

МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ В ДЕФЕКТАХ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

Галдецький П.О., студент, Проценко О.Р., доц., Троценко Є.О., доц.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. Частковий розряд (ЧР) – це іскровий розряд дуже маленької потужності, що утворюється всередині ізоляції, або на її поверхні, в обладнанні середнього та високого класів напруги. З часом, часткові розряди, що періодично повторюються, руйнують ізоляцію, приводячи в кінцевому підсумку до її пробую. Зазвичай руйнація ізоляції під впливом часткових розрядів відбувається протягом великого періоду часу (місяців, років). Таким чином, реєстрація часткових розрядів, оцінка їх потужності і повторюваності, а також локалізація місця їх виникнення, дозволяє своєчасно виявити пошкодження ізоляції, що розвиваються, і вжити необхідних заходів для їх усунення.

Мета роботи. У процесі проведення вимірювань параметрів ізоляції необхідно отримати практичну інформацію про зв'язок часткових розрядів із типом дефекту та місцем його виникнення. Однак через об'єктивні причини такий процес може зайняти дуже тривалий час. Оптимальним варіантом для проведення оперативної діагностики різних дефектів є порівняння інформації, отриманої на реальних об'єктах, з результатами, отриманими на моделях, що імітують різні дефекти.

Матеріали і результати досліджень. Усі відомі методи та способи діагностики стану ізоляції можна розділити на дві групи. До першої групи належать методи, що базуються на аналізі параметрів окремих імпульсів ЧР. Вони аналізують амплітудні і частотні параметри зареєстрованих імпульсів, зв'язок між імпульсами, навіть, якщо вони надходять від датчиків, встановлених у різних зонах контрольованого устаткування. Основне завдання цих методів – отримати енергетичні характеристики ЧР, оцінити їх можливий деструктивний вплив на ізоляцію, підвищити достовірність вимірювань.

До другої групи належать методи, що базуються на аналізі амплітудно - фазового розподілу зареєстрованих імпульсів часткових розрядів. Метою цих методів є визначення типів наявних дефектів та оцінка впливу дефектів на залишковий ресурс високовольтної ізоляції. Це методи відносяться до найвищого рівня діагностики, що дозволяють отримати більш достовірні висновки про стан ізоляції, зокрема шляхом використання їх результатів в експертних системах.

Якщо уявити високовольтну ізоляцію, як шар однорідної ізоляції з вкрапленням дефектного включення у вигляді, наприклад, газової бульбашки, то схема заміщення такої ізоляції буде виглядати так, як представлено на рис.1.

Ємності C_1 та C_2 показують ділянки нормальної ізоляції, а ємність C_3 моделює дефект в ізоляції. Аналіз впливу місця виникнення дефекту всередині ізоляції (ближче до земляного електрода, або високовольтного) на співвідношення амплітуд позитивних і негативних імпульсів ЧР, що виникають, відповідно, на негативній і позитивній напівхвилі прикладеної напруги, можна

провести виходячи з того, що зміщення місця виникнення дефекту всередині ізоляції еквівалентно зміні співвідношення величин ємностей $C1$ і $C2$. Як наслідок – змінюється співвідношення між амплітудами позитивних та негативних часткових розрядів. Практичне застосування амплітудно-фазових характеристик, у загальному вигляді, можна показати на впливі місця виникнення дефекту в ізоляції високовольтного обладнання на вигляд амплітудно-фазового розподілу імпульсів. У шарі ізоляції контрольованого обладнання можна виділити три характерні місця виникнення дефекту, що найчастіше зустрічаються (рис.2):

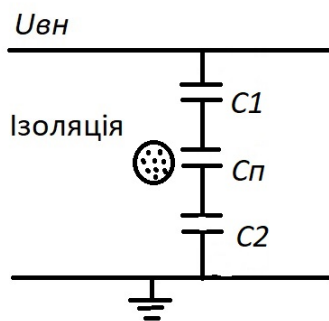


Рисунок 1

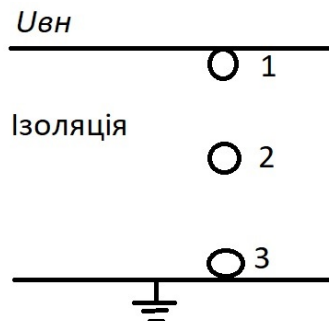


Рисунок 2

Точка «1» – поблизу високовольтного електрода (введення трансформатора, жила кабелю тощо);

Точка «2» – усередині шару високовольтної ізоляції;

Точка «3» – поблизу земляного електрода (екран муфти, оболонка кабельної лінії, тощо).

