

ШПАЧУК ОЛЕКСАНДР

Філія «Відокремлений підрозділ «Хмельницька АЕС»

<https://orcid.org/0000-0001-6946-2551>e-mail: shpachuk2@gmail.com

ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ЧАСТОТНОГО ВІДГУКУ

Старіння основних виробничих фондів електричних станцій та системоутворювальних підстанцій, необхідність продовження строку експлуатації є основними причинами, що обумовлюють необхідність широкого впровадження нових методів оцінки технічного стану основного обладнання електростанцій та підстанцій. Одним з методів, що дозволяє отримати додаткову інформацію щодо стану магнітопроводу, обмоток та ізоляційної системи силових трансформаторів є метод аналізу частотного відгуку. Проте, наявні документи, що регламентують порядок виконання виміру та аналізу результатів частотного відгуку, в значній мірі спираються на досвід безпосереднього виконавця робіт, що виконує підготовку вимірних схем, безпосередні вимірювання та аналіз отриманих результатів.

В роботі розглянуто: вимоги існуючих нормативних документів, рекомендації міжнародних організацій та звіти дослідницьких груп щодо підготовки та реалізації виміру частотного відгуку трансформатора, основні дефекти, що можуть бути виявлені методом аналізу частотного відгуку, вимірні схеми та діапазони частот на яких відображаються ті чи інші дефекти, математичний апарат для аналізу результатів вимірювань та критерії їх оцінки.

Запропоновано граничні значення коефіцієнтів кореляції та коефіцієнтів абсолютної суми логарифмічних помилок на визначених діапазонах частот, що дає змогу визначити стану трансформатора за результатами аналізу частотного відгуку. Для таких дефектних станів, як радіальна чи осьова деформація обмотки, загальний об'ємний зсув, або виткові замикання обмотки запропоновано діапазони частот та граничні значення коефіцієнтів кореляції та коефіцієнтів абсолютної суми логарифмічних помилок для додаткового підтвердження зазначених дефектних станів за допомогою ємнісних та індуктивних вимірів частотного відгуку між обмотками трансформатора. Також запропоновано класифікацію ступеню розвитку дефектів.

Ключові слова: силовий трансформатор, магнітопровід, обмотка, ізоляція, аналіз частотного відгуку.

SHPACHUK OLEKSANDR

Branch office «Separated subdivision «Khmelnitsky Nuclear Power Plant»

DIAGNOSTIC OF POWER TRANSFORMERS USING THE METHOD OF FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS

Aging of the main production assets of power stations and system-forming substations, the need to extend the period of operation are the main reasons that determine the need for the widespread introduction of new methods of assessing the technical condition of the main equipment of power stations and substations. One of the methods that allows to obtain additional information about the state of the magnetic circuit, windings and insulation system of power transformers is the frequency response analysis method. However, the available documents regulating the procedure for measuring and analyzing the results of the frequency response are largely based on the experience of the direct executor of the work, who performs the preparation of measurement schemes, measurements and analysis of the obtained results.

The work considers: the requirements of existing regulatory documents, recommendations of international organizations and reports of research groups on the preparation and implementation of the measurement of the frequency response of the transformer, the main defects that can be detected by the method of frequency response analysis, measurement schemes and frequency ranges on which certain defects are displayed, a mathematical apparatus for analyzing the results of measurements and their evaluation criteria.

The limit values of the correlation coefficients and coefficients of the absolute sum of logarithmic errors in the specified frequency ranges are proposed, which makes it possible to determine the state of the transformer based on the results of the frequency response analysis. For such defective states as radial or axial deformation of the winding, total volumetric displacement, or winding turns, frequency ranges and limit values of correlation coefficients and coefficients of the absolute sum of logarithmic errors are proposed for additional confirmation of the indicated defective states by means of capacitive and inductive measurements of the frequency response between transformer windings. Classification of the degree of development of defects is also proposed.

Keywords: power transformer, transformer core, winding, insulation, frequency response analysis.

Постановка проблеми

Старіння основних виробничих фондів електричних станцій та системоутворювальних підстанцій, необхідність продовження строку експлуатації є основними причинами, що обумовлюють необхідність широкого впровадження нових методів оцінки технічного стану основного обладнання електростанцій та підстанцій.

