УДК 621.314.222.6.017.39

ОГЛЯД ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ В СЕРЕДОВИЩІ SMART GRID

РЕВА І.В. аспірант, кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: cgdizainer@gmail.com;

БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;

ТОДОРОВ О.В. аспірант, кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: olehtodorov@gmail.com;

БЕЗЗУБ М.А. аспірант, кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: bezzubmax@gmail.com;

Мета роботи. *Застосування аналітичного аналізу на наявних на практиці методах моніторингу силового трансформатора задля класифікації та систематизації наявної інформації для виявлення раціональних, із позиції експлуатованого електричного вимірювального обладнання трансформаторних підстанцій.*

Методи дослідження. *Використання методів аналітичної класифікації та систематизації наявних методів моніторингу, в полі практичних досліджень та отриманих польових результатів.*

Отримані результати. *Силові трансформатори залишається сердцем енергомережі та мережі Smart Grid будь-якого рівня ієрархії структури та архітектури. Як правило трансформатор як коштористний елемент мережі вводять в експлуатацію один раз і тримають його в робочих навантаженнях, чередуючи моніторинг та планові відновлювальні роботи, до повної втрати ним робочого стану, необхідного до вимог функціювання. Тому більшість трансформаторів знаходяться в експлуатації понад регламентований нормовану документацією період в понад 20 років. Проводячи в необхідність гнучкій аналітичній оцінці та класифікації наявних уже методів моніторингу силового трансформатора , систематизації відомої інформації для більш широкого кола спеціалістів енергетичної галузі.*

Наукова новизна. *Встановлено, що через складність сучасних методів моніторингу необхідний час на їх вибір та використання відповідно до структури трансформатора зменшується із збільшенням систематизації та класифікації віповідного методологічного матеріалу. Представлена систематизація зменшує витрату часу та матеріальних ресурсів при виборі необхідного методу моніторингу силового трансформатора.*

Практична цінність. *Систематизаційна класифікація наявних методів моніторингу в відповідній привязці до сімей методів та зон моніторингового монтування для пошуку сигналу трансформаторних відмов.*

Ключові слова: силовий трансформатор; методи моніторингу; класифікація методів; структуризація; діагностика; діагностика трансформатора; аналіз методології.

I. ВСТУП

Силові трансформатори залишаються сердцем енергомережі та мережі Smart Grid [1]будь-якого рівня ієрархії, структури та архітектурию Із приходом Smart Grid ускладнився контроль та звязки між елементами та присутнім в них функціоналом. Збільшилася увага до таких понять узагальнючих технологій як Transformer Monitoring Systems[2] як ніша інтелектуального обладнаднання, а з ним фокус на стан самого трансформатора залежить від робочого середовища, кваліфікації робочого персоналу та частоти попереднього обслуговування. За результами досліджень [3], у більшості трансформаторів проявлення неполадок (аномалій) та виникнення аварій у активних вузлах відбувається у діапазоні від 30-49 років служби. Це поломки обмоток спричинені різними типами замикань, пробій ізоляційних матеріалів, спричинених роботою в змінних режимах що супроводжуються температурним навантаженням із зміною хімічних властивостей матеріалу ізолятора. В якому відбувається пробій вивідних втулок ізолятора.Також відбувається погіршення якості контактних з'єднань та механізму РПН, що посилюють нерівномірні навантаження та вібрації трансформатора. З метою протидії розвитку деструктивних сценаріїв що спричиняють вищеназвані несправності проводиться моніториг силового трансформатора. Відповідно до стандарту ISO 18095:2018 [4] моніторинг трансформатора проводиться контролем електричних, механічних, хімічних, енергетичних чи інших фізичних параметрів за будь-якого з'єднання обмоток та типу трансформатора від-

© Рева І. В., Бялобржеський О. В., Тодоров О. В., Беззуб М. А., 2022
DOI 10.15588/1607-6761-2022-1-3

повідно внутрішній моніторинг останніх регламентує стандарт IEEE C57 [5] та IEC 60076 [6].За даними стандартами розраховують верхню граничну температуру масла, температуру гарячих плям та термін служби ізоляції трансформатора на основі емпіричних формул. Що дозволяє визначити плив температури та зниження терміну життя ізоляції на збереження життєвого циклу трансформатору. Кожний із них має в своєму складі суттєві розбіжності в технічному виконанні, вимірюваних параметрах та розрахованих даних, трактуванні результатів, можливості монтажу, тощо. Виникає необхідність в класифікації наявних методів моніторингу силового трансформатора, систематизації відомої інформації.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Авторами робилися спроби описати робочі методи моніторингу трансформаторів, що спостерігаються з початку 2000 коли автор роботи [7] описав уразливі фукціональні частини трансформатора та вказав на методи діагностики що ґрунтуються на моніторингу параметрів масла, таких як температура та кількість частотних розрядів, електричної цілісносності при контролі струму та напруги ізоляції. Що були випробуванні в робочих режимах. Автор виділяє методи, що здійснюють котроль параметрів виводів втулок за допомогою коефіцієнта потужності та методу ємності С.Основним принципом методу є рівність суми струмів до нулю при симетричній трифазній системі , при цьому аналіз стану виводу здійснюється за виміряними значеннями струмів, що перевіряються векторним значенням додавання струмів отриманих із ємності або розрахованих як коефіцієнти потужності. Для перевірки маслонаповнених трансформаторів під навантаженням автор фокусує свою увагу на методі частотного розряду та методі контролю тиску частного розряду для баку (танку) трансформатора. Крім цього значне охоплення мають методи діагностики механічних частин трансформатора, особливо під навантаженням. Однак дані результатів та параметри, що отримані в умовах моніторингу механічних частин суттєво відрізняються для різних типів конструкцій трансформаторів. Що ускладнює унифікацію в їх трактуванні результатів на різних підстанціях. Цих проблем позбавлені методи термічного контролю (вимірювання диференційної температури, диференційної температури із установленим значенням межі та температурного індексу та методи вібро-акустичного моніторингу, що базуються на записі сигналу акустичної хвилі роботи трансформатора та порівння його з середнім зразком в розділі двох смуг частот, де на високих діапазонах виявляються електричні проблеми, а на низьких механічні в зоні РПН трансформатора. Авторами [8] розглянуто практичну реалізацію методів DGA, RVM, Insulation Resistance, Polarization Index в умовах роботи трансформатора під навантаженням, виявлено наявність недоліків, в особливості не проаналізовано наявні методи моніторингу при його роботі в режимах відключення від мережі (Off-Line). Даної проблеми позбавлена робота [9] де було систематизовано ієрархічну структуру та наявні методи відповідно до зони використання, де були розглянуті та описані, а також проведено розділення більшості електричних методів базованих на параметрах струму в підгрупи. Автор констатує що на практиці застосування аналізу газу (DGA) залишається релевантним , адже метод може ідентифіковувати близько 70 відсотків наявних несправностей, поряд із тим автор підкреслює що незважаючи на появу нових методів діагностики таких як: вимірювання імпульсу часткового розряду PD високочастотним трансформатором струму (HFCT)[10], методи аналізу частотно-доменних структур, такі як :частотна спектроскопія (FDS), Аналіз частотної характеристики розгортки (SFRA) більшість результатів отриманих в реальних умовах складно трактувати одним результатом, що створює труднощі при створенні узагальнючих стандартів для даних методів. Автор аналізує вимірювально-розрахункові методи моніторингу параметрів трансформатора, проте не розглядає альтернативних методів моніторингу із більшою точністю в оцінці параметрів. Також слід зазначити, що розглянутий метод грунтується на акустичному моніторинзі і розрахований лише для часткову розряду, що ускладнює його застосування для інших параметрів та методів в описі електричної підгрупи. Які наявні за твердженнями [10] як підгрупа акустичних методів, що застосовні для трансформаторів малої та середньої потужності як засоби ефективно моніторингу процесів пов’язаних із старінням трансформатора. Для методів акустичного дослідження часткових розрядів, автор виділяє методику знаття параметру коефіцієнту мел-частотного кепстру частотної області (MFCC) та лінійне прогнозування з кодовим збудженням (CELP). В даній роботі концентрується лише на актуальних лабораторних методах, не беручи до уваги гібрідні методи, що поєднують в собі математичні розрхунки та компьютерний інтелект.

