

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.315.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/04>

Троценко Є.О.

<https://orcid.org/0000-0001-9379-0061>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Нестерко А.Б.

<https://orcid.org/0000-0001-7488-4214>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Проценко О.Р.

<https://orcid.org/0000-0002-7719-3336>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Перетятко Ю.В.

<https://orcid.org/0000-0003-1397-8078>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИКЛИКИ ТА ПІДХОДИ ДО ДІАГНОСТИКИ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ В ІЗОЛЯЦІЇ СИСТЕМ ВИСОКОЇ НАПРУГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

У статті розглянуто сучасні напрями дослідження часткових розрядів у високовольтній ізоляції за різних режимів прикладеної напруги, зокрема змінної, постійної та комбінованої напруги з пульсаціями. Показано, що перехід електроенергетичних систем до широкого використання передачі електроенергії високої напруги постійного струму (ВНПС), який зараз відбувається в світі, зумовлює необхідність перегляду традиційних підходів до аналізу та діагностики часткових розрядів, сформованих для умов змінного струму. Узагальнено відмінності фізичних механізмів виникнення та розвитку часткових розрядів у діелектриках за дії постійної напруги, пов'язані з накопиченням просторового заряду, поляризаційними ефектами та відсутністю прив'язки розрядних імпульсів до фазового кута. Проаналізовано сучасні методи подання та оброблення сигналів часткових розрядів у системах високої напруги постійного струму, зокрема часові та часово-частотні підходи, які дозволяють підвищити достовірність і завадостійкість вимірювань. Окрему увагу приділено дослідженню часткових розрядів за умов пульсуючої постійної напруги, характерної для перетворювальних трансформаторів та іншого обладнання ВНПС, де накладання постійної і змінної складових істотно впливає на електричні та часові характеристики розрядів. Наведено узагальнення експериментальних результатів, що демонструють залежність інтенсивності та полярності імпульсів часткових розрядів від форми прикладеної напруги. Розглянуто особливості діагностики часткових розрядів у кабельних лініях високої напруги постійного струму, включаючи проблеми низької повторюваності розрядів, ослаблення сигналів та впливу електромагнітних завод. Проаналізовано можливості застосування методів штучного інтелекту та машинного навчання для автоматизованої класифікації часткових розрядів і ідентифікації дефектів ізоляції. Показано, що поєднання фізично обґрунтованих моделей і інтелектуальних методів



оброблення даних є перспективним напрямом підвищення ефективності діагностики та надійності високовольтного електрообладнання.

Ключові слова: висока напруга постійного струму, висока напруга змінного струму, діагностика ізоляції, пульсації напруги, силові кабелі, часткові розряди.

Постановка проблеми. Надійність та довговічність високовольтного електрообладнання значною мірою визначаються станом його ізоляційної системи. Одним із ключових факторів деградації ізоляції є часткові розряди, які протягом десятиліть залишаються предметом інтенсивних теоретичних і експериментальних досліджень. Традиційно основна увага в цій галузі приділялася аналізу умов виникнення, розвитку та діагностики часткових розрядів за дії високої напруги змінного струму (ВНЗС), що було зумовлено домінуванням систем передачі та розподілу електричної енергії змінного струму.

Однак упродовж останніх років дослідження часткових розрядів суттєво вийшли за межі класичної проблематики, пов'язаної виключно з режимами ВНЗС. Активний розвиток і широке впровадження систем передачі електричної енергії високої напруги постійного струму (ВНПС) зумовили появу нових викликів, пов'язаних із виникненням і проявами часткових розрядів в умовах дії постійної напруги [1]. Фізичні механізми формування часткових розрядів при високій напрузі постійного струму (ВНПС) істотно відрізняються від відповідних процесів при змінному струмі, зокрема внаслідок накопичення просторового заряду та прояву поляризаційних ефектів у діелектриках. За таких умов відсутня можливість прив'язки моментів виникнення часткових розрядів до фазового кута прикладеної напруги, що є характерним інструментом аналізу для режимів змінного струму. Це, у свою чергу, суттєво ускладнює інтерпретацію вимірювальних даних [2], знижує ефективність традиційних методів придушення завад і ідентифікації джерел часткових розрядів, а також потребує розроблення спеціалізованих підходів до діагностики ізоляції в умовах ВНПС.