Одним з методів, що дозволяє отримати додаткову інформацію щодо стану магнітопроводу, обмоток та ізоляційної системи силових трансформаторів є метод аналізу частотного відгуку. Проте, наявні нормативні документи, що регламентують порядок виконання виміру та аналізу результатів частотного відгуку, в значній мірі спираються на досвід безпосереднього виконавця робіт, що виконує аналіз отриманих результатів. Тому навіть за якісної підготовки вимірної схеми та усунення усіх можливих завад, що можуть вплинути на результати вимірювань, невирішеним питанням лишається аналіз отриманих результатів, а саме алгоритм прийняття рішення, щодо відсутності чи наявності того чи іншого типу дефекту, а також ступеню його розвитку.

З описаного вище випливає, що існує актуальна науково-практична задача з розробки формальних критеріїв оцінки технічного стану трансформаторів за результатами аналізу частотного відгуку, що дозволило б знизити вплив рівня знань та досвіду експерта на прийняття рішення, щодо технічного стану трансформатора.

Для виконання поставленої задачі пропонується проаналізувати вимоги існуючих нормативних документів, щодо визначення типів вимірювань, переліку схем вимірювань, переліку дефектів трансформаторів, що можуть бути виявлені за певними типами та схемами вимірювань у певних частотних діапазонах, а також виробити алгоритми прийняття рішень, щодо визначення технічного стану трансформатора.

В даній роботі об'єктом дослідження є процеси зміни технічного стану силових трансформаторів. Предметом дослідження є методи і засоби контролю технічного стану електричних параметрів силових трансформаторів. Метою дослідження є розробка алгоритму визначення технічного стану силових трансформаторів за допомогою аналізу частотного відгуку, що зменшує вплив виконавця робіт на кінцевий результат діагностування.

Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз частотного відгуку надає діагностичну інформацію у формі передатної функції, що відповідає RLC-мережі об'єкту вимірювання. RLC-мережа визначається фізичною геометрією та конструктивними особливостями об'єкту вимірювання. Фізичні зміни у вимірюваному зразку змінюють параметри RLC-мережі і, як наслідок передатну функцію. Такі зміни можуть бути результатом різних типів електричних чи механічних збурень (пошкодження при транспортуванні, сейсмічні сили, погіршення якості пресування, короткі замикання, пошкодження чи старіння ізоляції і т.п.).

Отримання масиву даних щодо стану досліджуваного трансформатора здійснюється шляхом виконання таких видів вимірювань: вимір на відкритому колі (open circuit measurement), вимір з закороченими колами (short circuit measurement), ємнісний вимір між обмотками (capacitive inter-winding measurement) та індуктивний вимір між обмотками (inductive inter-winding measurement). Хоча усі зазначені вимірювання несуть певну інформацію про стан RLC-мережі досліджуваного трансформатора, проте не для всіх видів вимірювань детально проаналізовані частотні діапазони відхилення коефіцієнтів кореляції в я в яких можуть свідчити про наявність того чи іншого виду дефекту. Так, наприклад, результати вимірів на відкритому колі та виміру з закороченими колами на характерних діапазонах частот можуть бути використані для виявлення основних дефектів, як то радіальної чи осьової деформації обмоток, загального об'ємного зсуву, розпушування обмоток, дефектів осердя, збільшення перехідного опору у внутрішніх контактних з'єднаннях трансформатора чи виткових замикань. [1] В той же час ємнісний вимір між обмотками може слугувати в якості додаткового критерію для оцінки наявності дефектів, що впливають на геометричні розміри обмоток, старіння ізоляції, чи її забруднення; результати індуктивного виміру між обмотками можуть бути використані для уточнення наявності виткових замикань обмотки.

Відповідно до стандарту [2] з метою аналізу розглядається три частотних діапазони: низькочастотний (1кГц-100кГц), середньочастотний (100 кГц-600кГц) та високочастотний (600кГц-1000кГц). Для вказаних частотних діапазонів розраховуються значення показника R (R_{LF} – для низькочастотного діапазону, R_{MF} – для середньочастотного діапазону, R_{HF} – для високочастотного діапазону) за співвідношеннями.