У переважній більшості випадків ЧР будуть зосереджені у двох, досить вузьких кутових зонах, які розташовуються на ділянках зростання напруги прикладеної до ізоляції напруги. Для аналізу використовуємо рис.3.

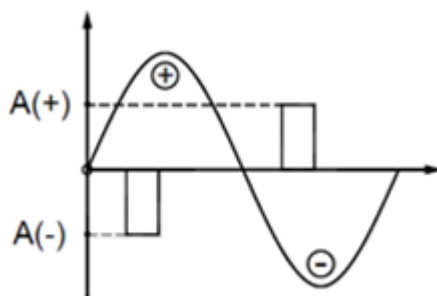


Рисунок 3

При позитивній нарузі всі часткові розряди мають негативну полярність і зосереджені в одній фазовій зоні, до 90 градусів (розряди з амплітудою $A_{(-)}$). При негативній полярності прикладеної напруги всі часткові розряди мають позитивну полярність і зосереджені в фазовій зоні до 270 градусів, (розряди з амплітудою $A_{(+)}$.)

Точка «1», де виник дефект ізоляції, відповідає випадку, коли розряд виникає практично на високовольтному електроді. Це класичний ковзний чи

коронний розряд. На позитивній напівхвилі напруги живлення імпульси негативних розрядів $A_{(-)}$ мають максимальну інтенсивність. На негативній напівхвилі напруги живлення позитивні розряди $A_{(+)}$ мають істотно меншу амплітуду. Таким чином, можемо записати, що в цьому випадку $A_{(+)} < A_{(-)}$.

Точка «3» імітує випадок виникнення дефекту в ізоляції, що виникає поблизу, або на земляному електроді. У цьому випадку розряди під час позитивної напруги живлення (розряди з амплітудою $A_{(-)}$), будуть меншими, ніж розряди під час негативної напівхвилі напруги живлення. Таким чином можемо записати, що в цьому випадку $A_{(+)} > A_{(-)}$.

Точка виникнення дефекту "2" є проміжним варіантом, коли розряди виникають у глибині шару ізоляції. У цьому випадку амплітуди розрядів, (зарєєстрованих на позитивній, і негативній напівхвилі напруги живлення), будуть приблизно однаковими. Така картина розподілу розрядів буває при неправильному просоченні ізоляції, наявності внутрішніх порожнин і температурних руйнувань. Якщо точка дефекту зміщуватиметься від центру в той чи інший бік, змінюватиметься співвідношення амплітуд імпульсів ЧР у контрольованому обладнанні. У цьому випадку $A_{(+)} \approx A_{(-)}$.

Таким чином, аналізуючи інтенсивність ЧР на двох напівперіодах мережі живлення, можна досить надійно оцінити, на якій ділянці контрольованої ізоляції високовольтного обладнання відбуваються часткові розряди - на високовольтному електроді, в середині ізоляції або поблизу земляного електрода. Для підтвердження наведених вище міркувань у лабораторії високих напруг кафедри теоретичної електротехніки факультету електроенергетехніки та автоматики було проведено низку експериментів, метою яких було підтвердити або спростувати можливість локалізації часткових розрядів в ізоляції високовольтного обладнання за результатами аналізу амплітудно-фазових характеристик розрядів ЧР.

Експерименти проводилися на експериментальному стенді, докладний опис якого наведено у [1], з урахуванням вимог нормативної літератури [2]. Для реєстрації ЧР використовувався цифровий осцилограф, характеристики якого наведені у [3]

У якості вихідних моделей було обрано три варіанти розташування дефектів в ізоляції обладнання – «Поверхневий розряд із високовольтного електрода», «Поверхневий розряд із земляного електрода» та «Корона з високовольтного електрода».

Дефект "Поверхневий розряд з високовольтного електрода" імітувався системою електродів, представленою на рис.4.

Висока напруга від високовольтного трансформатора підключена до верхнього електроду, відокремленого від земляного сферичного електрода, що імітує велику поверхню, ізолюючою пластиною з електротехнічного картону. Дефект такого типу найчастіше зустрічається в обладнанні з дуже високою робочою напругою - силових трансформаторах, вимикачах, вимірювальних трансформаторах, лініях передачі.

