

УДК 531.311.62.19

О. Є. Рубаненко¹
О. О. Рубаненко¹
М. О. Гришук²

АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ З ЇХНЬОЮ ДОПОМОГОЮ

¹ Вінницький національний технічний університет;

² ТОВ «Українські технологічні продукти»

У виведених з експлуатації силових трансформаторів 10 кВ, які зберігаються на ремонтних майданчиках АТ «Вінницяобленерго», серед інших є і пошкодження обмоток та магнітопроводу, які можуть бути виявлені шляхом аналізу частотних характеристик трансформатора. Зразковим графіком частотної характеристики силового трансформатора, який застосовується в процесі діагностування, може бути графік, на якому показані середні значення коефіцієнта передачі тестового сигналу приладу FRAnalyzer через силовий трансформатор для однотипних різних справних трансформаторів в залежності від частоти тестового сигналу. Враховуються лише ті результати вимірювань коефіцієнта передачі та лише така кількість вимірювань, за яких відхилення поточних значень не перевищує похибки FRAnalyzer (2 %). Частота тестового сигналу, яку потрібно враховувати для виявлення дефекту, відповідає тій частоті, на якій відхилення значення коефіцієнта передачі частотної характеристики досліджуваного трансформатора відрізняється від значення коефіцієнта передачі (частотної характеристики, побудованої за середніми значеннями однотипних справних трансформаторів) не менше ніж на 2 %. Визначення значення інформативної частоти, яка корелюється з дефектом, здійснюється шляхом власних спостережень та аналізу літературних джерел. На прикладі досліджуваного силового трансформатора типу ТМГ 1000/10 У1 встановлено його дійсний технічний стан. Проте, у діапазоні частот 6060...7010 Гц спостерігались стрибкоподібні відхилення, які пропонується попередньо вилучати з розрахунків, вважаючи їх промахами.

Ключові слова: діагностування, технічний стан, трансформатор, частотна характеристика.

Вступ

Відомо [1], [2], що силовий трансформатор (СТ) займає вагомe місце в енергетичній системі будь-якої розвиненої країни. Цьому сприяють не лише технічні причини, але й економічні. Враховуючи це, варто зазначити, що від надійної роботи силових трансформаторів залежить якісна робота енергосистеми в цілому А це напряму залежить від залишкового ресурсу СТ [4]. Тому підтримання силового трансформатора в справному стані є важливим завданням для підприємств, що експлуатують СТ. Однак, в Україні понад 40 % силових трансформаторів розподільних електричних мереж відпрацювали понад 30 років, що перевищує їх паспортний ресурс (25 років). Разом з тим, автори [5]—[9] стверджують, що технічний стан СТ залежить від того, як експлуатувати СТ. Часто дефекти СТ мають місце протягом всього часу експлуатації СТ, враховуючи складність та специфіку їхньої роботи.

В наш час в Україні швидко зростає кількість фотоелектричних станцій (ФЕС) та генерована ними електрична потужність. Ці ФЕС часто керовані напругою, яка передається по розподільним електричними мережам енергопостачальних організацій. Інвертори ФЕС є нелінійними елементами розподільних мереж. ФЕС мають змінний графік генерування, залежний від погодних умов, спричиняючи: перехідні процеси, появу високочастотних та низькочастотних гармонік (порівняно з промисловою частотою), зміни струмів та напруг, — в обладнанні 10 кВ підприємств районних електричних мереж під час увімкнень та вимкнень ФЕС. Неузгоджене зростання генерованої ФЕС

електричної потужності перевантажує СТ підприємств районних електричних мереж, що особливо небезпечно в умовах експлуатації трансформаторів з низьким залишковим ресурсом. Та, як стверджують автори [1], [2], частими пошкодженнями СТ, експлуатованих в Україні, є пошкодження їхніх обмоток та магнітопроводів. Враховуючі велику кількість експлуатованих в РЕМ та на ФЕС СТ 10 кВ, в наш час відсутні системи моніторингу їхнього технічного стану. Отже потрібно впроваджувати засоби періодичного контролю стану СТ з метою якісного виявлення пошкоджень обмоток та магнітопроводу СТ навіть і на ранній стадії їхнього розвитку.