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left(x(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \right)^2, \quad (1)$$

$$D_y = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left(y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \right)^2, \quad (2)$$

$$C_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\left(x(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \right)^2 \times \left(y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \right)^2 \right], \quad (3)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{C_{xy}}{\sqrt{D_x \cdot D_y}}, \quad (4)$$

$$R_{xy} = \begin{cases} 10 \cdot n_{pu} & 1 - \sigma < 10^{-1} \\ -\log_{10}(1 - \sigma) & \end{cases}. \quad (5)$$

Після розрахунку вказаних показників відбувається аналіз результатів для визначення деформації обмотки відповідно до вказівок: сильна деформація наявна за умови $R_{LF} < 0,6$; очевидна деформація - $(1,0 > R_{LF} \geq 0,6)$ або $(R_{MF} < 0,6)$; незначна деформація - $(2,0 > R_{LF} \geq 1,0)$ або $(0,6 \leq R_{MF} < 1,0)$ та нормальний стан обмотки за умови $(R_{LF} \geq 2,0)$, $(R_{MF} \geq 1,0)$ і $(R_{HF} \geq 0,6)$. Недоліком такого підходу є відсутність можливості оцінки стану магнітопроводів трансформаторів.

В документі [1] розглядається широкий перелік дефектів, а також частотних діапазонів та вимірювальних схем в яких вони мають найбільший вплив на характеристику частотного відгуку. Розглядаються такі основні частотні діапазони [20 Гц – 10 кГц], [5 кГц – 100 кГц], [50 кГц – 1 МГц] для визначення таких дефектів, як радіальна деформація обмотки, осьова деформація обмотки, загальний

об'ємний зсув, дефекти осердя, опір контактних з'єднань, виткові замикання, обриви обмоток. Додаткові частотні діапазони такі як [20 Гц – 500 кГц], [500 кГц – 2 МГц], [1 МГц – 5 МГц] використовуються для визначення дуже специфічних дефектів як обриви екранів та розпушування обмотки при транспортуванні трансформатора. Також запропоновано орієнтовні плани виконання вимірювань для різних типів трансформаторів. Для аналізу результатів вимірювань і визначення типу дефекту пропонується розраховувати коефіцієнт кореляції (CC) даних отриманих за аналогічних вимірювальних схем за співвідношенням показаним нижче

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N ((x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (6)$$

де виразі x_i та y_i - i -і значення в дБ з наборів даних x і y , \bar{x} і \bar{y} – середні значення наборів даних x і y , N – кількість вимірюваних даних (кількість вимірів), набори даних x і y – частотний відгук 1-го та 2-го виміру відповідно.

Проте документ не позбавлений недоліку, що може бути критичним при впровадженні методу діагностування в організаціях без значного досвіду проведення вимірів та аналізу результатів частотного відгуку, а саме відсутні числові граничні значення коефіцієнтів кореляції для частотних діапазонів, що розглядаються.

В стандарті [3] викладено основні підходи до організації та виконання вимірів характеристик частотного відгуку, описано основні дефекти, що можуть бути виявлені методами аналізу частотного відгуку, але відсутні граничні числові значення коефіцієнтів кореляції, що визначають той чи інший дефект, тому в значній мірі якість виконання робіт залежить від досвіду виконавця вимірювань та аналізу.

В роботі [4] детально розглянуто вимоги до технічних та метрологічних характеристик вимірювального обладнання для виконання виміру та аналізу частотного відгуку, особливості підготовки вимірювальних схем, основні дефекти, що можуть бути виявлені вказаним методом та розглянуто кілька прикладів використання зазначеного методу діагностування для оцінки стану силових трансформаторів в різних енергосистемах. Щодо аналізу результатів вимірювань, то в зазначених документах вказується на значну залежність результатів діагностування від кваліфікації та досвіду виконання робіт.