Автори [11] описали гібридні методи на основі FRA, DGA, SCI при поєднанні із методами розрахунку оптимізації рою частинок (PSO), провели експерименти на моделях із індифікацією параметрів за допомогою підходу поєднання алгоритмів машинного навчання. Таких як (KNN) k наближчих сусідів, (SVM) метод опорних векторів, що в сукупності надало можливість гібридного методу моніторингу із штучним інтелектом. Котрий концентрується лише на зоні масляного баку, обмоток та РПН трансформатора не приймаючи до уваги механічні частини, втулки (виводів). Розглядаючи лише частину активних частин конструкції трансформатора, при цьому не розглядалось використання АНН мереж для більш оптимізованих у часі та ресурсах методів розрахунку.

Автори [12] вдосконалили метод візуального огляду несправностей та моніторингу, інтегруючи CNN що базуючись на нейронних мережах на базі компьютерного розпізнавання зображеннь пошко-

джень трансформаторної обмотки використовуючи алгоритми глибокого навчання . Показники наведених вище методів можуть бути трактовані із суперечливи результатами. Проблемою багатьох методів є наявність різного трактування стандартів, відповідно при цьому для кожного типу конструкції трансформатора не завжди кореткно можна дати оцінку опертивному стану обладнання під час обочого режиму. Автори [13] здійснили систематизацію застосованих на практиці електричних методів діагностики за 10 діагностичними техніками, однак не розкрили їх відповідність режимам роботи трансформатора що застосовуються в системах моніторингу трансформатора таким чином, узагальнена класифікації методів діагностики стану трансформаторів для задач моніторигну, з використанням наявного електровимірювального обладнання трансформаторних підстанцій відсутня.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є аналіз застосованих на практиці методів моніторингу силового трансформатора, для виявлення раціональних, із позиції експлуатованого електричного вимірювального обладнання трансформаторних підстанцій.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Моніторинг силового трансформатора представлений комплексними системними продуктами, суттєво відмінними по функціоналу, призначенню, ціновому діапазону. Системи контролю та стану трансформатора розділяються у своїй роботі на складні та прості. Складні для кожної його конструктивної частини із інтегрованими датчиками для передачі сигналів чи параметрів явищ, протікаючих в режимі активної роботи. Прості системи для контролю параметрів живлячої мережі трансформатора чи захисних реле трансформатора.

Результат моніторингу трансформатора – досягнення експлуатаційної та технічно-обслуговуючої оптимізації. При цьому шлях досягнення контролю над явищам та електромагнітними процесами, здійснюється за рахунок та в режимі роботи під навантаженням (On-Line). При цьому в кожній його активній частині конструкції сигналізація відбувається при умовах нормованого та межового відхилення контрольованих параметрів періоді їх виявлення з метою недопущення виникнення неполадок та поломок, що приведуть до непоправних матеріальних втрат. Автором [14] виділяється 4 основні вимоги до систем сучасних систем високовольтного обладнання як трансформатор. По-перше функція первинного інформування від датчиків, що контролюють поточний стан трансформатора до комп'ютера оператора чи регістратора SCADA: інформування про зміну консинстенції масла, ймовірність частотного розряду, температурну градацію активних точок обмоток. По-друге фукцію контролю навантаження та режиму роботи трансформатора, що залежать від якості та характеру споживача. По-третє контроль параметрів розумної енергосистеми в якій знаходиться трансформатор, стеження за перебігом перехідного процесу. Почетверте оптимальна оцінка конструкції трансформатора, за рахунок математичних моделей та характеристик відображаючи процеси, що протікають в трансформаторі, на основі яких система моніторингу проводить оцінку стану трансформатора.

Розглядаючи силовий трансформатор в процесі роботи та моніторингу деструктивних явищ та процесів, що проявляють себе в його активних частинах, спричиненими впливом старіння (зменшення фізичних та хімічних властивостей матеріалів під дією часу), агресивного робочого середовища. Слід класифікувати та систематизовувати зони силового трансформатора як мапа із 5 зон активних частин трансформатора, найбільш уразливих до відпрацювань та поломок. До яких підбирають застосовану на практиці систему методів зібраних та розділених відповідно до застосованого робочого режиму для трансформатора (Режим з навантаженням On-Line і без навантаження Off-Line), з наступним узагальненям відповідно до спільності фізичних ознак методів між собою. Це дозволить гнучко вибирати метод відповідно до вище описаної ієрархічної концепції систетизованої у вигляді блок-схеми.

На (рис.1.) представлена блок-схема де методи розподіляють по категоріях фізичної природи основного процесу чи явища. Наступною особливостю класифікації є відповідність режиму роботи трансформатора як без підключеного навантаження так із підключеним навантаженням. Із урахуванням особливості конструкції трансформатора та його роботи в режимах навантаження, визначення моніторингових параметрів може бути доступним лише для певних методів і короткий час робочого дня..

