

О.Є. Рубаненко<sup>1</sup>О.О. Рубаненко<sup>1</sup>М.О. Гришук<sup>2</sup>

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

1 Вінницький національний технічний університет

2 ТОВ «УКРАЇНСЬКІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОДУКТИ»

В статті відзначається те, що у виведених з експлуатації силових трансформаторів 10 кВ, які зберігаються на ремонтних майданчиках АК Вінницяобленерго серед інших мають місце пошкодження обмоток та магнітопроводу, які можуть бути виявлені шляхом аналізу частотних характеристик трансформатора. Зразковим графіком частотної характеристики силового трансформатора який застосовується під час 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 при 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 більше ніж 2%. Визначення відповідності інформативної частоти, яка відповідає дефекту здійснюється шляхом власних спостережень та аналізу літературних джерел. На прикладі досліджуваного силового трансформатора типу ТМГ 1000/10 У1, підтверджено його справний технічний стан. Однак на проміжку частоти 6060÷7010 Гц спостерігались стрибкоподібні пропонується попередньо вилучати із розрахунків вважаючи їх промахом.

**Ключові слова.** діагностування; технічний стан, трансформатор, амплітудно-частотна характеристика

### Вступ

Відомо [1]÷[2], що силовий трансформатор займає вагомe місце в енергетичній системі будь-якої розвиненої країни світу. 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 [3]. Тому підтримання силового трансформатора в справному стані – важливе завдання для експлуатуючих СТ підприємств. Однак, понад 40% силових трансформаторів розподільних електричних мереж відпрацювали понад 30 років, що перевищує їх паспортний ресурс (25 років). Разом з тим, автори [6]÷[10] 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 роботи СТ.

В наш час в Україні швидко зростає кількість фотоелектричних станцій (ФЕС), їх кількість та генерована ними електрична потужність. Ці ФЕС часто керовані напругою, яка передається по розподільним електричними мережам енергопостачальних компаній обленерго. Інвертори ФЕС є нелінійними елементами розподільних мереж. ФЕС мають змінний графік генерування залежний від погодних умов, викликаючи перехідні процеси, появу гармоніки високих на низьких (порівняно з промисловою частот) зміни струмів та напруг в обладнанні 10 кВ підприємств районних електричних мереж під час увімкнень та вимкнень ФЕС. Неузгоджене зростання генерованої ФЕС електричної потужності викликає перевантаження СТ підприємств районних електричних мереж, що особливо небезпечно в умовах експлуатації тра-

нсформаторів з низьким залишковим ресурсом. Та як стверджують автори [1]÷[2], частими пошкодженнями СТ в Україні є пошкодження обмоток та магнітопроводу СТ.

Одним із виходів з такої ситуації, є їх своєчасне технічне обслуговування, вчасне виведення СТ з експлуатації в ремонт або заміна СТ на нові [11], що дає змогу експлуатуючому підприємству покращити показники надійності СТ, та максимально збільшити термін їх експлуатації. В наш час відомі багато методів та засобів визначення технічного стану СТ. Наразі, в Україні існують методи визначення технічного стану СТ, які, наприклад, шляхом контролю тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$ , хроматографічного аналізу розчинених в трансформаторній оливі газів, вимірювання потужності холостого ходу  $P_{\text{хх}}$ , дозволяють виявити дефекти обмоток та магнітопроводу СТ на ранній стадії їх 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 обґрунтовуються шляхом аналізу виявлених дефектів СТ на ранній стадії їх розвитку [12]÷[14]. Отже тема статті є актуальною.

Для реалізації такого завдання необхідний надійний інструмент діагностування. Одним із сучасних методів діагностування є метод аналізу частотних характеристик (ЧХ) силових трансформаторів.

Метод аналізу ЧХ СТ (FRA) за допомогою приладу FRAnalyzer – точний та, що головне – неруйнівний метод для дослідження механічної цілісності вузлів трансформатора, особливо в частині визначення технічного стану обмоток та магнітопроводу [15]÷[17].