Додатково ускладнює проблему той факт, що в реальних системах ВНПС напруга, як правило, не є ідеально постійною та характеризується наявністю пульсацій, зумовлених роботою перетворювальних пристроїв. У зв'язку з цим у сучасних наукових публікаціях дедалі більше уваги приділяється дослідженню часткових розрядів за комбінованих режимів напруги, що поєднують постійну складову та змінні пульсації [3]. Такі режими за характером формування електричного

поля та динамікою розрядних процесів можуть розглядатися як перехідні між класичними умовами ВНЗС та чистими режимами ВНПС, що зумовлює необхідність їх окремого аналізу з урахуванням специфіки електричних і часових характеристик.

Паралельно зі зміною об'єктів і режимів дослідження відбувається трансформація підходів до оброблення та інтерпретації даних часткових розрядів. В останні роки значна кількість робіт присвячена використанню осцилограм і діаграм, що відображають зв'язок моментів виникнення часткових розрядів із фазовим кутом прикладеної змінної напруги [4], як інформаційної основи для навчання штучних нейронних мереж та інших методів машинного навчання. Такі підходи відкривають нові можливості для підвищення чутливості та достовірності систем діагностики високовольтної ізоляції, а також для автоматизованої ідентифікації типів дефектів за результатами вимірювання часткових розрядів.

Таким чином, сучасні дослідження в галузі часткових розрядів характеризуються розширенням спектра режимів напруги, ускладненням фізичних моделей та активним впровадженням інтелектуальних методів аналізу даних. За цих умов актуальним є узагальнений огляд сучасних напрямів досліджень, який дозволив би систематизувати наявні підходи, окреслити основні тенденції розвитку галузі та виявити наявні наукові й практичні проблеми, що потребують подальшого розв'язання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні наукові дослідження в галузі часткових розрядів у високовольтній ізоляції демонструють чітку тенденцію до поглибленого аналізу різних режимів прикладеної напруги та ускладнення підходів до аналізу експериментальних даних. Традиційно найбільш ґрунтовно вивченими залишаються часткові розряди за дії високої напруги змінного струму, для яких упродовж ХХ століття сформовано розвинену теоретичну базу, стандартизовані методи вимірювання та інтерпретації результатів [5].

Водночас на початку ХХІ століття, у зв'язку з активним впровадженням кабельних систем високої напруги постійного струму, особливо для передачі електричної енергії на великі відстані,

суттєво зросла кількість робіт, присвячених аналізу часткових розрядів за умов ВНПС. У таких дослідженнях відзначається принципова відмінність фізичних механізмів виникнення та розвитку розрядних процесів порівняно з режимами змінного струму, що пов'язано з накопиченням просторового заряду, поляризаційними ефектами в діелектриках і відсутністю прив'язки імпульсів часткових розрядів до фазового кута прикладеної напруги [1, 2]. Це зумовлює неможливість прямого застосування класичних картин розподілу часткових розрядів у фазовій області (Phase-Resolved Partial Discharge або PRPD в англійській літературі) та стимулює пошук альтернативних способів подання й оброблення вимірювальних даних.

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із вивченням часткових розрядів за умов пульсуючої постійної напруги, характерної для перетворювального обладнання систем ВНПС. Показано, що накладання постійної складової та змінних пульсацій істотно впливає на інтенсивність, полярність і часову структуру розрядних імпульсів, особливо в паперово-масляній ізоляції трансформаторів і кабельних ліній [3]. Це зумовлює необхідність подальших експериментальних і теоретичних досліджень, спрямованих на уточнення закономірностей часткових розрядів за таких умов.

Паралельно з розвитком фізичних моделей часткових розрядів активно впроваджуються методи інтелектуального аналізу даних. Значна кількість публікацій присвячена використанню фазових, часових і часо-частотних характеристик сигналів часткових розрядів як вхідних даних для алгоритмів машинного навчання та штучних нейронних мереж [4]. Такі підходи спрямовані на автоматизацію класифікації типів дефектів, підвищення завадостійкості вимірювань і покращення достовірності діагностики стану високовольтної ізоляції.

Разом з тим аналіз останніх публікацій свідчить про об'єктивну відсутність універсальних підходів до аналізу часткових розрядів, які б однаково ефективно застосовувалися за різних режимів прикладеної напруги. Це вказує на необхідність узагальнення наявних наукових результатів і визначення перспективних напрямів розвитку методів діагностики часткових розрядів.

Постановка завдання. Метою роботи є проведення комплексного огляду сучасних напрямів дослідження часткових розрядів за різних режимів прикладеної напруги, включаючи змінну, постійну та комбіновану напругу з пульсаціями,

а також аналіз підходів до використання сигналів часткових розрядів у задачах інтелектуальної діагностики та ідентифікації дефектів високовольтної ізоляції.