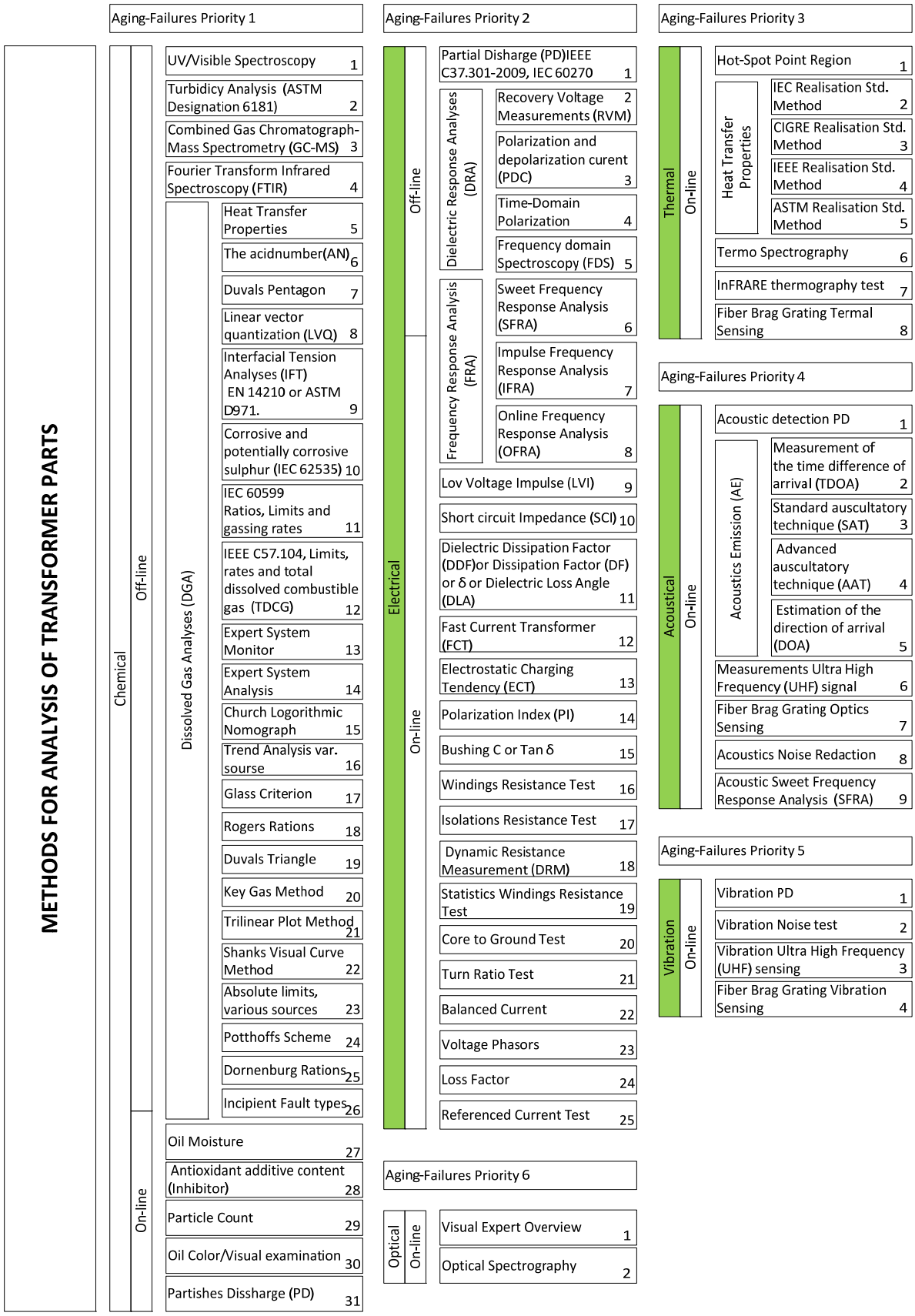

Рисунок 1. Таблична структура класифікація методів моніторингу силового трансформатора.

Електричні методи представлені методиками, що застосовуються для електричних та енергетичних процесів та їх параметрів. Що є показниками явищ та процесів що передують поломкам трансформатора таких як: опір, ударна напруга, кут діелектричних втрат, ємність витоку, утвореного в маслонаповненому трансформаторі. Котрі можуть бути індентифіковані на ранніх етапах на основі разноманітних методів електричної оцінки кількості та типу наявних електричних сигналів.

1) Група методів вимірювання часткових розрядів (англ. Partical Disharge(PD)) метод, що базується на визначенні розряду локалізованого часткового пробою ізоляції PD поступово погіршують стан ізоляції, яка втрачаючи властивості стає вразливою до пробою із присутніми витковими та міжвитковими замиканнями. Задля недопущення критичних пошкоджень цілісність ізоляція ВН обладнання повинна бути підтверджена за допомогою аналізу на частотний заряд PD під час його виготовлення, його введення в експлуатацію та протягом робочих років служби. PD може бути пов'язані з робочою напругою, напругою, індукованою основним магнітним потоком, напругою, індукованою блукаюча струмом. Джерело PD також може впливати на процеси старіння, що призводять до змін стану ізоляції та до незворотної деградації ізоляційних матеріалів. Можна виділити два методи виявлення на основі параметрів близьких до електричних: звичайне вимірювання PD, що базується на вимірі значення імпульсу заряду за заданий проміжок часу та методи для надвисокої частоти (УВЧ). Звичайний електричний спосіб полягає у підключенні датчиків для виміру імпульсу частотного розряду, параметрів та місця розташування його сигналу та система зборута обробки даних. У трансформаторах зазвичай використовуються ємнісні та індуктивні датчики. Вхідний ввід трансформатора використовується як датчик ємнісного зв’язку, а струм вимірюється за допомогою високочастотного трансформатора струму (HFCT). Звичайні вимірювання відповідно до IEC 60270, використовують звичайний метод у випадках відомого знаходження видимого заряду, виміряний в pC, який представляє інтегрований імпульс струму, викликаний PD. Імпульс струму PD має короткий час наростання і випромінює магнітні хвилі з частотами до від 100 МГц до 2 ГГц діапазонів, отже, електромагнітна хвиля, генерована PD, має частотну складову в діапазоні УВЧ. По мірі поширення імпульсів PD через обмотку трансформатора вони зазнають значних спотвореннь та загасання. Виявлення сигналу PD для моніторингу трансформатора досягається завдяки чутливості сигналу в відповідній смузі пропускання цього сигналу. На противагу цьому Виявлення надвисоких частот (УВЧ) є звичайною та безперервною процедурою моніторингу PD для силових трансформаторів. Цей метод розрахований під сигнал електричний резонанс в діапазон частот від 100 МГц до 2 ГГц для розпізнавання та ідентифіковування місце розташування PD. Оскільки датчик встановлений всередині трансформатора, екрануючий ефект бака допомагає придушити будь-які зовнішні шуми. Крім того, низьке ослаблення сигналу в масляній ізоляції та висока чутливість для вимірювання на місці, розширили використання цього методу для тестування трансформаторів.

2) Відомі три методи, згадані до аналізу діелектричної реакції (англ. Dielectric Respounse Analyses (DRA): (1) Вимірювання відновленої (зворотної напруги) (англ. Recovery Voltage Measurment (RVM)), іноді також зване вимірюванням зворотної напруги (RV); Струм поляризації та деполяризації (англ. Polarization and Depolaratizion Current (PDC)); Спектроскопія частотної області (англ. Frequency Domain Spectroscopy (FDS)). Метод відновленої напруги (RVM), - це метод у часовій області для дослідження повільно протікаючих поляризаційних процесів. Стан ізоляції може бути фізично контрольовано різними параметрами вимірювання RV, включаючи максимальну пікову напругу, величину центральну постійна часу та поляризаційний спектр, що відображають рівень наявності вологи в ізоляції. Це найменша неруйнівна діагностична методика полягає у подачі постійної напруги *Uc* над електроди повністю розрядженого досліджуваного об'єкта. Як правило, напруга постійного струму становить від 0,5 до 2 кВ застосовується до тестового об'єкта. Протягом періоду зарядки *Td* струм поляризації *Ipol(t)* тече через тест-об'єкт. Після цього періоду тестовий об'єкт замикається (заземлюється) і деполяризаційні потоки *Idepol(t)* течуть по провіднику. Проте обидва струми не вимірюються. Після визначеного період розряду *Td*, напруга відновлення, *UR(t)* вимірюється при відключенні джерела постійного струму. Після закінчення періоду короткого замикання (заземлення) заряд, обмежений поляризацією, буде перетворюються на вільні заряди, тобто між електродами на діелектрику буде накопичуватися напруга. RV вимірюється в умовах розімкнутого контуру. Послідовність RVM повторюється послідовно для часу зарядки *Tc* для значень, що варіюються від 1 до 1200 с. Використовуване співвідношення часу зарядки та часу розрядки (*Tc/Td*) дорівнює 2. Отримана крива, *Umax* як функція *Tc*, називається спектром поляризації. Початкова похідна (*Sr=dUR/dt*) відновлювальної напруги також знайдена і може бути побудована як функція *Tc*. Однак кілька дослідників повідомляли, що RVM являє собою складну сукупність індивідуальних ефектів нафти та паперу та їх вологи та умов старіння . Вміст вологи в твердій ізоляції впливає і на цей «спектр», але це не можна відокремити від провідності масла.