Одним з варіантів виходу з такої ситуації, є своєчасне технічне обслуговування СТ, вчасне виведення їх з експлуатації в ремонт або заміна СТ на нові [10], що дає змогу підприємству-експлуатанту покращити показники надійності СТ та максимально збільшити термін їхнього використання. В наш час відомо багато методів та засобів визначення технічного стану СТ. Наразі в Україні застосовуються методи визначення технічного стану СТ, до прикладу: шляхом контролю тангенса кута діелектричних втрат $\tan \delta$, хроматографічного аналізу розчинених в трансформаторному маслі газів, вимірювання потужності холостого ходу P_{xx} , — які дозволяють виявити дефекти обмоток та магнітопроводу СТ на ранній стадії їхнього розвитку [2]. Разом з тим, силові трансформатори продовжують пошкоджуватись [1], [2]. Це свідчить про те, що варто вдосконалювати не лише існуючі методи та засоби контролю технічного стану СТ, а і забезпечити якісний аналіз результатів контролю, випробовувань та вимірювань діагностичних параметрів. Рішення про поточний технічний стан ґрунтуються на аналізі виявлених дефектів СТ на ранній стадії їхнього розвитку [11]—[13]. Отже, тема статті є актуальною.

Для реалізації такого завдання необхідний надійний інструмент діагностування. Одним із сучасних методів діагностування є метод аналізу графіків (далі — частотних характеристик ЧХ) залежності коефіцієнта передачі напруги тестового сигналу через СТ від частоти цього сигналу.

Метод аналізу ЧХ СТ за допомогою приладу FRAnalyzer — точний та, що головне, неруйнівний засіб дослідження механічної цілісності складових трансформатора, особливо стосовно визначення технічного стану обмоток та магнітопроводу [14]—[16].

Автори в [13]—[15] стверджують що, коли нормативна база частотних характеристик накопичена, то під час визначення технічного стану, можна виконати дослідження СТ та визначити його технічний стан. Однак, з [1] відомо, що визначення поточного стану СТ в Україні обмежено відсутністю нормативної технічної документації. Це обмежує повноцінне використання такого вартісного обладнання, як прилад FRAnalyzer. Разом з тим автори [12], [15] досліджують можливість точнішої інтерпретації отриманих результатів, що за певних умов дасть змогу впевнено визначати поточний технічний стан СТ та навіть прогнозувати подальші дії, що забезпечить підвищення надійнісних показників СТ.

В попередніх роботах [1], [11]—[15] авторів цієї статті висвітлені результати досліджень, під час аналізу яких з накопиченої бази ЧХ вилучено дані, що відповідали випадковій похибці. Але після більш розширеного аналізу автори пропонують розглядати це явище, не як випадкову похибку під час вимірювань та аналізу отриманих результатів, а як показник, що характеризує відхилення отриманої ЧХ від норми і свідчить про імовірний дефект на ранній стадії його розвитку.

В цій статті пропонується дослідити значення впливу стрибкоподібного відхилення параметрів вимірної ЧХ від попередньо отриманих значень для підтвердження можливості існування пошкоджень СТ на ранній стадії їхнього розвитку.

Метою досліджень є покращення якості визначення дефектів силового трансформатора в умовах відсутності раніше виміряних його частотних характеристик.

Відповідно до вказаної мети в роботі розв'язуються такі *завдання*:

1. Дослідити виведені з експлуатації СТ 10 кВ, які зберігаються на ремонтних майданчиках АТ «Вінницяобленерго», проаналізувати їхні пошкодження та дефекти шляхом аналізу їхніх частотних характеристик.
2. Визначити такий графік залежності параметрів СТ, що можна вважати як зразковий під час аналізу його технічного стану СТ.
3. Запропонувати методіку визначення частоти тестового сигналу, яку потрібно враховувати для виявлення дефекту трансформатора.
4. Проаналізувати можливість визначення величини інформативної частоти, яка корелюється з дефектом, здійсненням власних спостережень та використовуючи літературні джерела.
5. На прикладі силового трансформатора, що знаходиться в експлуатації, підтвердити або спростувати наявність його задовільного технічного стану.

Результати досліджень

Приймаючи рішення про можливість подальшої експлуатації чи про доцільність зміни режиму роботи СТ, підприємства-експлуатанти повинні враховувати ризик виходу з ладу СТ [9]. Однак, проблема визначення ймовірності пошкодження полягає в тому, що такий показник зазвичай низький. Часто це спричинено малою кількістю якісної статистичної інформації, яку можна проаналізувати.

З метою збільшення обсягу статистичної інформації про параметри ЧХ проведено низку експериментальних досліджень на підприємствах, що експлуатують СТ класом напруги 6–35 кВ Вінницької, Хмельницької та Херсонської областей рис. 1.