Виклад основного матеріалу. Дослідження часткових розрядів у системах високої напруги змінного струму мають тривалу історію та добре сформовану теоретичну й експериментальну базу. Для умов ВНЗС детально вивчені механізми виникнення часткових розрядів у різних типах ізоляційних дефектів, розроблені стандартизовані методи їх вимірювання та інтерпретації, а також сформовані усталені підходи до діагностики стану високовольтної ізоляції. Водночас пряме перенесення цих підходів на системи високої напруги постійного струму є обмеженим, оскільки відмінності в характері електричного поля, процесах накопичення просторового заряду та у виникненні й розвитку розрядних процесів у часі зумовлюють відмінні фізичні механізми виникнення та розвитку часткових розрядів. Це обумовлює актуальність аналізу спеціалізованих досліджень у галузі ВНПС. Зокрема, у вже згаданій вище роботі [1] виконано експериментальний аналіз характеристик часткових розрядів на зразках кабельної ізоляції з різними дефектами за умов ВНЗС і ВНПС. Автори звертають увагу на те, що в практиці випробувань кабелів постійного струму контроль якості часто здійснюється за змінної напруги, незважаючи на принципові відмінності у фізиці розрядних процесів. Для інтерпретації результатів запропоновано використання картин розподілу часткових розрядів у часовій області (Time-Resolved Partial Discharge або TRPD в англійській літературі) та статистичних параметрів, що дозволяє виявити специфічні особливості розрядної активності за постійної напруги й показати обмеженість прямого перенесення методів змінного струму на оцінювання стану ізоляції в системах ВНПС.

Дійсно, за умов постійної напруги частота джерела дорівнює нулю, тому використання картин розподілу часткових розрядів у фазовій області, які широко застосовуються в системах ВНЗС, є непридатним для систем ВНПС. У зв'язку з цим дослідники зосереджуються на пошуку альтернативних способів подання та інтерпретації результатів вимірювання часткових розрядів в умовах постійного струму. Одним із таких підходів є групування часткових розрядів за їх часо-частотними параметрами (Time-Frequency Map або T-F Map в англійській літературі), яке дає змогу відокремлювати сигнали часткових розрядів від завод [6]. У таких картах розподілу основними параме-

трами є частота першого коливання у спектрі сигналу часткового розряду та тривалість імпульсу часткового розряду. Як показано експериментально в роботах [7, 8], цей підхід до відсіювання шуму, що добре зарекомендував себе в системах змінного струму, є також перспективним для систем постійного струму. Крім того, часово-частотне групування дозволяє автоматично розрізняти сигнали завад і справжні імпульси часткових розрядів на основі статистичного аналізу зареєстрованих сигналів.

У реальних умовах експлуатації обладнання ВНПС дія напруги не обмежується ідеальною постійною складовою, що зумовлює необхідність розгляду часткових розрядів за умов пульсуючої постійної напруги.

Перетворювальний трансформатор (converter transformer в англійській літературі) є одним із ключових елементів систем передачі електроенергії на високій напрузі постійного струму. Обмотки з боку вентилів у таких трансформаторах працюють в умовах дії складної форми напруги [3, 9], яка поєднує постійну складову, напругу промислової частоти, гармоніки та імпульсні компоненти. Накладання постійної та пульсуючої складових суттєво впливає на стан паперово-масляної ізоляції, що ускладнює оцінку її надійності. Тому дослідження особливостей часткових розрядів за умов пульсуючої постійної напруги є важливим для коректної діагностики технічного стану таких трансформаторів.

Основною причиною виникнення часткових розрядів у трансформаторах є локальні гострі неоднорідності металевих поверхонь. У таких місцях відбувається сильна концентрація електричного поля, що призводить до появи локальних електричних розрядів у трансформаторній оливі. Експериментальні дослідження, проведені в роботі [3], показали, що характеристики цих розрядів в ізоляційній рідині залежать як від постійної, так і від пульсуючої складових напруги. За невеликої амплітуди пульсацій імпульси часткових розрядів мають одиночний характер, тоді як зі збільшенням пульсацій розряди виникають як на стадії підйому, так і на стадії спаду напруги, причому полярність імпульсів у цих випадках протилежна. Крім того, зі зростанням рівня постійної складової напруги спостерігається збільшення як частоти, так і амплітуди часткових розрядів [3].