3) Метод Струм поляризації та деполяризації (англ. Polarization and Depolarization Current(PDC)[15] - метод де ступінчаста напруга постійного струму прикладається до повністю розрядженого трансформатору від поляризаційного струму (pA) після чого, вимірюється та записується через деякий час. Тоді система ізоляції замикається і струм деполяризації є

виміряною та фіксується. Ці виміряні зарядні та розрядні струми порівнюються з лабораторними моделями для інтерпретації. Результати можна трансформувати з часової області в частотний домен, якщо потрібно для порівняння з FDS результатом, і навпаки. Трансформація до частотної області виконується, наприклад, коли метод PDC є у поєднанні з методом FDS. У випадках, коли вимірюється лише струм поляризації (PDC) отримується дуже низькочастотна інформація при цьому виконуються вимірювання FDS для набуття високочастотних діелектричних характеристик. Метод також має недолік, як обмежений діапазон частот для вимірювання, що не містять жодної інформації на вищому рівні частоти через кінцевий час наростання імпульсу постійного струму.

5) Метод Спектроскопія частотної області (англ. Frequency domain Spectroscopy (FDS) – тест-метод що базується на записі сигналу відгуку реакція ізоляції, яка піддається впливу змінної напруги на послідовних частотах, це діапазон від 1 кГц до 1 мГц, що підходить для більшості трансформаторів. Метод FDS багаточастотний тестовий сигнал на низьких частотах. Звичайний підхід FDS передбачає використання однієї частоти тестового сигналу для кожного вимірювання послідовних та нижчих вимірюваних частот, які поступово збільшуються з часом. Це нове рішення для багаточастотного тестування скорочує загальний час вимірювання, вимірюючи кілька синусоїдальних коливань одночасно за допомогою дискретного перетворення Фур'є, розділивши окремі коливання в частотну область. Єдиний і помітний недолік вимірювання FDS є його сукупний час вимірювання на низьких частотах, де інформація про вологість є важливою.

Група методів Частотного Аналізу (Характеристик) розгорток (англ.Frequency Response Analysis (FRA)) - це потужний інструмент для вдосконалених оцінок силових трансформаторів для оцінки механічної або електричної цілісністі сердечника та обмоток шляхом вимірювання електричних передавальних функцій у широкому діапазоні діапазон частот. Результати можна порівняти з результатами традиційних випробувань, таких як трансформатор коефіцієнт повороту (TTR), опір обмотки або опір витоку. Відповідно до характеру вхідного сигналу, існує два основні методи вимірювання: аналіз частотно-імпульсної характеристики (IFRA) та методи аналізу частотних характеристик з розверткою (SFRA). У методах IFRA використовується один неперіодичний сигнал як введення або вхід, який вводиться в будь-який з доступних терміналів трансформаторів.

Метод вимірювання частотно-синусноїдної характеристики з розверткою (анг. Sweet Frequency Response Analysis (SFRA) - метод при якому сигнал збуждения що подається на вхід представляє собою синусоїдальний сигнал з амплітудною низької напруги (зазвичай в діапазоні 1–20 В), який подається на вивід трансформатора при розверненні частот (в діапазоні від Гц в млГц). При цьому розраховується їх передаточна функція (TF), що отримумується із відношення виходу на вхід для різних частот. Однією з основних проблем, пов’язаних із SFRA, є обмеження його ефективного тестування з моменту використання метод, вимагає введення тестового сигналу в обмотки трансформатора через високовольтні втулки.

6) Аналіз частотно-імпульсної характеристики (анг. Impulse Frequence Response Analysis IFRA). Методика IFRA дуже швидка (вимагається всього кілька хвилин), навідміну SFRA досить тривала (близько 2 годин), що полягає у введенні імпульсу в кожну фазу обмотки ВН та НН в умовах що обмотки розвантажені. Посилаючи сигнал вхідного імпульсу та знімаючи вихідний імпульс фіксуються дані , що можуть свідчити про зміну форми параметрів кривих обмоток. Результати часової області трансформуються у частоту домен за допомогою алгоритмів швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). *Uin* та *Uout* розраховані для різні частоти. Для обох методів для кожної частоти обчислюється співвідношення *20log(Uout/Uin)* (в дБ). Вимірювання можуть зафіксувати унікальний «відбиток» трансформатора, який можна порівняти з попереднім виміром. Відмінності між ними вказують на те, що механічні та електричні зміни, відбулися всередині трансформатора. Для кожної несправності, вимірюється імпеданс передачі та порівнюється з вихідною частотною характеристикою без дефектів.

Онлайн Аналіз частотно-імпульсної характеристики (анг. Online Frequency Response Analysis OFRA) - Знову ж таки, онлайн-підписи IFRA вимірювались та обчислювались на основі алгоритмів ШПФ та Complex Continuous wavelet transform CCWT[16] від перехідних сигналів. Результат аналізу показав, що підпис на основі CCWT набагато чіткіший, ніж підпис на основі ШПФ, а інформація основних резонансних точок не спотворюється, що свідчить про переевагу запропонованого способу. У експерименті з дефектом деформації з емульованою обмоткою трансформатора, автономні підписи SFRA та онлайн-підписи IFRA здорові і несправні були отримані та порівняні. Результат вказує на те, що деформація обмотки ефективно виявляється за допомогою онлайн-методу IFRA з CCWT алгоритм.

8) Тест подачі імпульсу низької напруги (анг. Lov Voltage Impulse (LVI) - метод заснований на подачі імпульсу короткої низької напруги до однієї обмотки із записом прикладеного імпульсу і ємнісно пов'язаного струму на іншій обмотці або струмі обмотки або вихідної напруги. Зміни ємності між обмотками як зміни ємностей міжобертових обмоток (викликані рухом обмотки) відображаються на зміні форми хвилі вимірюваного струму або напруги. Накопичений досвід на місцях показує що LVI є дуже чутливою методикою для виявлення рухів обмотки. Як правило, випробування LVI вимагає відключення та ізоляції трансформатора від системи. Якщо тест можна зробити онлайн, це було б можливо простіше у вико-

нанні за нижчою вартістю, і це може бути робитися частіше. Це зробить можливим виявити тенденції стану трансформатора і виявити проблеми раніше. Майбутніми авторами представлені модифікованого методу LVP [17]. Перевірка можливості визначення незначних змін в геометрії обмоток викликає значні експериментальні труднощі: це трудомістко і призводить до великих економічних втрат. Кращий спосіб отримати дані про потенційні механічні дефекти можна отримати за допомогою як фізичної моделі трансформатора або шляхом моделювання - моделюючи різні ситуації, пов'язані з дефектами обмотки.