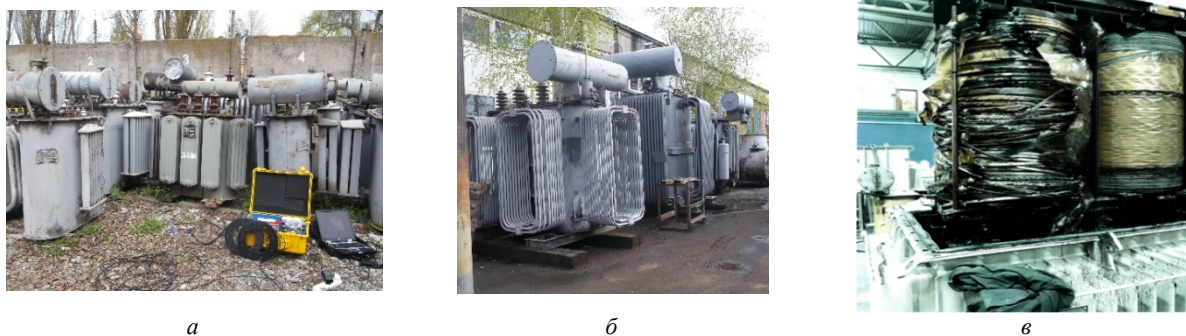


Рис. 1. Досліджувані СТ: *a* — СТ 10 кВ, що вийшли з ладу, на зберіганні до ремонту та прилад FRAnalyzer для аналізу їхнього технічного стану; *b* — СТ 35 кВ до та після ремонту; *в* — обмотки пошкодженого СТ 35 кВ

Дослідження проводились на СТ, які знаходяться в експлуатації, та на СТ, виведених з експлуатації, з метою визначення їхніх пошкоджень. Використовувався метод аналізу параметрів амплітудно-частотних характеристик СТ [13], [14], [17], [18].

Досліджувались також пошкоджені СТ, що зберігаються на ремонтних майданчиках АТ «Вінницяобленерго». Більшість з цих СТ (напругою 10 кВ) експлуатувалися понад 25 років. В результаті досліджень встановлено, що найчастіше пошкодженими є обмотки та магнітопроводи. Це підтвердилося після відкриття бака.



Рис. 2. На дільниці з ремонту СТ АТ «Вінницяобленерго»: *a* — пошкоджені силові трансформатори 10 кВ під час ремонту; *b* — відремонтовані силові трансформатори 10 кВ та діагностичне обладнання

Таким чином, метод аналізу ЧХ є сучасним та перспективним методом діагностування СТ. Відомо, що силовий трансформатор є складною діагностичною системою, яку можна представити як чотириполюсник. Якщо на вхід такого чотириполюсника подавати «тестову» напругу синусоїдної форми різних частот, то на виході отримаємо напругу сигналу «відгуку» на тестову напругу різних частот.

Модуль комплексного коефіцієнта передавання чотириполюсника знаходиться за виразом

$$K(f) = \frac{U_{m\text{ вх}}}{U_{m\text{ вих}}}\bigg|_{f=\text{вар}}, \quad (1)$$

де $U_{m\text{ вх}}$ — амплітудне значення напруги «тестового» сигналу на вході приладу (на виході чотириполюсника), $U_{m\text{ вих}}$ — амплітудне значення напруги «тестового» сигналу на виході приладу (на вході чотириполюсника), f — змінювана частота «тестового» сигналу,

$$u_{\text{вих}}(t) = U_{m\text{ вих}} \sin(\omega t + \psi_{\text{вих}}) \quad \text{та} \quad u_{\text{вх}}(t) = U_{m\text{ вх}} \sin(\omega t + \psi_{\text{вх}}); \quad (2)$$

ω — кутова частота «тестового сигналу», $u_{\text{вх}}(t)$ та $u_{\text{вих}}(t)$ — миттєві значення напруг для моменту часу t , $\psi_{\text{вх}}$ та $\psi_{\text{вих}}$ — початкові фази напруг на вході та на виході приладу.