На підтвердження наведених вище положень у роботі наведено експериментальні осцилограми часткових розрядів, отримані в лабораторних умовах на кафедрі теоретичної електротехніки. На першій осцилограмі (рис. 1) представлено процеси часткових розрядів за умови прикладання нестандартної напруги, що містить постійну складову та пульсації. Видно, що імпульси часткових розрядів виникають як на стадії підйому, так і на стадії спаду напруги, при цьому їх полярність є протилежною, що узгоджується з результатами експериментальних досліджень, наведених у [3]. Друга осцилограма (рис. 2) ілюструє характер

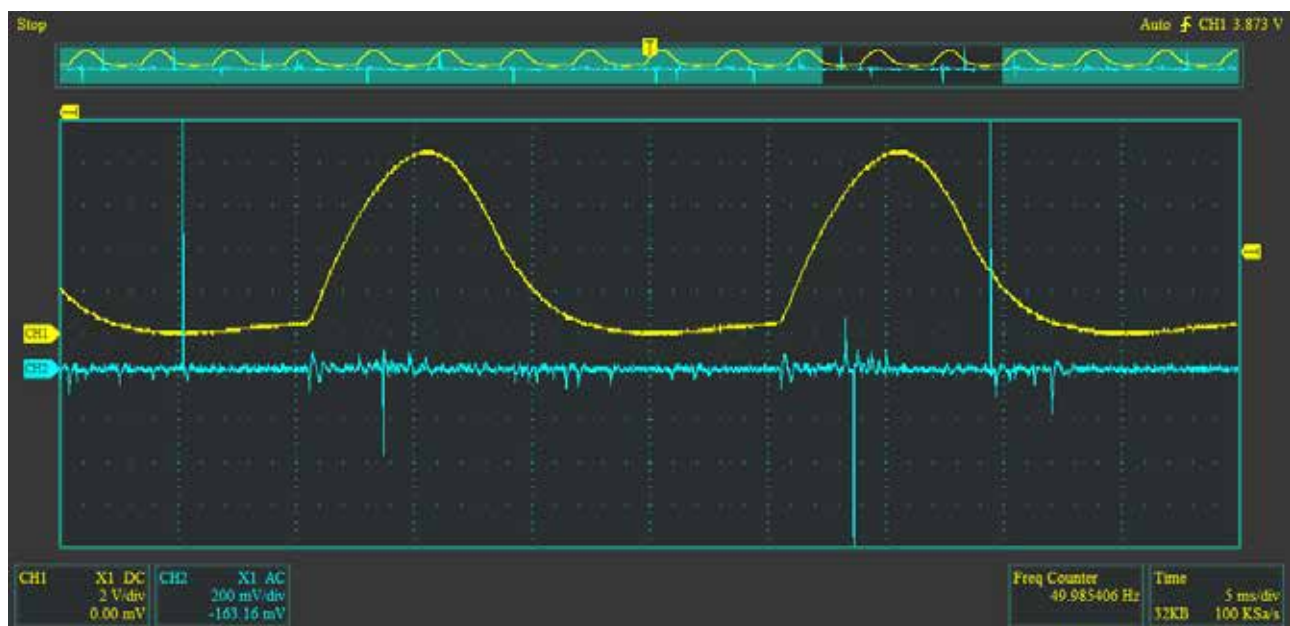


Рис. 1. Осцилограма часткових розрядів при прикладанні нестандартної напруги з постійною складовою та пульсаціями