Автори в [14]÷[16] стверджують те що, якщо 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, ствердження про поточний стан СТ в Україні обмежено відсутністю нормативної технічної документації. Це обмежує можливість повноцінно використовувати таке вартісне обладнання, як FRA Analyze. Разом із тим автори [13], [16], досліджують можливість точної інтерпретації отриманих результатів, що за певних умов дасть змогу впевнено судити про поточний технічний стан СТ, та навіть прогнозувати подальші дії, що забезпечить підвищення надійнісних показників СТ.

У своїх роботах [1], [12]÷[16] представили результати досліджень, під час аналізу, яких, із накопиченої бази АЧХ, було вилучено дані, що відповідали випадковій похибці. Та автори даної роботи, після більш розширеного аналізу пропонують розглянути таке явище, не як випадкову похибку під час вимірювань, та аналізу отриманих результатів, а як показник що характеризує відхилення отриманої АЧХ від норми та свідчить про ймовірний дефект на ранній стадії його розвитку.

В даній статті пропонується дослідити значення впливу стрибкоподібного відхилення параметрів вимірюваної АЧХ від попередньо отриманих значень, для підтвердження можливості існування пошкоджень СТ, на ранній стадії їх розвитку.

### Мета та задачі

Метою досліджень, результати яких представлені в статті, є аналіз отриманих частотних характеристик силового трансформатора та визначення його технічного стану за результатами їх аналізу. .

Відповідно до вказаної мети в роботі вирішуються такі **задачі**:

1. Дослідити виведені з експлуатації СТ 10 кВ, які зберігаються на ремонтних майданчиках АТ Вінницяобленерго, проаналізувати їх пошкодження та дефекти які виявляються шляхом аналізу частотних характеристик трансформатора.
2. Визначити який графік залежності параметрів силового трансформатора може бути зразковим під час визначення технічного стану цього трансформатора.
3. Запропонувати методику визначення частоти тестового сигналу, яку потрібно враховувати для виявлення дефекту трансформатора.
4. Визначення відповідності інформативної частоти, яка відповідає дефекту здійснюється шляхом власних спостережень та аналізу літературних джерел.
5. На прикладі силового трансформатора, що знаходиться в експлуатації підтвердити або спростувати його справний технічний стан.

### Результати досліджень

Приймаючи рішення про можливість подальшої експлуатації чи про доцільність зміни режиму роботи СТ, експлуатуючі підприємства повинні враховувати ризик виходу з ладу СТ [[10]]. Однак

проблема визначення ймовірності пошкодження, полягає в тому, що такий показник зазвичай низький. Часто це викликано малою кількістю якісної статистичної інформації, яку можна проаналізувати.

З метою збільшення статистичної інформації про параметри АЧХ, проведено ряд експериментальних досліджень, **на підприємствах, що експлуатують СТ класом напруги 6-35 кВ Вінницької, Хмельницької та Херсонської областей рис. 1.**



а) СТ 10 кВ, що вийшли з ладу, на зберіганні до ремонту та прилад для аналізу їх технічного стану FRAnalyzer.



б) СТ 35 кВ до та після ремонту



в) обмотки пошкодженого СТ 35 кВ

Рис. 1 – Досліджувані СТ

Дослідження проводились на СТ, які знаходяться в експлуатації та на СТ виведених з експлуатації, з метою визначення їх пошкодження, за місцем їх експлуатації з використанням методу аналізу параметрів амплітудно-частотних характеристик СТ [13], [14], [17], [18].

Також досліджувались пошкоджені СТ, що зберігаються на ремонтних площадках АТ «Вінницяобленерго». Більшість СТ напругою 10 кВ, що знаходились в експлуатації понад 25 років. Дослідження СТ, які зберігаються на ремонтних майданчиках АТ Вінницяобленерго показали, що їх часті пошкодження – це пошкодження обмоток та магнітопроводу, які були виявлені шляхом аналізу частотних характеристик трансформатора, та підтверджені в подальшому, під час відкриття баку експлуатуючим персоналом.



а) Пошкоджені силові трансформатори 10кВ під час ремонту



б) Відремонтвані та пошкоджені силові трансформатори 10кВ та діагностичне обладнання під час діагностування.  
Рис. 2 – Пошкоджені та відремонтвані силові трансформатори 10 кВ дільниці з ремонту СТ АТ «Вінницяобленерго»

Сучасним та перспективним методом діагностування СТ є метод аналізу ЧХ. Відомо, що силовий трансформатор є складною діагностичною системою, яку можна представити у вигляді чотириполосника. Якщо на вхід такого чотириполосника подавати «тестову» напругу синусоїдної форми різних частот, то на виході отримаємо напругу сигналу «відгуку» на тестову напругу різних частот.