9) Метод коротзамкнутого імпендансу (англ. Short circuit Impedance (SCI)[18] - це традиційний метод виявлення деформації обмотки і осердя. зміщення трансформатора. У тесті SCI напруга зазвичай подається на обмотку ВН і обмотка НН замкнута накоротко. Стаючи основною складовою напруги і струму, прикладеного до Обмотка ВН - це SCI тестованого трансформатора. Оскільки SCI залежить від геометрії обмотки, зміна геометрії обмотки через деформацію призведе до відхилення SCI. Стандартний IEEE std. C57.62, передбачає, що обмотку трансформатора слід розглядати як значну, якщо зміни SCI складають більш ±3% в порівняння із заводською табличкою. Розгортка метод частотного імпедансу (SFI), який розроблений з використанням переваг методів SCI і FRA вперше були застосовані для вивчення коротких замикань внутрішніх обмоток трансформатор власної розробки. Хоча отримані форми цих двох методів різні, значення обох результатів залежать тільки від конструктивних параметрів трансформаторної обмотки і обидва методи можуть використовуватися для діагностики стану трансформатора. Друга відмінність полягає в тому, що значення SCI, отримане за допомогою тесту SFI, можна розглядати як діагностичний. критерій, але тест FRA не забезпечує цієї важливої функції.

11) Група методів Ділектричного дісипаційного фактору, Фатор Дісипації б Дельта або Діелектричний Кут Втрат англ.Dielectric Dissipation Factor (DDF)чи Dissipation Factor (DF) чи Tan δ чи Dielectric Loss Angle (DLA) - методи для оцінки стану втулки. Це випробування зазвичай проводиться при напрузі 10 кВ для втулки на місці вимірювання. Ємність C і DDF діелектрика є складною функцією принаймні двох змінних – частоти і температури, хоча вологість і тиск можуть бути іншими фізичними змінними. Випробовують напругу, тому її характеристики та температура повинні реєструватися. Результати тесту DDF слід порівняти до значень шильдиків або попередніх випробувань. При цьому традиційна Off-line-діагностика має два недоліки: вимірювання проводяться дуже тривалі часові інтервали, які, безумовно, занадто довгі для виявлення прогресуючого розвитку відмови. Крім того, висновки є непрямими, особливо коефіцієнт дисипації tan δ попри робочу температуру не можна виміряти безпосередньо. Тому постійний нагляд відповідно On-line моніторинг ємності C та коефіцієнта дисипації tan δ при робочій температурі є найбільш бажаним.

12) Метод Швидкого струмого перетворення (англ. Fast Current Transform (FCT) – метод, що грунтується на подачі сигналу низької напруги як вхідної точки під час вимірювання функцій передачі в режимі On-line на втулку високої напруги трансформатора. При цьому ємнісне значення втулки залишається відносно постійним у широкому діапазоні частот, фактичний підпис трансформатора не буде забруднений або замаскований через власну частотну характеристику втулки Під час тестування короткозамкнута вилка замінюється індуктором для утворення фільтра низьких частот. Тестові сигнали в діапазоні від 200 кГц до 2,5 МГц подаються у втулку. Для трансформатора з підключенням зірка функція передачі в режимі On-line вимірюється введенням сигналу у фазовому втулку, а реакція записується через вивід нейтральної втулки. Для трансформатора з трикутним з'єднанням відгук вимірюється між двома фазами.

13) Метод виміру параметру Тенденція електростатичного заряджання (англ. Electrostatic Charging Tendency (ECT) - метод, що грунтується на вимірі параметру електростатичного заряджання (ECT), що зростає із збільшенням потоку масла потокового струму. Спостерігалась пряма залежність між ECT та старінням. В останніх роботах було встановлено, що вміст розчинених продуктів розпаду і зважені частинки також є чинниками, що сприяють вимірювання ECT в силових трансформаторах досі є настільки ж важливим. Оскільки на ECT впливає об'ємний опір, часткові розряди (PD) та діелектричні втрати, ємнісний датчиком було запропоновано оцінити поведінку силового трансформатора щодо електричної та електричної небезпеки. Цей ємнісний датчик призначений для On-line - моніторингу небезпеки в трансформаторі. Одним із найбільш часто застосовуваних для вимірювань є міні-статичний тестер (MST). Однак протокол MST не враховує а кількість факторів, які можуть вплинути на ECT, таких як повітря та швидкість введення. Ось чому деякі модифікації були зроблені різними авторами для підвищення точності протоколу та забезпечення відтворюваність вимірювань.

14) Метод виміру Індекс поляризації (англ. Polarization Index (PI) Індекс ПІ - це відношення опору ізоляції, виміряний після подачі напруги протягом 10 хв (*R10*), до *ROI*, виміряного лише через одну хвилини (*R1*). Цей показник, незалежно від температури, був введений для виявлення забруднених або мокрих обертових машин, що намотують ізоляцію. OI та PI використовувались електроенергетикою для тривалого часу для встановлення стану вологи трансформатора. Польові вимірювання зазвичай проводяться відразу після знеструмлення трансформатора. Таким чином на місці вимірювань, зазвичай відбувається міграція води, трансформатор знаходиться в нерівноважному стані. За таких обставин великі теплові коливання

можуть вплинути на результати, оскільки розподіл вологи всередині ізоляція знаходиться не в повному рівноважному стані.

16) Метод-тест виміру опору обмотки трансформатора (англ. Windings Resistance Test) – метод виміру опору обмотки трансформатора що грунтується на розрахунку втрат провідника обмотки *I2R*, де *I* - номінальний струм обмотки в амперах, а *R* - виміряний опір обмотки постійного струму. Як тип використовуються вимірювання опору обмотки тест, а також звичайний тест. Для подальшого порівняння слід записати температуру вимірювання та опір переведений в еталонну температуру. Варіація більше 5% може свідчити про пошкодження обмоток. Опір обмотки трансформатора можна виміряти або методом вольтметр-амперметр, або мостовим методом. Стандарт IEEE Std C57.12.90 вказує на те, що метод мосту повинен застосовується у випадках, коли номінальний струм обмотки трансформатора менше 1А, тоді як вольтметр-амперметр застосовується, коли номінальний струм обмотки трансформатора дорівнює 1А або більше.