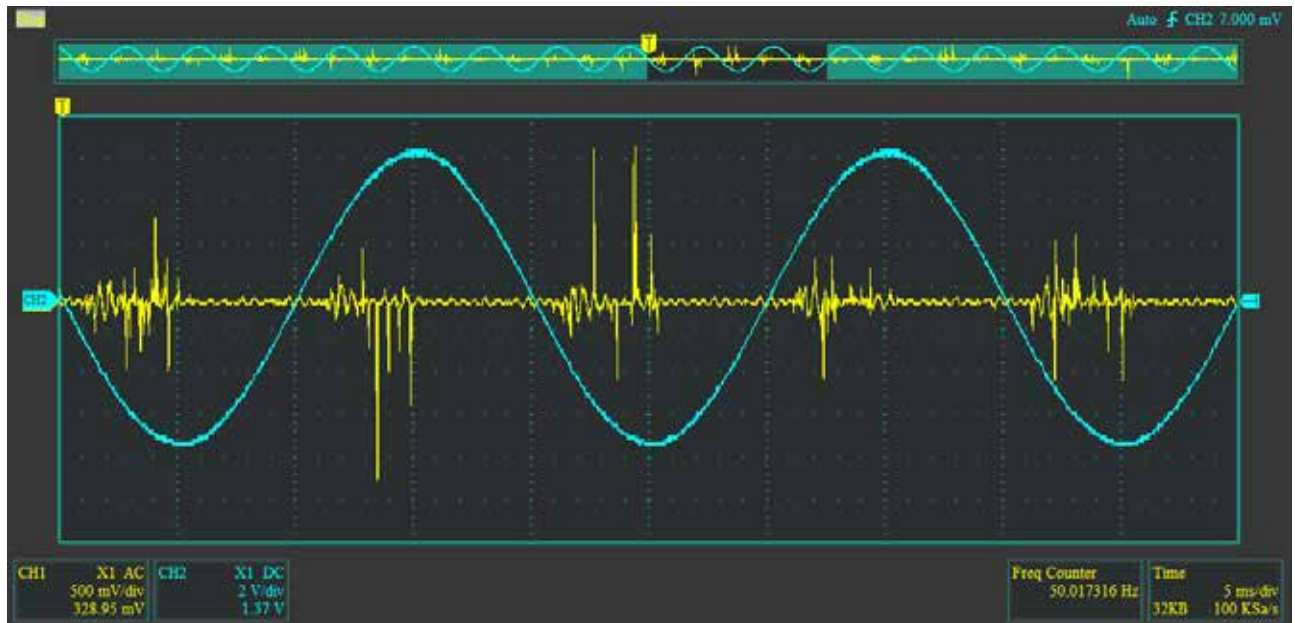


Рис. 2. Осцилограма часткових розрядів при синусоїдальній формі прикладеної напруги

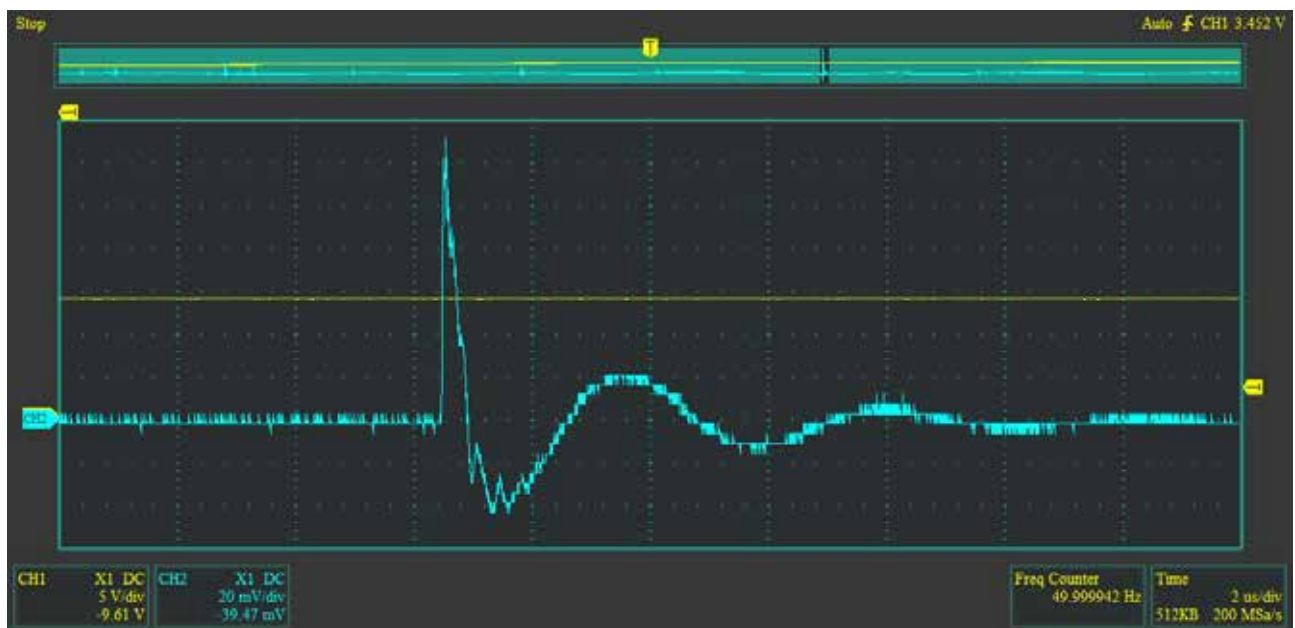


Рис. 3. Осцилограма окремого імпульсу часткового розряду у збільшеному масштабі по осі часу, отримана при прикладанні нестандартної напруги

часткових розрядів при синусоїдальній формі прикладеної напруги: у цьому випадку імпульси часткових розрядів спостерігаються лише на стадії підйому напруги в кожному півперіоді, а після досягнення амплітудного значення напруги їх виникнення припиняється. На третій осцилограмі (рис. 3) у збільшеному часовому масштабі наведено окремих імпульс часткового розряду, отриманий за умов прикладання нестандартної напруги; імпульс має виражену коливальну форму, що свідчить про вплив параметрів вимірюваль-

ної системи на реєстрацію перехідних процесів. Сукупність наведених осцилограм наочно демонструє істотний вплив форми прикладеної напруги на часові та електричні характеристики часткових розрядів.

