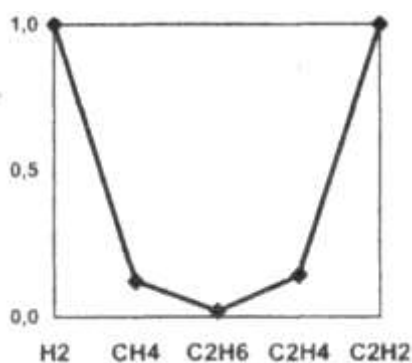
Об'єкт: автотрансформатор АОДЦТН 417000/500 Результат ХАРГ (мкл/л): $H_2 = 1350$, $CH_4 = 220$, $C_2H_6 = 10$, $C_2H_4 = 3$, $C_2H_2 = 0$



Образ дефекту відповідає частковим розрядам.

Під час проведення діагностичних заходів було встановлено наявність часткових розрядів у маслі на екрані вводу 750 кВ.

Об'єкт: трансформатор ТДЦ 400000/330 Результат ХАРГ (мкл/л): $H_2 = 245$, $CH_4 = 30$, $C_2H_6 = 5$, $C_2H_4 = 35$, $C_2H_2 = 245$

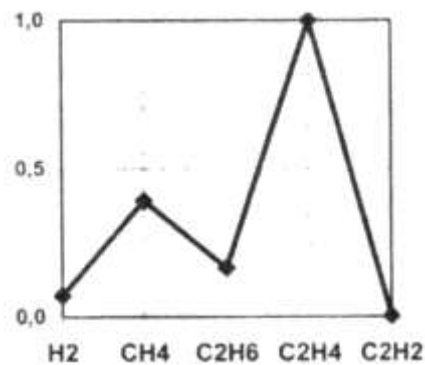


Образ дефекту відповідає дуговому розряду.

Після вимкнення трансформатора було проведено вимірювання опору короткого замикання обмоток ВН2—НН. Результати вимірювання показали недопустиме збільшення опору на фазі А, що свідчить про деформацію обмотки високої напруги. Під час проведення ремонтних робіт на обмотці ВН2 було виявлено дві хвилі деформації та електричне перекриття між котушками вздовж опірної рейки в місці найбільшого зниження ізоляційного проміжку.

Об'єкт: трансформатор власних потреб ТРДНС 63000/35

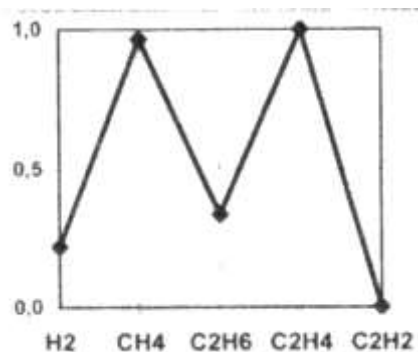
Результат ХАРГ (мкл/л): $H_2 = 64$, $CH_4 = 347$, $C_2H_6 = 147$, $C_2H_4 = 773$, $C_2H_2 = 1,5$



Образ дефекту відповідає високотемпературному нагріванню.

Високотемпературне нагрівання було пов'язане з погіршенням контактних з'єднань струмопровідного ланцюга, що було встановлено за збільшенням омичного опору обмотки НН. Під час обстеження було зафіксовано погіршення стану контактного з'єднання відводу обмотки НН, що було причиною високотемпературного нагрівання.

Об'єкт: автотрансформатор АТДЦТН 250000/330 Результат ХАРГ (мкл/л): $H_2 = 110$, $CH_4 = 587$, $C_2H_6 = 209$, $C_2H_4 = 633$, $C_2H_2 = 0$

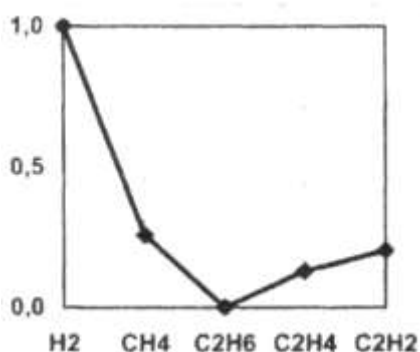


Образ дефекту відповідає нагріванню середньої температури.

Під час обстеження автотрансформатора було виявлено пошкодження обмотки статора насоса перекачування масла системи охолодження, що було причиною зростання газів у баку.

Об'єкт: вимірювальний трансформатор струму ТФРМ 750 Результат ХАРГ(мкл/л):

H₂ =93, CH₄ = 24, C₂H₆ = 0, C₂H₄= 12, C₂H₂= 19



Образ дефекту відповідає потужним розрядам.

Під час внутрішнього обстеження в умовах заводу-виробника було виявлено сліди потужних розрядів на ізоляційній втулці лінійного виводу первинної обмотки.