17) Метод-тест виміру параметру Опіру Ізоляції (англ. Isolations Resistance Test) - один із традиційних методів, що використовується для визначення погіршення ізоляції трансформатора, сухості або несправності обмоток або заземлення сердечника. Висока напруга постійного струму (типові значення від 1 кВ до 5 кВ) застосовується до випробовуваної обмотки. Вимірюється струм витоку і розраховується ОІ і позначається приладом. У сухому або менш забрудненому трансформаторі резистивний струм витоку малий і постійний. У поганій ізоляції, резистивний струм витоку, який складається з чотирьох різних компонентів (провідність, ємність, поглинання та поверхневі витоки, кожен з яких додає до складеної реакції) досить великий і може з часом збільшуватися. ОІ-профілі здорових систем ізоляції виглядають як зворотня експоненціальна функція за формою через чотири основні складові струму, дві з них зменшуються в геометричній прогресії. Вимірювання проводяться через 1, 2, 5, 50 та 100 хв. Якщо дві послідовні вимірювання дають однакові результати, тест може бути зупинений, а значення використовуються для розрахунку ОІ.

18) Метод Вимірювання Динамічного опору обмотки (англ. Dynamic Resistance Measurement (DRM)- автономний, неруйнівний метод випробування, заснований на струмі постійного струму, що вводиться через обмотку та перемикач під час переміщення по всіх його положеннях. Випробувальний струм записується з високою роздільною здатністю. Крім того, одночасно з випробувальним струмом можна записати струм двигуна РПН. Висока частота дискретизації дуже важлива через швидкі процеси переходу (час переходу резистора типу OLTC становить приблизно 50мс.). Метод DRM зарекомендував себе як дуже ефективний метод для раннього виявлення можливих несправностей на пристроях РПН під навантаженням (OLTC). Цей тест може бути використаний для виявлення таких проблем, як повільний час переходу, розрив ланцюгів, проблеми з контактами, перехідні резистори, механізм, управління двигуном та багато іншого.

19) Метод Вимірювання Статичного опору (англ. Statisics Windings Resistance Test - Це стандартне випробування проводиться для вимірювання фактичного значення опору обмотки трансформатора та відповідних послідовних компонентів. Статичне вимірювання дає єдине значення, залежне від температури, в Омах.

20) Метод випробувань Сердечник до Землі (англ. Core to Ground Test) - це метод випробування на заземлення сердечника проводиться шляхом від'єднання заземлення сердечника поза резервуаром і від резервуару. Виміряється ОІ сердечника до землі. Цей тест виконується як звичайне завдання технічного обслуговування для виявлення якщо сердечник змістився, встановивши контакт із його резервуаром, але зазвичай це виконується, коли трансформатор є перший встановлений, переміщений або якщо проблема виявляється аналізом розчиненого газу (Disolved Gas Analysis DGA) зі збільшенням горючих газів. Типові значення складають близько 10 МОм або вище. Значення нижче 100 кОм можуть вказувати основні проблеми заземлення. У деяких випадках застосовуються опори (зазвичай порядку декількох кОм) до заземлених розділених пакетів для ламінування серцевини. Вимірювання струму заземлення сердечника в режимі експлуатації показують значення порядку мА для добре ізольований сердечник; якщо сердечник має несправності заземлення, сила струму становить кілька ампер або навіть вище.

21) Метод випробування випробування коефіцієнта обертання трансформатора (англ. Turn Ratio Test)– це випробування коефіцієнта обертання трансформатора проводиться за допомогою введення напруги, фаза за фазою та відведення за допомогою втулки, вимірюючи відповідне відношення напруги для відповідних обмоток, яке порівнюється з очікуваним співвідношенням таблички на паспорті. Оскільки в 3-фазних силових трансформаторах потрібно мати на увазі групу з'єднань, в деяких конфігураціях коефіцієнт обертання трансформатора повинен розраховуватися з виміряного коефіцієнта напруги за деякими формулами перетворення; струм намагнічування також повинен бути мінімальним, використовуючи низькі напруги в введенні, і таким чином зменшуючи падіння напруги на імпедансі первинної обмотки, що може бути основним джерелом помилок; коротко, обладнання для випробування коефіцієнта обертання силового трансформатора повинно мати спеціальну конструкцію, з особливими експлуатаційними характеристиками та точністю, відповідно до процедури та діапазону.

22) Метод збалансованого струму (англ. Balanced Current) - це метод який також називають методом

суми струмів, є найбільш вживаним сьогодні методом моніторингу втулок.[19] Принцип полягає в тому, що за ідеальних обставин суми струмів витоку трьох втулок різних фаз з урахуванням його фазових кутів дорівнюють нулю. Ідеальні обставини означають, що величина напруги абсолютно однакова, зсув фази між фазами рівно 120 градусів, а втулки всі одного типу і мають всі однакову температуру.

23) Метод виміру фазорів напруги втулок (англ. Voltage Phasors) - Принцип вимірювання базується на так званому методі напруги моніторингу втулок в режимі On-line. Метод не отримав[20] широкого застосування через труднощі з точним вимірюванням фазових векторів напруги на вимірювальних виводах втулки. Це призвело до неточної оцінки tgδ. Переваги цього методу підтверджуються також результатами аналізів, що розглядають можливість вимірювання вищих гармонік лінійних напруг в системах контролю втулок.

24) Метод виміру параметру фактору втрат (англ. Loss Factor) – це метод базується на традиційній Off-line-діагностиці має недоліки: вимірювання проводяться дуже тривалі часові інтервали, які, занадто довгі для виявлення прогресуючого розвитку відмови. Крім того, висновки є непрямими, особливо коефіцієнт дисипації tan δ та робочу температуру не можна виміряти безпосередньо. Тому постійний нагляд відповідно On-line моніторинг ємності C та коефіцієнта дисипації tan δ при робочій температурі є найбільш бажаним. Ці дані містять цінну інформацію: Часткові поломки, які вимагають негайних дій, можуть бути виявлені за зміною простої потужності в момент часткової поломки.

25) Метод-тест струму джерела (англ. Referenced Current Test) – це метод базований на вимірі різниці фаз втулки струмового витоку де еталона напруга буде виміряна та встановлено що 90° - різниця фаз являє собою кут дельти[21]. Виміряна різниця фаз являє собою прямий кут Θ. Використовуючи середньоквадратичне значення витоку струму та середньоквадратичне значення фази розраховується напруга ємністі.

V. ВИСНОВКИ

В процесі роботи була сформована таблична класифікація систематизація методів моніторингу активних частин силового трансформатору при яких було встановлено .що найбільш практичними та доступними для аналізу є електричні методи.