Часткові розряди у кабелях високої напруги постійного струму є важливим індикатором деградації ізоляції та надійності систем передачі електроенергії. Дослідження показують, що характер часткових розрядів залежить від типу дефекту та умов експлуатації: різні дефекти,

такі як повітряні порожнини, виступи або подряпини, формують специфічні профілі розрядів та різну напругу їх виникнення [10]. Одночасно вимірювання часткових розрядів на з'єднаннях кабелів ВНПС ускладнюються високим опором ізоляції, низькою частотою повторень розрядів (див. рис. 4 нижче) і впливом електромагнітного шуму, що потребує спеціальних методів фільтрації та аналізу імпульсів для коректної інтерпретації даних [11].

Особливо складною є діагностика часткових розрядів у підводних кабелях ВНПС з просоченою паперовою ізоляцією, де сигнали часткових розрядів суттєво послаблюються під час проходження довгою кабельною лінією, а вимірювання ускладнюється шумом перетворювальної станції. Проте, оскільки сигнали часткових розрядів у просочених маслоси кабелях мають більшу амплітуду та ширший спектр через особливості деградації їх ізоляції порівняно з кабелями на основі зшитого поліетилену, їх можна виявити при вимірюваннях у низькочастотному діапазоні, завдяки чому стає можливою діагностика навіть віддалених джерел часткових розрядів [12]. Комплексне вивчення цих явищ сприяє кращому розумінню механізмів деградації ізоляції та підтримці надійності кабельних ліній у системах передачі електроенергії постійного струму високої напруги.

У сучасній електротехніці штучний інтелект (ШІ) активно використовується для аналізу часткових розрядів в ізоляції високовольтного облад-

нання, що дозволяє підвищити точність діагностики та прогнозування стану систем. Методи штучних нейронних мереж застосовуються для розпізнавання типів часткових розрядів на основі фазових і амплітудних характеристик сигналів, отриманих від різних сенсорів, що забезпечує ефективну оцінку стану твердої та рідинної ізоляції [13]. Конволюційні нейронні мережі (Convolutional Neural Network або CNN в англійській літературі) та інші алгоритми машинного навчання використовуються для класифікації картин розподілу часткових розрядів у фазовій області у силових кабелях, створюючи бази даних візуальних характеристик, що дозволяє передбачати можливі дефекти та підвищувати надійність експлуатації електрообладнання [4]. Крім того, алгоритми кластеризації та інші методи ШІ застосовуються для аналізу сигналів часткових розрядів у процесі старіння ізоляції, що дає змогу відстежувати розвиток деградаційних процесів під впливом термічних навантажень [14]. Порівняння різних моделей машинного навчання, таких як дерево ухвалення рішень (англ. – decision tree), метод опорних векторів (англ. – support vector machine) та ансамблеві методи машинного навчання (англ. – ensemble learning), демонструє переваги й обмеження кожного підходу для класифікації часткових розрядів і визначення оптимальних стратегій діагностики [15]. Загалом, інтеграція ШІ в системи моніторингу високовольтного обладнання відкриває нові можливості