Модуль комплексного коефіцієнту передавання чотириполосника знаходиться за виразом (1):

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

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

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

$\omega$  – кутова частота «тестового сигналу»,  $u_{\text{вх.}(t)}$  та  $u_{\text{вих.}(t)}$  – миттєві значення напруг для моменту часу  $t$ ,  $\psi_{\text{вх}}$  – 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 коефіцієнт трансформації СТ  $k(f)$ , як відношення вимірних амплітудних значень напруги на вході  $U_{\text{амп. вх}}$  приладу (для кожного значення частоти  $f$  в діапазоні від 10 Гц до 20 МГц) до амплітудних значень напруги на виході  $U_{\text{амп. вих}}$  (1) приладу (не залежить від частоти). Далі, з метою зручності аналізу отриманих результатів, подамо модуль комплексного коефіцієнта передачі  $k$  чотириполосника в логарифмічних одиницях за наступним виразом для кожної з використаних під час досліджень частот  $f$  [12]÷[16], [20]:

$$k = 20 \cdot \log_{10} U_{\text{амп. вх.}(f)} / U_{\text{амп. вих}}, \text{ дБ}. \quad (3)$$

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

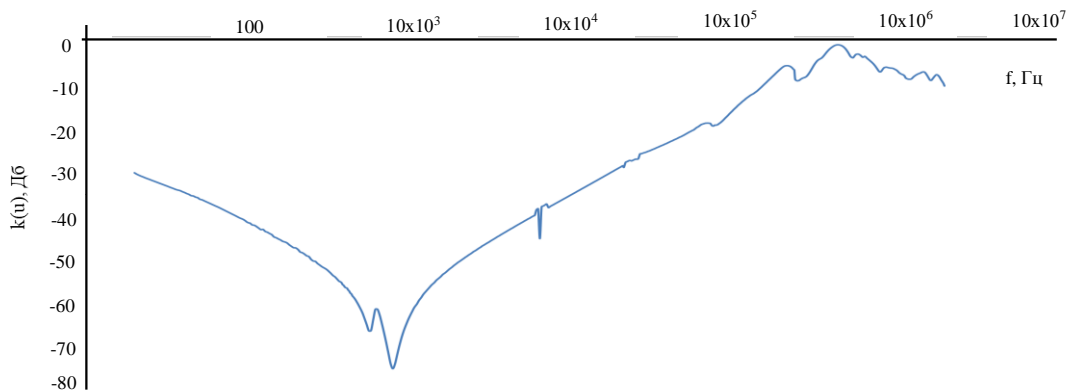


Рис. 3 – Графік залежності  $k$  від частоти  $f$  СТ (фаза В) отриманий під час досліджень на одній з ФЕС в Хмельницькій області

Під час обробки отриманих графіків, в діапазоні частот тестового сигналу 6060÷7010 Гц, виявлено відхилення поточних значень коефіцієнта  $k$  від значень частоти  $f$  (на якій виміряний  $k$ ) зразкового графіку (табл. 1 та рис. 4). За значення параметрів зразкового графіку пропонуємо брати усереднені значення коефіцієнту  $k$  за результатами досліджень справних (однотипних з досліджуваним) силових трансформаторів, які були отримані, або результатів досліджень коли трансформатор був 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, при яких відхилення поточних значень не перевищує похибки FRAnalyzer (2%), відповідно до рекомендацій [16], [20].