В дисертації [5], за результатами обробки експериментальних даних та моделювання різного типу дефектів силових трансформаторів та їх впливу на характеристики частотного відгуку, запропоновано граничні числові значення CC та коефіцієнту абсолютної суми логарифмічних помилок (ASLE) для визначення стану елементів обладнання та ступеню розвитку дефектів. Коефіцієнт абсолютної суми логарифмічних помилок обчислюється за виразом, що показано нижче

$$ASLE = \frac{\sum_{i=1}^N y_i - x_i}{N}, \quad (7)$$

де виразі x_i та y_i - i -і значення в дБ з наборів даних x і y , N – кількість вимірюваних даних (кількість вимірів), набори даних x і y – частотний відгук 1-го та 2-го виміру відповідно.

Граничні значення коефіцієнтів CC та ASLE, що запропоновані в роботі [5] показані в таблиці нижче.

Таблиця 1

Граничні значення коефіцієнтів CC та ASLE для визначення стану обмотки

Орієнтовний стан, або пропозиції	CC		ASLE
	Порівняння відгуків з іншою фазою, або аналогічним обладнанням	Порівняння відгуків однієї обмотки	Порівняння для усіх станів
Хороший стан	0,95 – 1,0	0,98 – 1,0	<1,0
Пограничний стан	0,9 – 0,94	0,96 – 0,97	1,0 – 1,7
Необхідно провести додаткові виміри, або можливий дефект	< 0,9	< 0,96	> 1,7

Як бачимо, запропонований перелік станів не в повній мірі перекриває всю множину значень коефіцієнтів кореляції, що може призвести до спірних ситуацій при прийнятті рішень про ступінь розвитку того чи іншого дефекту.

В роботі [6] запропоновано метод визначення дефектів силових трансформаторів шляхом порівняння характеристик частотного відгуку та контролю додаткових діагностичних параметрів, запропонованих за результатами виявлених відхилень характеристик.

Виклад основного матеріалу

Оскільки виконання аналізу частотного відгуку трансформатора базується на порівнянні частотних характеристик за певних схем вимірювання на визначених діапазонах частот, надзвичайно важливим є виконання так званого базового виміру. В ідеальному випадку базовий вимір повинен бути виконаний на новому змонтованому справному трансформаторі, проте зважаючи на теперішній стан трансформаторного енергосистеми України припустимим буде прийняття в якості базового виміру на трансформаторі,

справність якого може бути підтверджена результатами вимірювань відповідно до [7], або на трансформаторі після капітального ремонту.

Для виконання вимірювань необхідно розробити перелік схем вимірювань відповідно до [1] та здійснити їх з урахуванням рекомендацій, що викладені у [1, 3, 4]. Наступним кроком є розрахунок для відповідних схем вимірювань показників CC та $ASLE$ для визначених діапазонів частот. За відсутності даних та досвіду попередніх вимірювань, при виконанні базового виміру порівняння слід виконувати для наборів даних між фазами трансформатора. За наявності банку даних вимірювань на трансформаторах аналогічної конструкції, року виробництва та заводу-виробника варто виконати як порівняння між фазами так і порівняння з відповідними фазами аналогічного обладнання. При виконанні повторних вимірів, періодичних, чи після протікання через трансформатор струму короткого замикання, слід виконувати порівняння з даними базового виміру.

Для визначення наявності певного стану об'єкту вимірювання пропонується прийняти граничні значення CC та $ASLE$ з урахуванням опису дефектів у рекомендаціях [1] та роботі [5]. Приймемо, що суттєвим відхиленням коефіцієнту кореляції при порівнянні з іншими фазами чи аналогічним обладнанням будуть значення $CC < 0,9$, а при порівнянні відгуків однієї обмотки $CC < 0,96$; показник $ASLE > 1,7$ відповідно. Незначне відхилення характеризуватимуть значення $CC \in [0,9; 0,95]$ при порівнянні відгуків інших фаз або аналогічного обладнання та $CC \in [0,96; 0,97]$ для відгуків однієї обмотки. Незначне відхилення для показника $ASLE$ характеризуватиметься значеннями в межах діапазону $[1,0; 1,7]$. Відхилення коефіцієнтів CC для інших фаз, або аналогічного обладнання у межах $[0,95; 1,0]$ та при порівнянні відгуків однієї обмотки $[0,97; 1,0]$ та показника $ASLE < 1,0$, прийматимемо як такі, що обумовлені впливом розташування вимірювальних провідників, погодних умов, сусіднього обладнання, що працює.