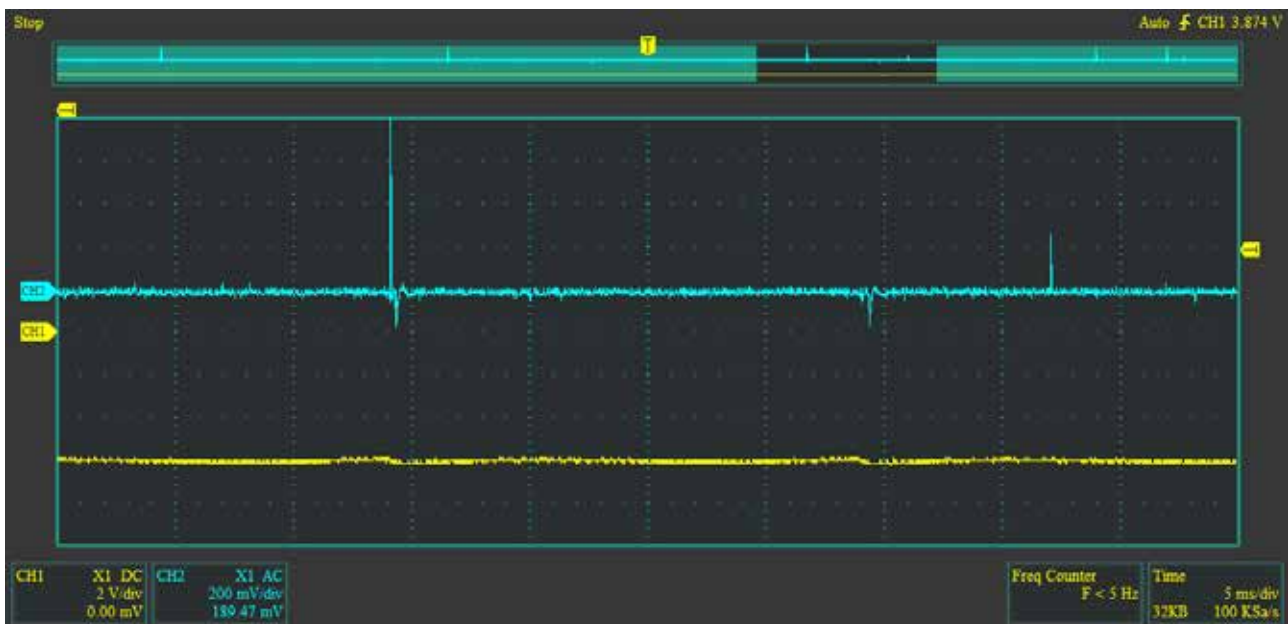


Рис. 4. Прояв поодиноких часткових розрядів у зволоженої ізоляції за умов постійної напруги негативної полярності

для прогнозного обслуговування та підвищення надійності енергетичних систем.

Висновки. У роботі узагальнено сучасний стан досліджень часткових розрядів у високовольтній ізоляції за різних режимів прикладеної напруги та показано, що трансформація електроенергетичних систем безпосередньо впливає на методи діагностики ізоляції. Проаналізовані результати свідчать, що усталені підходи, сформовані для умов змінної напруги, лише частково придатні для систем постійного струму, оскільки відмінності у формуванні електричного поля, часовій структурі розрядів і ролі просторового заряду зумовлюють інші прояви деградаційних процесів.

Показано, що в умовах постійної та пульсуючої постійної напруги ключового значення набувають альтернативні способи подання та оброблення даних часткових розрядів, зокрема часові та часово-частотні характеристики імпульсів. Такі підходи дозволяють підвищити завадостійкість

вимірювань і створюють основу для коректної інтерпретації результатів у середовищах із низькою інтенсивністю розрядної активності. Окрему увагу приділено комбінованим режимам напруги, характерним для перетворювального обладнання ВНПС, де взаємодія постійної складової та пульсацій істотно змінює характер часткових розрядів і потребує спеціалізованих моделей аналізу.

Встановлено, що інтеграція методів штучного інтелекту в системи моніторингу часткових розрядів є перспективним напрямом розвитку діагностики, оскільки забезпечує автоматизацію класифікації дефектів та створює передумови для прогнозного обслуговування. Загалом результати огляду підтверджують необхідність подальших комплексних досліджень, спрямованих на узгодження фізичних моделей часткових розрядів із сучасними методами оброблення даних та розроблення універсальних діагностичних підходів для різних режимів високої напруги.

Список літератури:

1. Pieroni P., Ciotti G., Caprara A. Comparative analysis of partial discharge measurements for artificial defects under HVAC and HVDC voltage stresses for cable insulating materials. *2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics (ICD), Toulouse, France*. 2024. pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICD59037.2024.10613306>
2. Schober B., Schichler U. Separation of partial discharges at DC voltage using PD pulse parameters. *2024 10th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Gangneung, Republic of Korea*. 2024. pp. 272–275. DOI: <https://doi.org/10.23919/CMD62064.2024.10766319>
3. Shen J., Li Y., Li S., Li Z., Wu D., Li Z. The partial discharge characteristics of oil-paper needle-plane insulation defects under pulsating DC voltage. *2024 International Conference on HVDC (HVDC), Urumqi, China*. 2024. pp. 55–58. DOI: <https://doi.org/10.1109/HVDC62448.2024.10722893>
4. Kim J., Jeong M., Lee H., Kim Y., Kang H. Artificial intelligence-based recognition and classification of PRPD patterns in power cable. *2024 10th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Gangneung, Republic of Korea*. 2024. pp. 612–615. DOI: <https://doi.org/10.23919/CMD62064.2024.10766212>
5. Burada E. -D., Popescu M., Nicoară T., Voicu V., Dumbravă I. Methods for reducing electromagnetic disturbances in partial discharge measurement circuits for insulation assessment of high voltage equipment. *2025 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2025 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Timisoara, Romania*. 2025. pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/OPTIM-ACEMP62776.2025.11075231>
6. Li Y., Han J., Du Y., Jin H. Time-frequency maps for multiple partial discharge sources separation in cable terminations. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2023. Vol. 38. No. 3. pp. 2228–2231. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2023.3256127>
7. Montanari G. C., Negri F., Ciani F. Noise rejection and partial discharge identification in HVDC insulation systems. *2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Baltimore, MD, USA*. 2017. pp. 425–428. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIC.2017.8004616>
8. Di Fatta A., Romano P., Imburgia A., Ala G., Rizzo G., Vigni V. L., Albertini M., Bononi S. F. Use of time-frequency map combined with DBSCAN algorithm for separation of partial discharge pulses under DC voltage. *2022 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Denver, CO, USA*. 2022. pp. 427–430. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP55452.2022.9985393>
9. Coutanson F., Zouaghi A., Clerc G., Vollaire C. Impact of harmonic content on partial discharge activity under HVDC. *2024 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Phoenix, AZ, USA*. 2024. pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS55788.2024.11023779>
10. Li B., Zhao S., Zhou Y., Yin Y., Zhao X., Wang Y. Investigation of partial discharge features and inception voltage in cable insulation defects. *2025 IEEE 5th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), Harbin, China*. 2025. pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMPE66159.2025.11122991>