Електричні методи базуючись на електричних процесах заряду та розряду, частотної характеристики напруги та струму, вплив частотного розряду є найбільш чутливими до деградації ізоляційного матеріалу в активних частинах силового трансформатора, передбачаючи зміни параметрів, що характеризують проблеми поломок активних частин трансформатора , найбільш вживаним серед них є метод частотного аналізу SFRA, котрий застосовується і в інших методах для перевірки критичних параметрів. Проблемою більшості електричних методів є те що їх застосовання лімітоване часовим діапазоном і при його порушенні може проявитися негативна тенденція до підвищення рівня старіння ізоляції та її передчасного руйнування. Також особливістю електричних методів поряд із чутливостю є великий вплив електромагнітного поля сердечника, що призвести до некоректних результатів у звязку із його насиченням і різницею вимірів в різні проміжки дня робочого навантаження. Слід зазначити що багато вчених стверджують що електричні методи вносять електромагнітні шуми, котрі впливають на роботу інших методів таких як акустичні та вібраційні, що ускладнює їх роботу в комплексі із мультипотоковою передачею сигналу і вимагає затрат на встановлення необхідного екранування. Методи частотного аналізу залишаються універсальним інструментом для спостереження за магнітно-електричною системою трансформатора через дороговизну та неможливість застосування в навантаженому режимі конкурентів. Однак нинішній рівень ізолюючих матеріалів уже дозволяє нівелювати дану проблему в підстанціях із більшим бюджетом. Сучасні тренди продовжують модифіковувати роботу частотного аналізу інтегруючи трактування експертних систем IEC/CIGREE додаючи методи нейронних мереж, що в свою чергу впливає на вимоги до обчислювальної техніки необхідної для даного методу в мобільних умовах. Активною альтернативою являється дослідження частотних розрядів гібридними методами, коли крім електричних параметрів досліджених у різних сигнальних спектрах фіксують явища впливу частотних розрядів, світлові вібраційні і теплові і тд. формуючи гібридну результативну систему.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Khalil, S. S., Abu-Rub, H. (2016). Smart Grid Condition Assessment: Concepts, Benefits, and Developments. *Power Electronics and Drives*, Qatar, 36(2), 147-163. doi:10.5277/PED160209

[2] Chouhan, S., & Inan, H., & Rizzo, C. (2009). A compendium of smart grid technologies, NETL, DOE, USA, pp. 30-31.

[3] Матусевич О.О., (2015),Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій: монографія, Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп.ім. акад. В. Лазаряна, 2015, 295 с.

[4] ISO18095, (2018), Condition monitoring and diagnostics of power transformers. Switzerland, p 54.

[5] IEEE Std C57.12.10-2017,(2017),(Revision of IEEE), Standard Requirements for Liquid-Immersed Power Transformers, p 55.

[6] IEC 60076-11:2018, (2018), Power transformers - Part 11: Dry-type transformers, p 124

[7] Chu, D., Lux, A., (1999), On-Line Monitoring of

Power Transformers and Components: A Review of Key Parameters, *Paper presented at the Proceedings from IEEE Electrical Insulation Conference & Electrical Manufacturers and Coil Winding Exposition*, Cincinnati, 669-675, doi:10.1109/EEIC.1999.826290

[8] Dhingra, Khushdeep A., Deepak S., Kumar. (2008). Condition monitoring of power transformer: A review. *Paper presented at the Proceedings from 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition* 1-6, doi:10.1109/TDC.2008.4517046.

[9] Islam, M.M., Lee, G. and Hettiwatte, S.N. (2017). A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers. *Electrical Engineering,* 100(2). pp. 581-605, doi:10.1007/s00202-017-0532-4.

[10] Sikorski, W., Walczak, K., Gil, W., Szymczak, C. (2020).On-Line Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers Based on the Simultaneous Detection of High Frequency, Ultra-High Frequency, and Acoustic Emission *Signals, Energies.* 2020; 13(12):3271,doi:10.3390/en13123271.

[11] Tang, W. H., Wu, Q.H. (2011),Condition monitoring and assessment of power transformers using computational intelligence, Springer-Verlag, London 2011, p.200, doi:10.1007/978-0-85729-052-6

[12] Duan, J., & He, Y., & Wu, X., & Zhang, H., & Wu, W. (2019). Anti-Interference Deep Visual Identification Method for Fault Localization of Transformer Using a Winding Model. *Sensors*. 19. 4153. doi:10.3390/s19194153.

[13] Meira, M., & Ruschetti, C. R. & Álvarez, R., & Verucchi, Carlos. (2018). Power transformers monitoring based on electrical measurements: State of the art., *IET Generation, Transmission & Distribution.* 12,doi;10.1049/iet-gtd.2017.2086.

[14] Русов В.А., (2012), Диагностический мониторинг высоковольтных силовых трансформаторов, Пермь: DIMRUS, 2012. – 159 с.

[15] Duplessis, J., Ohlen, M. (2015). A smart way to minimize test time for transformer dielectric measurements, *Transformers Magazine,* 2(4), str. 44-51. Preuzeto s: https://hrcak.srce.hr/181931

[16] Zhao, Z., Tang, C., Yao, C., Zhou, Q., Xu, L., Gui, Y., Islam, S. (2018) Improved method to obtain the online impulse frequency response signature of a power transformer by multi scale complex CWT, *Paper presented at the in IEEE Access*, vol. 6, pp 48934-48945, doi:10.1109/ACCESS.2018.2868058

[17] IEC60270, (2015), High-voltage test technique, Partial discharge measurements, November 2015, p 247

[18] N'cho J. S., Fofana I., Hadjadj Y. and Beroual, A., (2016) Review of Physicochemical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers, *Reprinted from: Energies* 2016, 9, 367, doi:10.3390/en9050367

[19] Xie B, Zhao D and Hong T (2020) Transformer Monitoring and Protection in Dynamic Power Systems – A Review. *Front. Energy Res*. 8(150). doi: 10.3389/fenrg.2020.00150

[20] Lachman M.F., Walter W., Guggenberg P.A., (2000), On-line diagnostics of high-voltage bushings and current transformers using the sum current method, *Paper presented at the Proceedings from IEEE Transaction. on Power Delivery.,* 15(1), pp.155-162, Jan.2000, doi:10.1109/61.847244

[21] Gil, W., Masowski, W., Wronek, P., (2020), Overvoltages & Transients Identification In On-line Bushing Monitoring, *Journal of Energy*, 69(3), p. 20–24, doi:10.37798/202069340

Стаття надійшла до редакції 10.02.2022

ОБЗОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И СИСТЕМ МОНИТОРИНГА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В СРЕДЕ SMART GRID

РЕВА І.В. аспирант, кафедры систем электроснабжения и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: cgdizainer@gmail.com;

БЯЛОБРЖЕСКИЙ О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем электроснабжения и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;

ТОДОРОВ О.В. аспирант, кафедры систем электроснабжения и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: olehtodorov@gmail.com;

БЕЗЗУБ М.А. аспирант, кафедры систем электроснабжения и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: bezzubmax@gmail.com;

Цель работы. *Применение аналитического анализа на имеющихся на практике методах мониторинга силового трансформатора для классификации и систематизации имеющейся информации для выявления рациональных, с позиции эксплуатируемого электрического измерительного оборудования трансформаторных подстанций.*

Методы исследования. *Использование методов аналитической классификации и систематизации имеющихся методов мониторинга, в поле практических исследований и полученных полевых результатов.*

Полученные результаты. *Силовые трансформаторы остаются сердцем сети и сети Smart Grid любого уровня иерархии структуры и архитектуры. Как правило трансформатор как коштористний элемент сети вводят в эксплуатацию один раз и держат его в рабочих нагрузках, чередуя мониторинг и плановые восстановительные работы, к полной потере им робочого состояния, необходимого с требованиями операции. Поэтому большинство трансформаторов находятся в эксплуатации более регламентирован нормированую документацией период более чем 20 лет. Проводя в необходимость гибкой ана- литической оценке и классификации имеющихся уже методов мониторинга силового трансформатора, систематизации известной информации для более широкого круга специалистов энергетической отрасли.*

Научна новизна. *Установлено, что из-за сложности современных методов мониторинга необходимо время на их выбор и использование в соответствии со структурой трансформатора уменьшается с увеличением систематизации и классификации методологического материала. Представлена систематизация уменьшает расход времени и материальных ресурсов при выборе необходимого метода мониторинга силового трансформатора.*

Практическая ценность. *Систематизационная классификация имеющихся методов мониторинга в соответствующей привязке к семьям методов и зон мониторингового монтирования для поиска сигнала трансформаторных отказов.*

Ключевые слова: силовой трансформатор; методы мониторинга; классификация методов; структризация; диагностика; дианостика трансформатора; анализ методологии.