Визначимося з поняттями «дефект», «бездефектний стан», «перехідний стан», «стан типового дефекту», «стан нетипового дефекту» у частині застосування їх для аналізу частотного відгуку. Дефект – це зміна RLC-мережі трансформатора (об'єкту вимірювань), що визначається сукупністю відхилень коефіцієнтів кореляції, або аналогічних показників, на певних діапазонах частот за певних типів вимірювань. Бездефектний стан – це стан трансформатора (об'єкту вимірювань) за якого зміни його RLC-мережі не впливають на характеристику частотного відгуку більше ніж шуми при виконанні вимірювань. Бездефектним станом вважатимемо такий за якого показники CC та $ASLE$ на усіх частотних діапазонах прийматимуть значення: для відгуків інших фаз або аналогічного обладнання $CC \in [0,95; 1,0]$ або для відгуків однієї обмотки $CC \in [0,97; 1,0]$ та $ASLE < 1,0$. Перехідний стан – це стан трансформатора (об'єкту вимірювань) за якого зміни його RLC-мережі впливають на характеристику частотного відгуку на рівні незначних відхилень коефіцієнтів кореляції на певних діапазонах частот за певних схем вимірювань, що дає змогу ідентифікувати наявність дефекту на ранній стадії розвитку. Перехідний стан визначатимуть такі умови: CC та $ASLE$ на основних частотних діапазонах та схем вимірювань - для відгуків інших фаз або аналогічного обладнання $CC \in [0,9; 0,95]$, або для відгуків однієї обмотки $CC \in [0,96; 0,97]$ та $ASLE \in [1,0; 1,7]$ та додаткові діапазони і схеми для інших фаз, або аналогічного обладнання у межах $[0,95; 1,0]$ та при порівнянні відгуків однієї обмотки $[0,97; 1,0]$ та показника $ASLE < 1,0$. Типовий дефектний стан – це стан трансформатора (об'єкту вимірювань) за якого зміни в його RLC-мережі впливають на характеристику його частотного відгуку на рівні суттєвих та незначних відхилень коефіцієнтів кореляції на визначених діапазонах частот за визначених схеми вимірювань. Типовим дефектом називатимемо такий, що має опис характеру зміни частотного відгуку у [1]. Стан типового дефекту визначатимуть такі умови: CC при порівнянні з іншими фазами чи аналогічним обладнанням будуть $CC < 0,9$; при порівнянні відгуків однієї обмотки $CC < 0,96$; показник $ASLE > 1,7$ та додаткові діапазони і схеми для інших фаз або аналогічного обладнання та $CC \in [0,96; 0,97]$ для відгуків однієї обмотки, $ASLE \in [1,0; 1,7]$. Стан нетипового дефекту – це стан трансформатора (об'єкту вимірювань) за якого зміни в його RLC-мережі не можуть бути описані бездефектним та перехідним станом чи станом типового дефекту, але впливають на характеристику його частотного відгуку на рівні суттєвих та незначних відхилень коефіцієнтів кореляції на певних діапазонах частот за певних схем вимірювань. Стан нетипового дефекту визначатимуть такі умови: не виявлено бездефектного стану або типового дефекту та на одному чи кількох частотних діапазонах виявлено при порівнянні з іншими фазами чи аналогічним обладнанням будуть $CC < 0,9$; при порівнянні відгуків однієї обмотки $CC < 0,96$; показник $ASLE > 1,7$.

Складемо таблиці для визначення стану розвитку дефектів трансформатора, що підлягає вимірюванню, базуючись на описах зміни характеристики відгуку, що описані в [1] та прийнятих вище діапазонах CC та $ASLE$. У наведених нижче таблицях прийнято такі умовні позначення: OC – схеми виміру на відкритому колі, SC – схеми виміру на закороженому колі; MF – порівняння наборів даних між фазами одного трансформатора, або аналогічного обладнання, OO – порівняння наборів даних відгуків однієї обмотки того ж трансформатора.