11. Fechner T., Luo Y., Zhou M., Wang H., Xu R., Valtin M. A method for analysis of DC partial discharge measurement data from cable joints. *2025 7th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), Chengdu, China*. 2025. pp. 267–270. DOI: <https://doi.org/10.1109/AEEES64634.2025.11020038>.
12. Won Y., Lee C., Kim J. Analysis of simulated partial discharge waveform and converter noise for the partial discharge diagnosis in HVDC MI submarine cable. *2024 IEEE 14th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Phuket, Thailand*. 2024. pp. 187–190. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPADM61663.2024.10750683>.
13. Lumba L. S., Khayam U., Maulana R. Design of pattern recognition application of partial discharge signals using artificial neural networks. *2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), Bandung, Indonesia*. 2019. pp. 239–243. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEEI47359.2019.8988895>.
14. Giovanna L. D., Guastavino F., Khan I., Raza M. H., Torello E. AI algorithms for post-processing and analysis of partial discharge signals during ageing of insulation. *2025 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Manchester, United Kingdom*. 2025. pp. 805–808. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP61707.2025.11218575>.
15. Boczar T., Zmarzły O., Koziół M. Application of artificial intelligence tools for partial discharge classification. *2025 IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Lodz, Poland*. 2025. pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDL63868.2025.11068282>.

Trotsenko Ye.O., Nesterko A.B., Protsenko O.R., Peretyatko Yu.V. CHALLENGES AND APPROACHES TO DIAGNOSTICS OF PARTIAL DISCHARGES IN INSULATION OF HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT SYSTEMS

The article considers modern research directions in the study of partial discharges in high-voltage insulation under various applied voltage regimes, including alternating, direct, and combined voltages with ripples. It is shown that the ongoing global transition of power systems toward the widespread use of high-voltage direct current (HVDC) power transmission necessitates a revision of traditional approaches to the analysis and diagnosis of partial discharges that were originally developed for alternating current conditions. The differences in the physical mechanisms of initiation and development of partial discharges in dielectrics under direct voltage stress are summarized, taking into account space charge accumulation, polarization effects, and the absence of phase-angle reference for discharge pulses. Modern methods for representing and processing partial discharge signals in high-voltage direct current systems are analyzed, in particular time-domain and time–frequency approaches, which make it possible to improve measurement reliability and noise immunity. Special attention is paid to the investigation of partial discharges under pulsating direct voltage conditions, which are characteristic of converter transformers and other HVDC equipment, where the superposition of direct and alternating voltage components significantly affects the electrical and temporal characteristics of discharges. A synthesis of experimental results is presented, demonstrating the dependence of the intensity and polarity of partial discharge pulses on the waveform of the applied voltage. The features of partial discharge diagnostics in high-voltage direct current cable lines are considered, including issues such as low discharge repetition rates, signal attenuation, and the influence of electromagnetic interference. The possibilities of applying artificial intelligence and machine learning methods for automated classification of partial discharges and identification of insulation defects are analyzed. It is shown that the combination of physically based models and intelligent data processing methods is a promising approach for improving the effectiveness of diagnostics and the reliability of high-voltage electrical equipment.

Keywords: high-voltage direct current, high-voltage alternating current, insulation diagnostics, voltage ripples, power cables, partial discharges.

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026