Таблиця 1

Відхилення графіку

$F$	$k$	$k_{yc}$
Гц	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

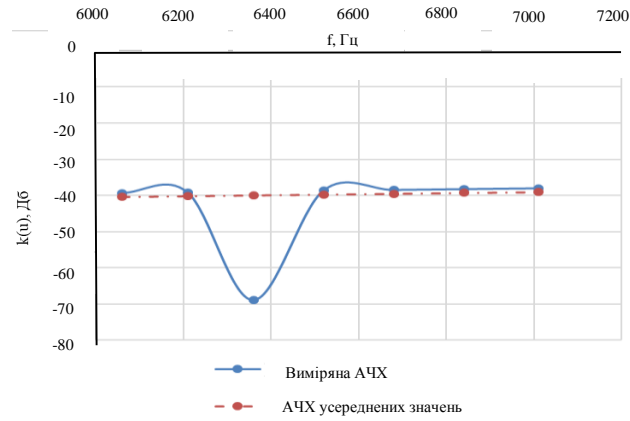


Рис. 3 – Порівняння отриманого графіку (дослідження фази В)

Таким чином, методика визначення частоти тестового сигналу, яку потрібно враховувати для виявлення дефекту трансформатора відповідає вищезазначеним виразам, для побудови АЧХ. Наступним кроком, під час дослідження було визначено середньоквадратичне відхилення отриманих значень (4):

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [k_i - \bar{k}_{yc}]^2} \quad (4)$$

де  $N$  – кількість вимірюваних точок для різних частот,  $k$  – значення коефіцієнта,  $k_{yc}$  – середнє значення коефіцієнта усереднених значень.

Тоді за (5), середнє значення коефіцієнта передатної функції усереднених значень:

$$\bar{k}_{yc} = \frac{\sum_{i=1}^N k_{i/yc}}{N} \quad (5)$$

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

Наступним кроком за (4) визначено середньоквадратичне відхилення отриманих значень:

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

Користуючись правилом  $|k - k'| > 2\sigma$ , [19] при довірчій імовірності  $P = 0,95k$  результати вимірювань в таких точках були вилучені та в подальших розрахунках не враховувались та висновки не впливали. Та прийнято рішення про справний стан СТ.

Однак під час проведення додаткових вимірювань АЧХ даного СТ, в яких було враховано необхідну кількість проведених повторних (за [13], [16]) вимірювань АЧХ, отримано результати представлені в табл. 2 та на рис. 4.