У таблиці 2 показано значення коефіцієнти кореляції в залежності від частотного піддіапазону і схеми виміру для ідентифікації таких дефектів як обрив екрану чи розпушування обмотки при транспортуванні трансформатора. Причиною обривів екранів можуть бути недоліки конструкції, неякісне виконання ремонтних робіт чи заводські дефекти. Причиною розпушування обмотки при транспортуванні можуть бути умови доставки трансформаторів на об'єкт для монтажу, а також низька заводська якість пресування обмотки.

Таблиця 2

Граничні значення коефіцієнту СС для визначення дефектних станів трансформатора та ступеню розвитку таких дефектів як розпушування обмотки при транспортуванні та обрив екрану

Діапазон частот	Схема вимірювань	Набір даних	Коефіцієнти кореляції в залежності від частотного піддіапазону і схеми виміру для ідентифікації певного стану об'єкту та ступеню його розвитку			
			Розпушування обмотки при транспортуванні		Обрив екрану	
			П	Т	П	Т
20 Гц – 500 кГц	OC	МФ	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]
		ОО	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]
	SC	МФ	н/д	н/д	н/д	н/д
		ОО	н/д	н/д	н/д	н/д
500 кГц – 2 МГц	OC	МФ	[0,9; 0,95)	<0,9	[0,9; 0,95)	<0,9
		ОО		<0,96	[0,96; 0,97)	<0,96
	SC	МФ	н/д	н/д	н/д	н/д
		ОО	н/д	н/д	н/д	н/д
1 МГц – 5 МГц	OC	МФ	[0,9; 0,95)	<0,9	[0,9; 0,95)	<0,9
		ОО	[0,96; 0,97)	<0,96	[0,96; 0,97)	<0,96
	SC	МФ	н/д	н/д	н/д	н/д
		ОО	н/д	н/д	н/д	н/д

У таблиці 3 показано значення коефіцієнти кореляції в залежності від частотного піддіапазону і схеми виміру для ідентифікації таких дефектів як радіальна та осьова деформація обмотки, загальний об'ємний зсув, дефекти магнітопроводу, підвищений опір контактних з'єднань в обмотці, виткові замикання чи обриви в обмотці. Причиною радіальної деформації обмотки є вплив надструмів, що спричиняють значні електромагнітні сили, що стискають обмотку. Осьова деформація обмотки має схожий механізм утворення, що і радіальна, відрізняються лише наслідки – обмотка видовжується вздовж осі. Причинами загального об'ємного зсуву обмоток можуть бути як вплив механічних навантажень при транспортуванні чи сейсмічній активності так і вплив значних струмів, що протікають через трансформатор в аварійних режимах роботи іншого обладнання енергосистеми. Причинами дефектів осердя є пошкодження ізоляції між пластинами, втрата заземлення магнітопроводу тощо. Підвищений опір контактних з'єднань та обриви в обмотках можуть бути спричинені неякісно виконаною пайкою обмоток. Причинами виникнення виткових замикань можуть бути старіння та руйнування целюлози, або потрапляння сторонніх предметів, які можуть пошкодити целюлозну ізоляцію, в бак трансформатора підчас ремонтів.

Таблиця 3

Граничні значення коефіцієнту СС для визначення дефектних станів трансформатора та ступеню розвитку таких дефектів як радіальна чи осьова деформація обмотки, загальний об'ємний зсув, підвищений опір контактних з'єднань, виткові замикання чи обрив обмотки