REVIEW OF ELECTRIC METHODS AND SYSTEMS FOR MONITORING POWER TRANSFORMERS IN THE SMART GRID ENVIRONMENT

REVAV I.V.	PhD student, Department of electricity consumption system and power management of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: cgdizainer@gmail.com;
BIALOBRZHESKYI O.V.	PhD, Department of electricity consumption system and power management of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;
TODOROV O.V.	PhD student, Department of electricity consumption system and power management of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: olehtodorov@gmail.com;
BEZZUB M.A.	PhD student, Department of electricity consumption system and power management of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: bezzubmax@gmail.com;

Purpose. *Application of analytical analysis on the available methods of monitoring the power transformer in order to classify and systematize the available information to identify rational, from the standpoint of operated electrical measuring equipment for transformer substations.*

Methodology. *The use of methods of analytical classification and systematization of existing monitoring methods in the field of practical research and obtained field results.*

Findings. *Power transformers remain the heart of the power grid and Smart Grid network of any level of the hierarchy of structure and architecture. As a rule, the transformer as an estimated element of the network is put into operation once and kept in working loads, alternating monitoring and scheduled restoration work, until the complete loss of working condition required for the operation requirements. Therefore, most transformers are in operation over the regulated period of more than 20 years.Carrying out the need for flexible analytical assessment and classification of existing methods of monitoring the power transformer, systematization of known information for a wider range of specialists in the energy sector.*

Originality. *It is established that due to the complexity of modern monitoring methods the time required for their selection and use in accordance with the structure of the transformer decreases with increasing systematization and classification of the relevant methodological material. The presented systematization reduces the cost of time and mate-*

rial resources when choosing the necessary method of the power transformer monitoring.

Practical value. *Systematic classification of available monitoring methods in the appropriate relation to the families of methods and zones of monitoring mounting to search for a signal of transformer failures.*

Keywords: power transformer; monitoring methods; classification of methods; structuring; diagnostics; transformer diagnostics; analysis of methodology.

REFERENCES

[1] Khalil, S. S., Abu-Rub, H. (2016). Smart Grid Condition Assessment: Concepts, Benefits, and Developments. *Power Electronics and Drives*, Qatar, 36(2), 147-163. doi:10.5277/PED160209

[2] Chouhan, S., & Inan, H., & Rizzo, C. (2009). A compendium of smart grid technologies, NETL, DOE, USA, pp. 30-31.

[3] Matusevich OO., (2015), Monografy Adequate methodology of the system and technical service and repair of traction power stations: monograph, Dnipropetrovsk: Dnipropetr. nat. un-t zalizn. transp.im. acad. V. Lazaryan, 2015 .-- 295 p.,

[4] ISO18095, (2018), Condition monitoring and diagnostics of power transformers. Switzerland, p 54.

[5] IEEE Std C57.12.10-2017,(2017),(Revision of IEEE), Standard Requirements for Liquid-Immersed Power Transformers, p 55.

[6] IEC 60076-11:2018, (2018), Power transformers - Part 11: Dry-type transformers, p 124

[7] Chu, D., Lux, A., (1999), On-Line Monitoring of Power Transformers and Components: A Review of Key Parameters, *Paper presented at the Proceedings from IEEE Electrical Insulation Conference & Electrical Manufacturers and Coil Winding Exposition*, Cincinnati, 669-675, doi:10.1109/EEIC.1999.826290.

[8] Dhingra, Khushdeep A., Deepak S., Kumar. (2008). Condition monitoring of power transformer: A review. *Paper presented at the Proceedings from 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition* 1-6, doi:10.1109/TDC.2008.4517046.

[9] Islam, M.M., Lee, G. and Hettiwatte, S.N. (2017). A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers. *Electrical Engineering*, 100(2). pp. 581-605, doi:10.1007/s00202-017-0532-4.

[10] Sikorski, W., Walczak, K., Gil, W., Szymczak, C. (2020).On-Line Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers Based on the Simultaneous Detection of High Frequency, Ultra-High Frequency, and Acoustic Emission *Signals, Energies*. 2020; 13(12):3271,doi:10.3390/en13123271.

[11] Tang, W. H., Wu, Q.H. (2011),Condition monitoring and assessment of power transformers using computational intelligence, Springer-Verlag, London 2011, p.200, doi:10.1007/978-0-85729-052-6

[12] Duan, J., & He, Y., & Wu, X., & Zhang, H., & Wu, W. (2019). Anti-Interference Deep Visual Identification Method for Fault Localization of Transformer Using a Winding Model. *Sensors.* 19. 4153. doi:10.3390/s19194153.

[13] Meira, M., & Ruschetti, C. R. & Álvarez, R., & Verucchi, Carlos. (2018). Power transformers monitoring based on electrical measurements: State of the art., *IET Generation, Transmission & Distribution.* 12,doi;10.1049/iet-gtd.2017.2086.

[14] Rusov, V.A., (2012), Diagnostic monitoring of high-voltage power transformers, Perm: DIMRUS, 2012. - 159 p..

[15] Duplessis, J., i Ohlen, M. (2015). A smart way to minimize test time for transformer dielectric measurements, *Transformers Magazine*, 2(4), str. 44-51. Preuzeto s: https://hrcak.srce.hr/181931

[16] Zhao, Z., Tang, C., Yao, C., Zhou, Q., Xu, L., Gui, Y., Islam, S. (2018) Improved method to obtain the online impulse frequency response signature of a power transformer by multi scale complex CWT, *Paper presented at the in IEEE Access*, vol. 6, pp 48934-48945, doi:10.1109/ACCESS.2018.2868058

[17] IEC60270, (2015), High-voltage test technique, Partial discharge measurements, November 2015, p 247

[18] N'cho J. S., Fofana I., Hadjadj Y. and Beroual, A., (2016) Review of Physicochemical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers, *Reprinted from: Energies* 2016, 9, 367, doi:10.3390/en9050367

[19] Xie B, Zhao D and Hong T (2020) Transformer Monitoring and Protection in Dynamic Power Systems – A Review. *Front. Energy Res.* 8(150). doi: 10.3389/fenrg.2020.00150

[20] Lachman M.F., Walter W., Guggenberg P.A., (2000), On-line diagnostics of high-voltage bushings and current transformers using the sum current method, *Paper presented at the Proceedings from IEEE Transaction. on Power Delivery*., 15(1), pp.155-162, Jan.2000, doi:10.1109/61.847244

[21] Gil, W., Masowski, W., Wronek, P., (2020), Overvoltages & Transients Identification In On-line Bushing Monitoring, *Journal of Energy*, 69(3), p. 20–24, doi:10.37798/202069340