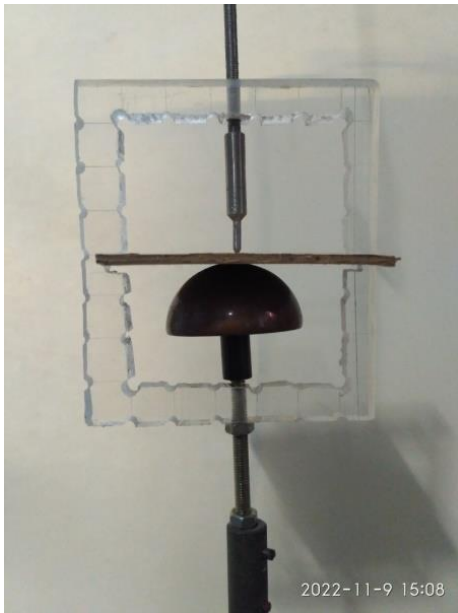


Рисунок 4

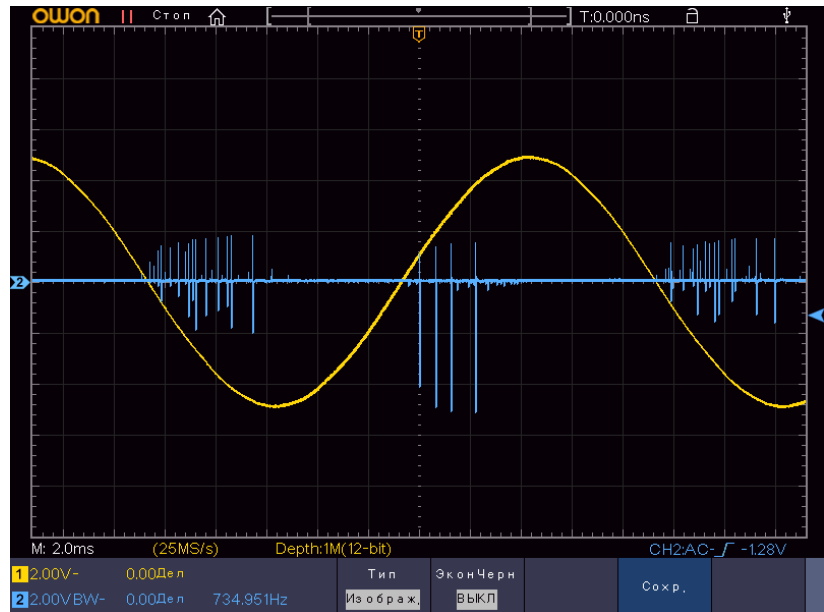


Рисунок 5

Картина розподілу імпульсів часткових розрядів, зареєстрована осцилографом, наведена рис.5. У цьому випадку можна назвати такі особливості:

- при позитивній полярності напруги живлення імпульси ЧР мають негативну полярність, а при негативній напрузі мережі живлення імпульси ЧР мають позитивну полярність.

- фазовий розподіл імпульсів часткових розрядів має приблизно однакову картину, як в області позитивної (від 0 до 90 градусів), так і негативної полярності (від 180 до 270 градусів), напруги живлення.

- амплітудний розподіл імпульсів, по напівперіодах напруги, має яскраво виражену не симетрію. Амплітуди всіх імпульсів, при позитивній напрузі живлення, більші, ніж амплітуди при негативній напрузі. У реальних умовах, чим ближче зона дефекту буде наближена до високовольтного електрода, тим більше співвідношення між позитивними і негативними імпульсами ЧР спостерігається.

- всі імпульси часткових розрядів зосереджені в зонах наростання амплітуди напруги живлення. У зонах спадання напруги імпульсів ЧР практично немає. Максимальну інтенсивність часткові розряди мають у кутових зонах 60 ÷ 90 градусів та 230 ÷ 270 градусів. У цих зонах миттєве значення напруги живлення ще не досягло максимуму, але швидкість його наростання вже істотно зменшилася.