Застосований авторами відомий метод діагностування СТ передбачає використання приладу FRAnalyzer. Під час досліджень напруга, яка мала форму синусоїди автоматично змінюваної частоти та незмінної амплітуди (з виходу приладу), подавалась на одну з фаз обмотки високої напруги досліджуваного СТ. «Тестова» напруга однієї з фаз обмотки низької (або середньої) напруги подавалась на вхід приладу FRAnalyzer. Апаратно-програмним шляхом для кожної з фіксованих частот напруги на виході приладу FRAnalyzer (в подальшому прилад) визначався модуль комплексного коефіцієнта передачі СТ $k_u(f)$, як відношення виміряних амплітудних значень напруги на вході $U_{\text{амп. вх}, f}$ приладу (для кожного значення частоти f в діапазоні від 10 Гц до 20 МГц) до амплітудних значень напруги на виході $U_{\text{амп. вих}}$ приладу (не залежить від частоти). Далі, з метою зручності аналізу отриманих результатів, подамо модуль комплексного коефіцієнта передачі k чотириполюсника в логарифмічних одиницях для кожної з використаних під час досліджень частот f за таким виразом [11]—[15], [19]:

$$k_{u, f} = 20 \cdot \lg(U_{\text{амп. вх}, f} / U_{\text{амп. вих}}), \text{ дБ}. \quad (3)$$

Це дозволило побудувати графіки залежності (в подальшому — графік) коефіцієнта k_u від f , один з яких показаний на рис. 3 (трансформатор типу ТМГ 1000/10 У1, ЧХ СТ однієї з ФЕС, що розташована в Хмельницькій області).

Під час обробки отриманих графіків, в діапазоні частот тестового сигналу 6060...7010 Гц, виявлено відхилення графіка залежності поточних значень коефіцієнта k від частоти f (на якій отримано k_u) від зразкового графіка (табл. 1 та рис. 4).

Таблиця 1

Відхилення графіка

f , Гц	k , дБ	\bar{k}_u , дБ
6060	-39,38	-40,38
6210	-39,16	-40,16
6360	-68,95	-39,95
6520	-38,72	-39,72
6680	-38,51	-39,51
6840	-38,29	-39,29
7010	-38,08	-39,08

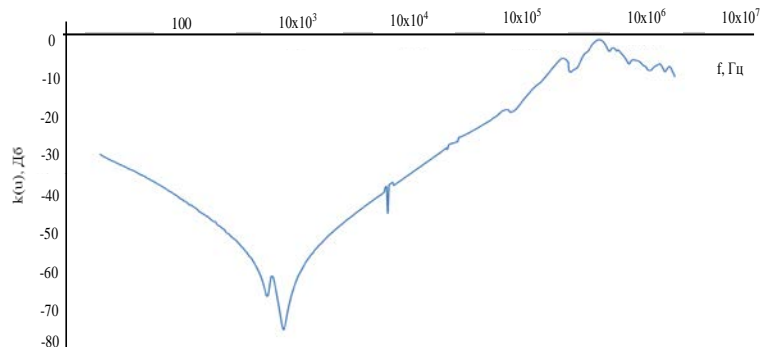
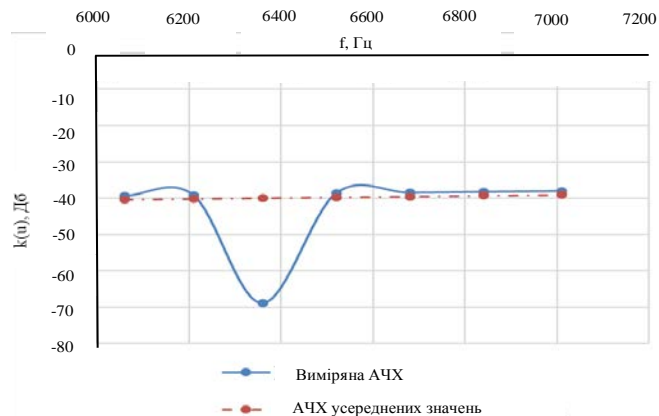
Рис. 3. Графік залежності k_u від частоти f тестового сигналу СТ (фаза В), отриманий під час досліджень на одній з ФЕС в Хмельницькій області

Рис. 4. Порівняння отриманого графіка досліджуваної фази В

Як значення параметрів зразкового графіка автори пропонують брати усереднені значення коефіцієнта k_u , отримані за результатами досліджень справних (однотипних з досліджуваним) силових трансформаторів, або з результатів досліджень, коли трансформатор визнаний справним (за результатами випробовувань на підприємстві-виробникові СТ, або під час введення досліджуваного СТ в експлуатацію). Під час дослідження стану СТ, враховувались лише ті результати вимірювань, за яких відхилення поточних значень не перевищує похибки FRAnalyzer (2 %), відповідно до рекомендацій [15], [19].