Діапазон частот	Схема вимірювань	Набір даних	Коефіцієнти кореляції в залежності від частотного піддіапазону і схеми виміру для ідентифікації певного стану трансформатора													
			Радіальна деформація обмотки		Осьова деформація обмотки		Загальний об'ємний зсув		Дефекти осердя		Підвищений опір контактних з'єднань		Виткові замикання		Обриви обмоток	
			П	Т	П	Т	П	Т	П	Т	П	Т	П	Т	П	Т
20 Гц – 10 кГц	OC	МФ	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	<0,9	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	<0,9	[0,9; 0,95)	<0,9
		ОО	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	<0,96	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	<0,96	[0,96; 0,97)	<0,96
	SC	МФ	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,9; 0,95)	<0,9	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)
		ОО	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,96; 0,97)	<0,96	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)
5 кГц – 100 кГц	OC	МФ	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,9; 0,95)	<0,9	[0,9; 0,95)	<0,9	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,9; 0,95)	<0,9	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,9; 0,95)	<0,9
		ОО	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,96; 0,97)	<0,96	[0,96; 0,97)	<0,96	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,96; 0,97)	<0,96	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,96; 0,97)	<0,96
	SC	МФ	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,9; 0,95)	<0,9	[0,9; 0,95)	<0,9	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,9; 0,95)	<0,9	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,9; 0,95)	<0,9

		Продовження таблиці 3														
50 кГц – 1 МГц	OC	OO	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,96; 0,97)	<0,96	[0,96; 0,97)	<0,96	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,96; 0,97)	<0,96	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,96; 0,97)	<0,96
		MФ	[0,9; 0,95)	<0,9	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,9; 0,95)	<0,9	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)
	SC	OO	[0,96; 0,97)	<0,96	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,96; 0,97)	<0,96	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)
		MФ	[0,9; 0,95)	<0,9	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,9; 0,95)	<0,9	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)
> 1 МГц	OC	MФ	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)
		OO	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)
	SC	MФ	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)	[0,95; 1,0]	[0,9; 0,95)
		OO	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)	[0,97; 1,0]	[0,96; 0,97)

Аналогічні таблиці можна скласти з використанням коефіцієнту абсолютної суми логарифмічних помилок замінивши приведені значення СС для визначених діапазонів частот на відповідні значення ASLE.

Як вже зазначалося вище, ємнісний вимір між обмотками може слугувати в якості додаткового критерію для оцінки наявності дефектів, що впливають на геометричні розміри обмоток, старіння ізоляції, чи її забруднення, тобто на виявлення таких дефектних станів як радіальна чи осьова деформація обмотки, або загальний об’ємний зсув. Пропонується прийняти, що для додаткового підтвердження наявності радіальної чи осової деформації обмотки, або загального об’ємного зсуву, слід враховувати незначні відхилення у передатних характеристиках, тобто значення $CC \in [0,9; 0,95)$ при порівнянні відгуків інших фаз або аналогічного обладнання та для відгуків однієї обмотки $CC \in [0,96; 0,97)$, або для показника ASLE в межах діапазону $[1,0; 1,7]$. Для уточнення наявності виткових замикань обмотки, аналогічно описаним вище випадкам, враховуватимемо незначні відхилення у передатних характеристиках за результатами розрахунків СС для індуктивного виміру між обмотками. Нижче показано таблицю для аналізу результатів додаткових вимірювань. У наведених нижче таблицях прийнято такі умовні позначення: CIW – схеми ємнісного виміру між обмотками, PIW- схеми індуктивного виміру між обмотками.

Таблиця 4

Граничні значення коефіцієнту СС для додаткового підтвердження наявності радіальної чи осової деформації обмотки, або загального об’ємного зсуву чи виткових замикань

Діапазон частот	Схема вимірювань	Набір даних	Коефіцієнти кореляції в залежності від частотного піддіапазону і схеми виміру для ідентифікації певного стану трансформатора			
			Радіальна деформація обмотки	Осьова деформація обмотки	Загальний об’ємний зсув	Виткові замикання
20 Гц – 10 кГц	CIW	MФ	н/д	н/д	н/д	н/д
		OO	н/д	н/д	н/д	н/д
	PIW	MФ	н/д	н/д	н/д	[0,9; 0,95)
		OO	н/д	н/д	н/д	[0,96; 0,97)
5 кГц – 100 кГц	CIW	MФ	н/д	[0,9; 0,95)	[0,9; 0,95)	н/д
		OO	н/д	[0,96; 0,97)	[0,96; 0,97)	н/д
	PIW	MФ	н/д	н/д	н/д	н/д
		OO	н/д	н/д	н/д	н/д
50 кГц – 1 МГц	CIW	MФ	[0,9; 0,95)	н/д	[0,9; 0,95)	н/д
		OO	[0,96; 0,97)	н/д	[0,96; 0,97)	н/д
	PIW	MФ	н/д	н/д	н/д	н/д
		OO	н/д	н/д	н/д	н/д