Основною особливістю наявності такого дефекту є більший рівень часткових розрядів при позитивній напрузі мережі живлення. Цей дефект типу «поверхневий розряд із високовольтного електрода», за картиною свого прояву протилежний досліджуваному дефекту типу «поверхневий розряд із земляного електрода». Дефект типу «поверхневий розряд із високовольтного електрода» виникає у тому випадку, коли на високовольтному електроді мають місце геометричні дефекти (велика поверхня, локальні виступи, гострі краї, «кути»). Крайньою стадією цього дефекту є дефект типу «корона з високовольтного електрода» (третя досліджувана модель ЧР).

Дефект типу "Поверхневий розряд із земляного електрода" досліджувався на моделі, фотографію якої наведено на рис. 6.



Рисунок 6

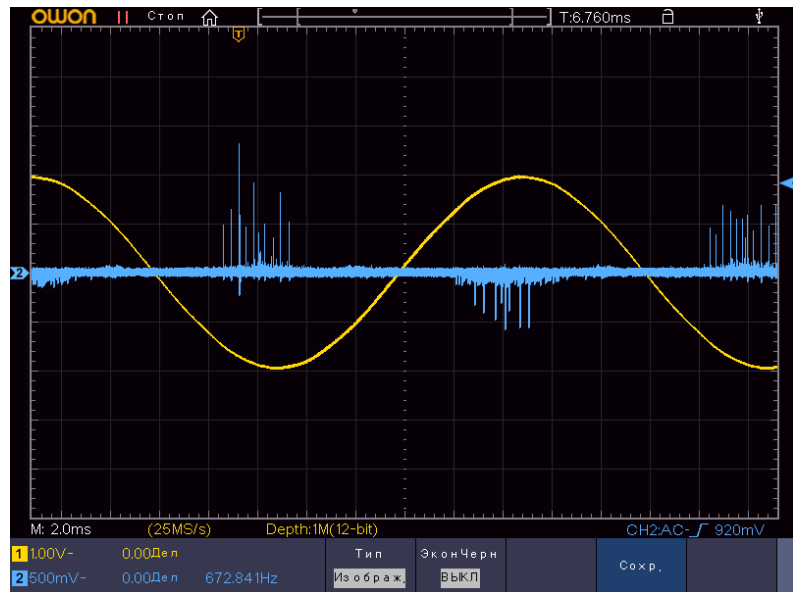


Рисунок 7

Висока напруга від високовольтного підключена до сферичного електрода, що імітує велику поверхню високовольтного провідника. Земляний провідник малої площі імітує електрод, відокремлений від високовольтного провідника ізолюючою пластиною. Картина розподілу імпульсів часткових розрядів, зареєстрована осцилографом, наведена на рис.7. Можна назвати такі особливості:

- при позитивній полярності напруги живлення імпульси ЧР мають негативну полярність, а при негативній напрузі мережі живлення імпульси ЧР мають позитивну полярність;

- фазовий розподіл імпульсів часткових розрядів має приблизно однакову картину, як в області позитивної, так і негативної полярності напруги живлення;

- амплітудне розподіл імпульсів, по напівперіодах мережі живлення, має яскраво виражену не симетрію. Амплітуди всіх імпульсів, при позитивній напрузі живлення, менші, ніж амплітуди при негативній напрузі;

- всі імпульси часткових розрядів зосереджені в зонах наростання амплітуди напруги живлення. У зонах спадання напруги імпульсів часткових розрядів практично немає. Максимальну інтенсивність часткові розряди мають у кутових зонах $40 \div 90$ градусів та $200 \div 270$ градусів. У цих зонах миттєве значення напруги живлення ще не досягло максимуму, але швидкість його наростання вже істотно зменшилася.

Як висновок можна сказати, що зазначений дефект виникає у тому випадку, коли на земляному електроді мають місце геометричні дефекти (локальні виступи, гострі краї, «кути» тощо).

Дефект типу "Корона з високовольтного електрода". Фотографія випробувальної комірки, у якій моделюється такий дефект, наведена на рис.8. Відмінність цієї моделі від моделі «Поверхневий розряд з високовольтного

електрода» полягає створенні відстані між електродом і поверхнею ізоляційного картону.

Високу напругу від високовольтного трансформатора підключено до електрода типу «голка». Земляний провідник з великою площею поверхні імітує електрод зі сферичною поверхнею. Дефект такого типу найчастіше зустрічається в обладнанні з дуже високою напругою – силових трансформаторах, вимикачах, вимірювальних трансформаторах. Чим вища робоча напруга контрольованого устаткування, тим в більшій мірі на його роботу впливають коронні розряди.