Таким чином, методика визначення частоти тестового сигналу, яку потрібно враховувати для виявлення дефекту трансформатора відповідає вищезазначеним виразам, для побудови ЧХ. Наступним кроком у дослідженні визначено середньоквадратичне відхилення отриманих значень

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (k_{u,i} - \bar{k}_u)^2}, \quad (4)$$

де N — кількість вимірюваних точок для різних частот, $k_{u,i}$ — значення коефіцієнта, \bar{k}_u — середнє значення коефіцієнта усереднених значень.

Тоді середнє значення коефіцієнта передачі напруги тестового сигналу \bar{k}_u визначатиметься як

$$\bar{k}_u = \frac{\sum_{i=1}^N k_{u,i}}{N}; \quad (5)$$

$$\bar{k}_u = \frac{(-40,38) + (-40,16) + (-39,95) + (-39,72) + (-39,51) + (-39,29) + (-38,08)}{7} = -39,7271 \text{ дБ}.$$

На наступному кроці за (4) визначено середньоквадратичне відхилення отриманих значень:

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{7} \left[\begin{aligned} &(-39,38 - (-39,7271))^2 + (-39,16 - (-39,7271))^2 + \\ &+ (-68,95 - (-39,7271))^2 + (-38,72 - (-39,7271))^2 + \\ &+ (-38,51 - (-39,7271))^2 + (-38,29 - (-39,7271))^2 + \\ &+ (-38,08 - (-39,7271))^2 \end{aligned} \right] \right\}^{1/2} = 11,095 \text{ дБ}.$$

Користуючись правилом $|k_{u,i} - \bar{k}_u| > 2\sigma$ [18], за довірчої імовірності $P = 0,95$, результати вимірювань в таких точках вилучені та в подальших розрахунках не враховувались і на висновки не впливали. Прийнято рішення про справний стан СТ.

Однак, під час проведення додаткових вимірювань ЧХ цього СТ, в яких врахували необхідну кількість проведених повторних (за [12], [15]) вимірювань ЧХ, отримано результати подані в табл. 2 та на рис. 5.

Таблиця 2

Значення передатної функції в досліджуваних точках

f , Гц	$k_{u,1}$	$k_{u,2}$	$k_{u,3}$	$k_{u,4}$	$k_{u,5}$	$k_{u,6}$	\bar{k}_u
	дБ						
6060	-38,38	-40,04	-38,25	-39,39	-39,32	-42,08	-40,38
6210	-38,16	-37,52	-35,93	-39,17	-35,63	-41,09	-40,16
6360	-67,95	-68,95	-76,80	-69,95	-81,03	-72,25	-39,95
6520	-37,72	-35,16	-36,62	-38,63	-38,02	-34,58	-39,72
6680	-37,51	-38,34	-34,14	-38,42	-35,49	-36,84	-39,51
6840	-37,29	-38,55	-40,03	-38,32	-38,75	-40,73	-39,29
7010	-37,08	-39,45	-37,10	-38,11	-39,91	-41,07	-39,08