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Наявні рекомендації та нормативні документи дають змогу організувати проведення виміру частотного відгуку силових трансформаторів з достатньо високим рівнем точності результатів вимірювань, а також зменшити вплив факторів навколишнього середовища. Проте, в частині виконання аналізу результатів вимірювань та визначення стану силових трансформаторів, наявні керівні документи закликають спиратися на досвід виконання вимірювань та аналізу частотного відгуку та надають лише узагальнений

опис того чи іншого дефектного стану, що є недостатнім, особливо на ранніх етапах впровадження зазначеного методу діагностування.

Запропоновані в роботі граничні значення коефіцієнтів кореляції чи абсолютної суми логарифмічних помилок на визначених діапазонах частот характеристики відгуку надають змогу визначити наявність найбільш поширених та описаних дефектних станів силових трансформаторів, а також розрізнити ступінь їх розвитку. Крім того, запропоновано граничні значення коефіцієнтів кореляції та абсолютної суми логарифмічних помилок для емнісного та індуктивного виміру між обмотками, що дає додаткові можливості для визначення таких дефектних станів як радіальна чи осьова деформація обмотки, загальний об'ємний зсув чи виткові замикання. Зазначені пропозиції дають змогу виконати оцінку стану силових трансформаторів за результатами аналізу частотного відгуку на ранніх етапах впровадження даного методу діагностування за відсутності у спеціалістів досвіду виконання подібного роду робіт.

Наступним кроком в напрямку впровадження методу аналізу частотного відгуку для визначення стану силових трансформаторів має бути розробка галузевого стандарту, що включав би в себе вимоги нормативних документів, рекомендації міжнародних організацій та дослідних груп щодо підготовки до виконання вимірювань, проведення вимірювань та аналізу отриманих частотних відгуків.

Література

1. IEEE Guide for the Application and interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149-2012. 60 p.
2. Frequency response analysis on winding deformation of power transformers. DL/T 911-2004. 20 p.
3. Power transformers – Part18: Measurement of frequency response. IEC 60076-18. 42 p.
4. Mechanical condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA). Working Group A2.26. CIGRE 342. April 2008. 61 p.
5. Yousof M. F. M. Frequency Response analysis for transformer Winding Condition Monitoring. Doctor's thesis: 0906. Queensland, 2015. 155 p.
6. Гришук М. О. Методи та засоби діагностування силових трансформаторів розподільних електричних мереж з фотоелектричними станціями : дис. д-ра філософії : 14:141. Вінниця, 2020. 254 с.
7. Норми випробування електрообладнання (у редакції Наказу Мінекоенерго від 06.04.2020 № 224). СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. – [чинний від 06.04.2020]. – Харків : Видавництво Індустрія, 2021. – 232 с.

References

1. IEEE Guide for the Application and interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. IEEE Std C57.149-2012. 60 p.
2. Frequency response analysis on winding deformation of power transformers. DL/T 911-2004. 20 p.
3. Power transformers – Part18: Measurement of frequency response. IEC 60076-18. 42 p.
4. Mechanical condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA). Working Group A2.26. CIGRE 342. April 2008. 61 p.
5. Yousof M. F. M. Frequency Response analysis for transformer Winding Condition Monitoring. Doctor's thesis: 0906. Queensland, 2015. 155 p.
6. Hryshchuk M. O. Metody ta zasoby diahnostuvannya sylovykh transformatoriv rozpodil'nykh elektrychnykh merezh z fotoelektrychnymy stantsiyamy : dys. d-ra filosofiyi : 14:141. Vinnytsya, 2020. 254 s.
7. Normy vyprobuvannya elektroobladnannya (u redaktsiyi Nakazu Minekoenerho vid 06.04.2020 № 224). SOU-N EE 20.302:2007. – [chynnyy vid 06.04.2020]. – Kharkiv : Vydavnytstvo Industriya, 2021 – 232 s.