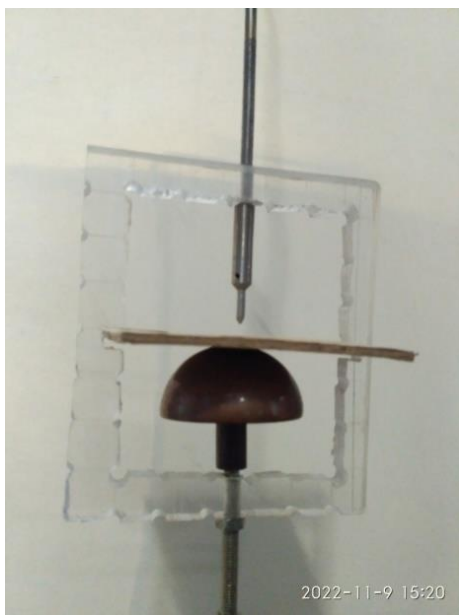


Рисунок 8

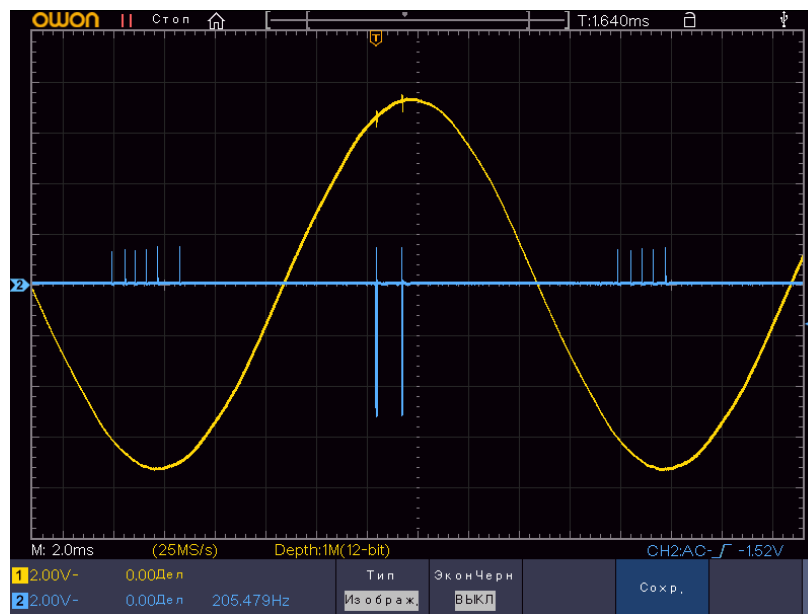


Рисунок 9

Взагалі коронні розряди найчастіше не є небезпечними для ізоляції контрольованого обладнання. Їх негативний вплив полягає в тому, що вони впливають на результати діагностики, ускладнюючи виявлення дефектів, які можуть справді вплинути на залишковий ресурс обладнання.

Картина розподілу імпульсів часткових розрядів, зареєстрованих на моделі даного дефекту, наведена на рис.9. Однак необхідно відзначити, що реальний розподіл імпульсів часткових розрядів від корони, які найчастіше зустрічається на практиці, буде трохи відрізнятися від наведеного на рис.9 у більшій або меншій мірі. Основна відмінність полягає у тому, що рівень існуючої в експериментальному стенді напруги недостатній для повної імітації розрядів корони.

Проте на рис.9 можна назвати такі особливості амплітудно – фазового розподілу імпульсів ЧР:

- при позитивній полярності напруги живлення, зареєстровані імпульси часткових розрядів мають негативну полярність;
- фазовий розподіл імпульсів часткових розрядів має приблизно однакову картину, як в області позитивної, так і негативної полярності напруги живлення;
- амплітудний розподіл імпульсів по напівперіодах мережі живлення, має яскраво виражену не симетрію. Амплітуди всіх імпульсів, при позитивній напрузі, перевищують амплітуди імпульсів при негативній напрузі;

- всі імпульси ЧР зосереджені в зонах максимальних значень амплітуди напруги живлення. Максимальну інтенсивність часткові розряди мають у кутових зонах $80 \div 120$ градусів (негативний напівперіод) та $150 \div 270$ градусів (позитивний напівперіод). У цих зонах миттєве значення напруги живлення дорівнює, або наближається до максимального значення.