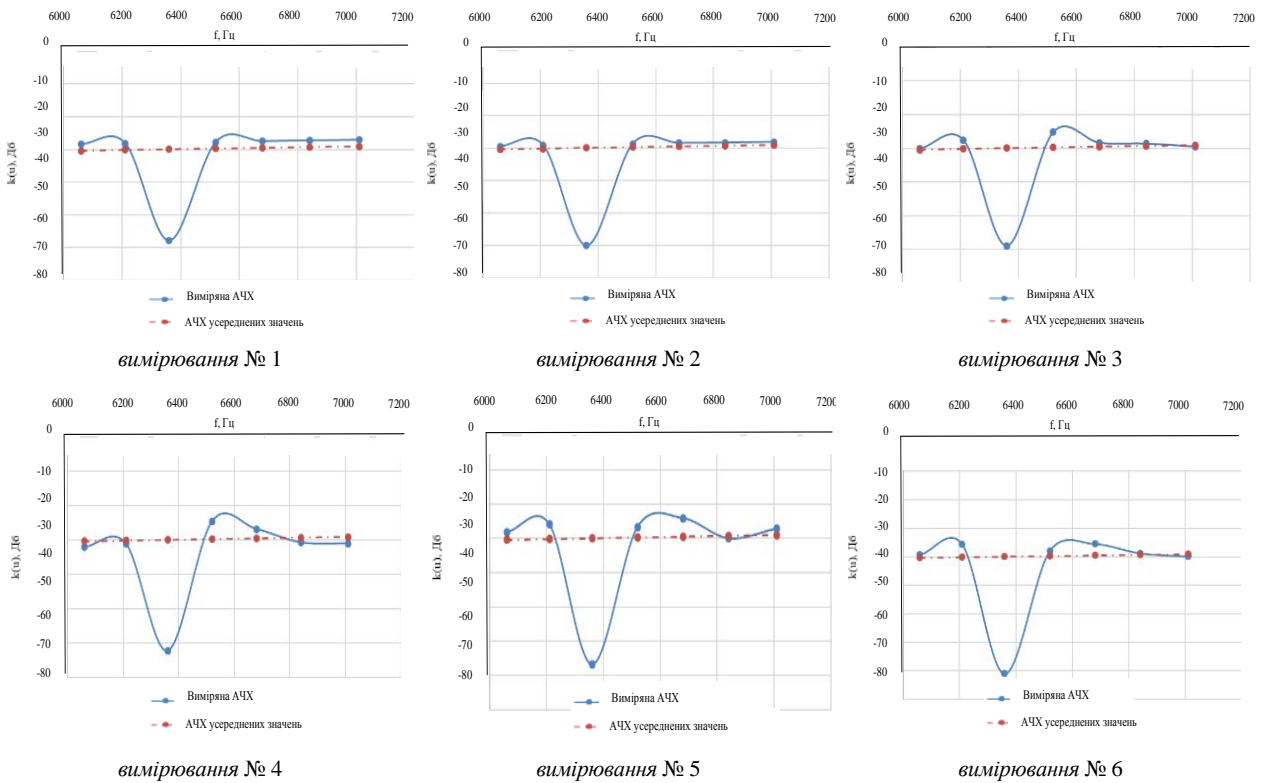


Рис. 5. Відхилення, які спостерігались у повторних дослідженнях

Ці результати вже потрібно враховувати для обґрунтування висновків про поточний технічний стан СТ та під час прийняття рішення щодо особливостей подальшої експлуатації досліджуваного трансформатора.

Як впливає з результатів повторних вимірювань та ретельнішого дослідження отриманих ЧХ, стрибкоподібне відхилення частотної характеристики спостерігалось у всіх ЧХ під час повторних досліджень.

Отже, з урахуванням специфіки проведення дослідження та за рекомендаціями [15], ЧХ може описувати зміну параметрів заступної схеми обмоток СТ та діагностувати його поточний стан.

Обговорення отриманих результатів

Як впливає з проведених досліджень, варто враховувати рекомендації авторів [15] і під час планування вимірювання ЧХ СТ попередньо встановлювати оптимальну кількість експериментів. Таке рішення дозволить зменшити похибку вимірювань та на достатньому рівні оцінювати отримані ЧХ.

Під час дослідження в прикладі, наведеному у статті, нестабільні стрибкоподібні відхилення коефіцієнта передачі прийнято за промахи та вилучено з результатів дослідження. Однак за рекомендаціями [15], вимірювання за однією схемою включення вимірювального приладу виконано повторно з урахуванням оптимальної кількості необхідних експериментів. В процесі дослідження відхилення, які попередньо вилучені, спостерігались під час кожного з подальших вимірювань на частоті 6060...7010 Гц, що за результатами власних спостережень та аналізу літературних джерел [1], [15] визначається як відповідність інформативної частоти імовірному дефекту «радіальне зміщення витків» на ранній стадії розвитку.

Тому в подальшому виконано низку додаткових заходів щодо визначення технічного стану СТ, які виявили саме таке пошкодження (див. рис. 1).

Отже, проведені дослідження та додаткові заходи діагностування дозволили на прикладі СТ, що знаходиться в експлуатації у структурі ФЕС, встановити фактичний технічний стан трансформатора.

Висновки

1. Дослідження виведених з експлуатації СТ 10 кВ, які зберігаються на ремонтних майданчиках АТ Вінницяобленерго свідчать, що багато з їхніх пошкоджень — це пошкодження обмоток та

магнітопроводу, які можуть бути виявлені, аналізуючи частотні характеристики трансформатора.

2. Зразковим графіком частотної характеристики силового трансформатора є графік, на якому показані середні значення коефіцієнта передачі тестового сигналу приладу FRAnalyzer через силовий трансформатор для однотипних різних справних трансформаторів в залежності від частоти тестового сигналу. Враховуються лише ті результати вимірювань коефіцієнта передачі та лише така кількість вимірювань, за яких відхилення поточних значень не перевищує похибки FRAnalyzer (2 %).

3. Частота тестового сигналу, яку потрібно враховувати для виявлення дефекту, відповідає тій частоті, на якій відхилення значення коефіцієнта передачі частотної характеристики досліджуваного трансформатора відрізняється від значення коефіцієнта передачі (частотної характеристики побудованої за середніми значеннями однотипних справних трансформаторів) на понад 2 %.

4. Визначення відповідності інформативної частоти, яка відповідає дефекту, здійснюється шляхом власних спостережень та аналізу літературних джерел.

5. На прикладі досліджуваного силового трансформатора типу ТМГ 1000/10 У1 підтверджено його справний технічний стан. Однак на проміжку частоти 6060...7010 Гц спостерігались стрибкоподібні відхилення коефіцієнта передачі, які попередньо вилучено з розрахунків як промахи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] О. С. Рубаненко, М. П. Лабзун, і М. О. Гришук, «Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів», *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ", зб. наук. пр. Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях*, № 23, с. 41-46, 2017.

[2] М. О. Гришук, «Обґрунтування меж діапазону частот АЧХ трансформаторів відповідного дефектам зсуву витків», на *XLVII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2018)*, Вінниця, 2018, с. 3106-3108.

[3] А. Р. Максудов, «Электродинамическая стойкость обмоток силового трансформатора», *Сборник научных трудов по материалам XIX International scientific conference*, г.-к. Анапа, 2019, с. 128-133.

[4] В. В. Грабко, і О. В. Паланюк, «До питання діагностування силового трансформатора», на *XLVIII науково-технічній конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2019, с. 56-57.

[5] J. M. Chen, and Bi T. S., Sun, "Study on quality risk assessment for power transformer based on fault tree analysis," in *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, China, 2016, p. 1-4.

[6] В. В. Хавтирко, «Дослідження дефектів в силових трансформаторах», на *XLVII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2018)*, Вінниця, 2018, с. 958-960.

[7] М. П. Болотний, «Удосконалення математичних моделей оцінки технічного стану силових трансформаторів для підвищення достовірності визначення ризику порушення нормального режиму в підсистемах електроенергетичних систем.» дис. д-ра техн. наук, Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019.

[8] А. В. Пислярова, і В. А. Добровольський, «Дослідження методів діагностування силових трансформаторів», на *XLVIII науково-технічній конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2019, с. 24-26.

[9] D. Martin, "Analysis and mitigation of Australian and New Zealand power transformer failures resulting in fires and explosions", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, p. 7-14, 2019.

[10] І. В. Притискач, «Параметрична ідентифікація моделей діагностичних параметрів у системі діагностики силових трансформаторів», *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*, № 2, с. 82-87, 2016.

[11] О. С. Рубаненко, М. О. Гришук, і М. П. Лабзун, «Обґрунтування меж діапазону частот АЧХ трансформаторів відповідного дефектам зсуву витків», *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 5, с. 171-176, 2017.

[12] М. О. Гришук, О. С. Рубаненко, і О. О. Рубаненко, «Планування технічного обслуговування силових трансформаторів для отримання результатів їх частотних характеристик», *Світлотехніка та енергетика*, т. 3, № 56, с. 92-98, 2019.

[13] М. О. Гришук, О. С. Рубаненко, І. О. Гунько, «Дослідження пошкодження силового трансформатора на фотовольтаїчній електричній станції», *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 6, с. 178-183, 2019.

[14] О. С. Рубаненко, М. П. Лабзун, і М. О. Гришук, «Обґрунтування можливості виявлення дефектів деформації обмоток силового трансформатора за результатами вимірювань FRA», *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*, № 186, с. 103-106, 2017.

[15] O. Rubanenko, M. Hryshchuk, and O. Rubanenko, "Planning of the experiment for the defining of the technical state of the transformer by using amplitude-frequency characteristic," *Przegląd elektrotechniczny*, vol. 2020, no. 3, p. 184-191, 2020.

[16] V. Nurmanova, M. Bagheri, A. Zollanvari, K. Aliakhmet, Y. Akhmetov, and G. Gharehpetian, "A New Transformer FRA Measurement Technique to Reach Smart Interpretation for Inter-Disk Faults," *IEEE Transactions on Power Delivery*, no. 34(4), pp. 1508-1519. [8682123], 2020, pp. 1508-1519.

[17] D. Korenciak et al. "Measurement of Difference Parameters of Transformer Winding in Frequency Domain," in *12th International Conference on Measurement*, IEEE, 2019. p. 319-322.

[18] В. Е. Гмурман, *Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике*. Москва, Россия: Высшая школа, 1975.