Основною особливістю наявності в контрольованому обладнанні дефекту типу «корона» є великий рівень негативних часткових розрядів при позитивному напрузі мережі живлення. Основні часткові розряди зосереджені області максимального значення напруженості електричного поля. При негативному напрузі мережі живлення кількість імпульсів часткових розрядів більше, але вони мають меншу амплітуду. Чим ближче зона виникнення коронних розрядів буде наближена до ізоляційної пластини (відстань між голкою та ізоляцією, відповідно 2мм, 1 мм, 0,5 мм), тим більша кількість імпульсів реєструватиметься при обох полярностях – рис.10, 11, 12.

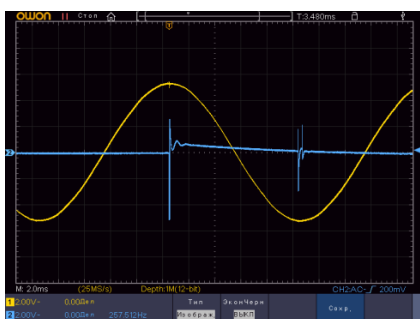


Рисунок 10

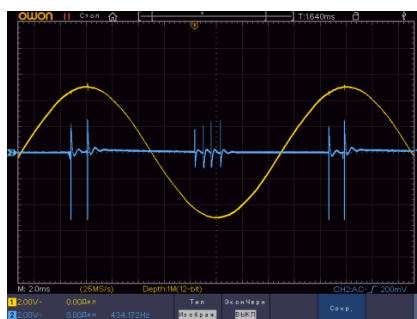


Рисунок 11

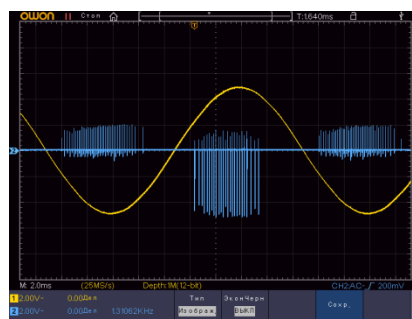


Рисунок 12

Дефект типу "корона з високовольтного електрода" виникає в тому випадку, коли на високовольтному електроді має місце геометричний дефект типу "голка". При прикладанні до «голки» позитивного потенціалу потоки електронів спрямовуються від «землі» до «голки». З наближенням ці потоки зливаються, набирають велику потужність, і виявляються у вигляді розрядів з високою енергією. При протилежній полярності прикладеної напруги має місце розтікання електронів від «голки». У процесі розтікання потоки електронів поділяються на дедалі дрібніші «потічки», енергія їх падає, інтенсивність зменшується.

Висновки. В результаті досліджень амплітудно-фазових характеристик часткових розрядів, які моделюють дефекти, що виникають у різних місцях високовольтної ізоляції обладнання, можна з упевненістю діагностувати як тип дефекту так і локалізувати місце його виникнення.

Дані дослідження не охоплюють весь спектр можливих дефектів, проте можна припустити, що аналогічні дослідження, наприклад, для дефектів типу «ЧР між двома шарами високовольтної ізоляції» або «Корона з земляного електрода» та ін. дозволять також отримати позитивні результати.

Отримані результати оформлені як «образ дефекту» можуть бути закладені в систему автоматизованої діагностики ізоляції обладнання, побудованої на основі експертної системи. Поповнювана бібліотека «образів» дозволить значно скоротити час діагностики та підвищити його результативність.

Для підвищення інформативності та результативності використання амплітудно-фазових розподілів необхідно проводити вимірювання протягом тривалішого часу з використанням аналізаторів імпульсів. Наприклад протягом однієї хвилини. За результатами усереднених даних амплітудно-фазових характеристик імпульсів можуть бути побудовані амплітудно-фазові діаграми, які значно підвищують достовірність діагностичних заходів, що проводяться.

Перелік посилань

1. Проценко О.Р., Троценко Є.О., Малафійчук Л.В., Яременко Д.С. Стенд для дослідження характеристик часткових розрядів в ізоляції електроустаткування високої напруги. Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів та студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". Url - <http://jour.fea.kpi.ua/article/view/165127/164190>.
2. ІЕС 60270:2000 "High-voltage test techniques partial discharge measurements"
3. http://www.owon.com.hk/products_owon_xds3000_series_n-in-1_digital_oscilloscope.