[19] OMICRON, *FRAnalyzer, Analizador de respuesta en frecuencia de barrido para el diagnóstico de los devanados de los transformadores de potencia*, Manual del usuario. OMICRON, 2018.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Рубаненко Олександр Євгенійович — канд. техн. наук, професор, професор кафедри електричних станцій та систем, e-mail: rubanenkoae@ukr.net ;

Рубаненко Олена Олександрівна — канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри електричних станцій та систем.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Гришук Максим Олександрович — доктор філософії, провідний інженер-енергетик.

ТОВ «Українські технологічні продукти», Вінниця

O. Ye. Rubanenko¹
O. O. Rubanenko¹
M. O. Hryshchuk²

Analysis of the Obtained Frequency Characteristics of Power Transformers and Determination of its Technical Conditions with their Help

¹Vinnytsia National Technical University;

²LLC «Ukrayinski tekhnolohichni produkty»

The decommissioned 10 kV power transformers, which are stored at the repair sites of JSC "Vinnytsiaoblenergo", among others, are damage to the windings and magnetic circuit, which can be detected by analyzing the frequency characteristics of the transformer. An exemplary graph of the frequency response of a power transformer used in the diagnostic process may be a graph showing the average values of the test signal transfer factor of the FRAnalyzer through a power transformer for different types of serviceable transformers depending on the frequency of the test signal. Only those transmission measurement results are taken into account and only the number of measurements in which the deviation of the current values does not exceed the FRAnalyzer error (2 %). The frequency of the test signal, which must be taken into account for detecting a defect, corresponds to the frequency at which the deviation of the value of the transmission coefficient of the frequency response of the transformer under study differs from the value of the transmission coefficient (frequency response built from the average values of the same type of serviceable transformers) by more than 2 %. Determining the value of the informative frequency, which correlates with the defect, is carried out by own observations and analysis of literature sources. On the example of the studied power transformer type TMG 1000/10 U1 its actual technical condition is established. However, in the frequency range 6060...7010 Hz, abrupt deviations were observed, which are proposed to be preliminarily removed from the calculations, considering them to be mistakes.

Keywords: diagnosing, technical condition, transformer, frequency response.

Rubanenko Oleksandr Ye. — Cand. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Power Plants and Systems, e-mail: rubanenkoae@ukr.net ;

Rubanenko Olena O. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Doctoral Student of the Chair of Power Plants and Systems;

Hryshchuk Maksym O. — PhD, Leading Energy Engineer

А. Е. Рубаненко¹
Е. А. Рубаненко¹
М. А. Гришук²

Анализ полученных частотных характеристик силового трансформатора и определение его технического состояния с их помощью

¹Вінницький національний технічний університет;

²ООО «Украинские технологические продукты»

Отмечено, что у выведенных из эксплуатации силовых трансформаторах 10 кВ, хранящихся на ремонтных площадках АК Винницаоблэнерго, наряду с другими имеют место повреждения обмоток и магнитопровода, которые могут быть обнаружены путем анализа частотных характеристик трансформатора. Образцовым графиком частотной характеристики силового трансформатора, используемым в процессе диагностирования, может быть график, на котором показаны средние значения коэффициента передачи тестового сигнала прибора FRAnalyzer через силовой трансформатор для однотипных различных исправных трансформаторов в зависимости от частоты тестового сигнала. Учитываются только те результаты измерений коэффициента передачи и только такое количество измерений, при которых отклонения текущих значений не превышает погрешности FRAnalyzer (2 %). Частота тестового сигнала, которую нужно учитывать для выявления дефекта, соответствует той частоте, на которой отклонение значения коэффициента передачи частотной характеристики исследуемого трансформатора отличается от значения коэффициента передачи (частотной характеристики, построенной по средним значениям однотипных исправных трансформаторов) более чем 2 %. Определение значения информативной частоты, коррелируемой с дефектом, осуществляется путем собственных наблюдений и анализируя литературные источники. На примере исследуемого силового трансформатора типа ТМГ 1000/10 У1 установлено его действительное техническое состояние. Однако, в диапазоне частоты 6060...7010 Гц наблюдались скачкообразные отклонения, которыми предлагается пренебрегать при расчетах, считая их промахами.

Ключевые слова: диагностирование, техническое состояние, трансформатор, частотная характеристика.

Рубаненко Александр Евгеньевич — канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры электрических станций и систем, e-mail: rubanenkoa@ukr.net ;

Рубаненко Елена Александровна — канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры электрических станций и систем;

Гришук Максим Александрович — д-р философии, ведущий инженер-энергетик