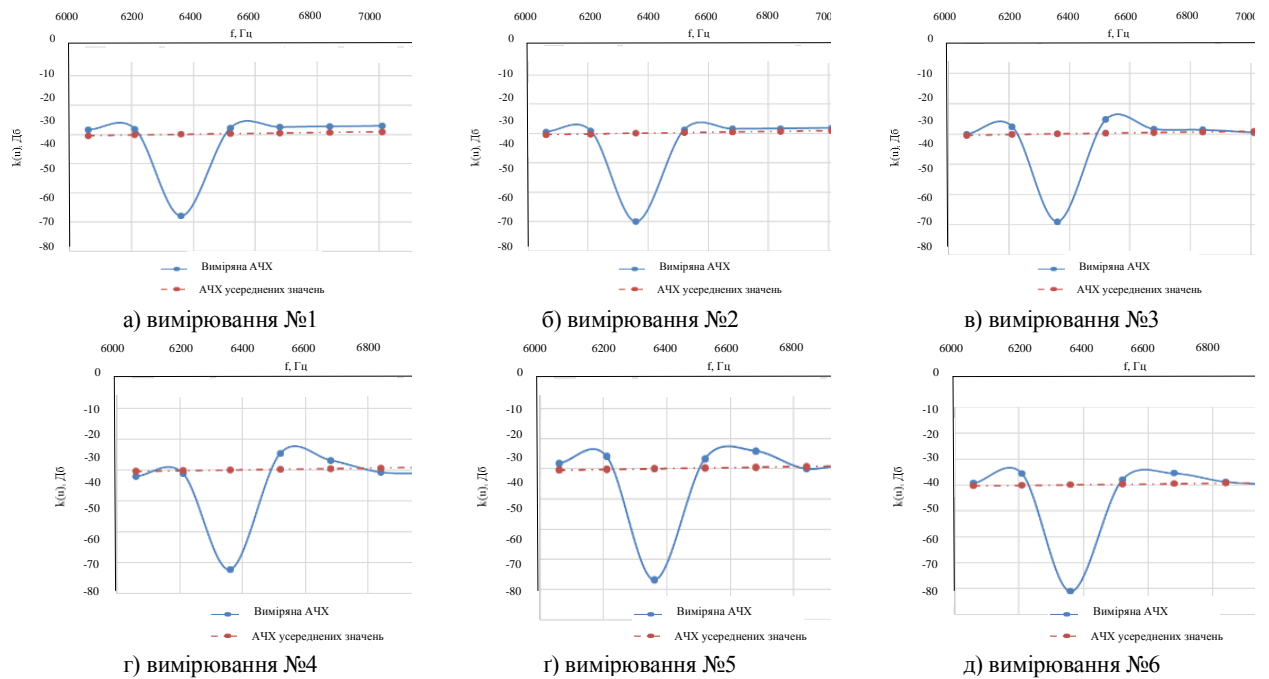


Рис. 4 – Відхилення, які спостерігались при повторних дослідженнях

Таблиця 2

Значення передатної функції в досліджуваних точках

$F$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_c$
$\Gamma\zeta$	$\partial B$						
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

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 бачимо після проведення повторних вимірювань, та більш ретельного дослідження отриманих АЧХ, стрибкоподібне відхилення частотної характеристики спостерігається, у всіх отриманих АЧХ, під час проведення повторних дослідів.

Отже, з урахуванням специфіки проведення дослідження та [16] АЧХ може описувати зміну параметрів заступної схеми обмоток СТ, та описувати стан СТ.

### Обговорення отриманих результатів

Як бачимо з проведених досліджень варто враховувати рекомендації авторів [16], та під час планування вимірювань АЧХ, визначати оптимальну кількість вимірювань. Такі рішення дозволять зменшити похибку вимірювань, та на достатньому рівні оцінити отримані значення АЧХ.

Під час дослідження, в прикладі представленому у даній статті коливання вимірних значень передатної функції, було прийнято за промах, та вилучено з результатів дослідження. Однак за рекомендаціями [16], вимірювання за однією схемою включення вимірювального приладу було виконано повторно з урахуванням оптимальної кількості необхідних вимірювань. Під час аналізу, відхилення, які було попередньо вилучено, спостерігались під час кожного із подальших вимірювань на частоті

6060÷7010 Гц, що за результатами власних спостережень та аналізу літературних джерел [1], [15], визначається як відповідність інформативної частоти, яка відповідає ймовірному дефекту “радіальне зміщення витків” на ранній стадії розвитку.

Тому в подальшому було виконано ряд додаткових заходів щодо визначення технічного стану СТ, під час яких виявлено таке пошкодження рис.1. Так, проведені дослідження, та додаткові заходи діагностування, дозволили на прикладі СТ, що знаходиться в експлуатації ФЕС, підтвердити його фактичний технічний стан

### Висновки

1. Дослідження виведених з експлуатації СТ 10 кВ, які зберігаються на ремонтних майданчиках АТ Вінницяобленерго свідчать про те, багато з їх пошкоджень – це пошкодження обмоток та магнітопроводу, які можуть бути виявлені шляхом аналізу частотних характеристик трансформатора.

2. Зразковим графіком частотної характеристики силового трансформатора є графік на якому показані середні значення коефіцієнта передачі тестового сигналу приладу FRAnalyzer (коефіцієнта трансформації) 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 при 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 більше ніж 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, які було попередньо вилучено із розрахунків вважаючи їх промахом.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] О. Є. Рубаненко, М. П. Лабзун, М. О. Гришук, "Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів", *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПИ": 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, О. В. Паланюк, "До питання діагностування силового трансформатора", на *XLVIII науково-технічній конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2019, с. 56-57.
- [5] Грабко В. В., Дідушок О. В. "Дослідження роботи електромагнітного приводу вакуумного вимикача як об'єкта діагностування", *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПИ": зб. наук. пр. Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях*, №9, с. 57-62, 2019.
- [6] J. M. Chen, 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.
- [7] В. В. Хавтирко, "Дослідження дефектів в силових трансформаторах", на *XLVII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2018)*, Вінниця, 2018, с. 958–960.
- [8] М. П. Болотний, "Удосконалення математичних моделей оцінки технічного стану силових трансформаторів для підвищення достовірності визначення ризику порушення нормального режиму в підсистемах електроенергетичних систем", дис. док. наук, Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019.
- [9] А. В. Писклярова, В. А. Добровольський, "Дослідження методів діагностування силових трансформаторів", на *XLVIII науково-технічній конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2019, с. 24-26.
- [10] D. Martin, "Analysis and mitigation of Australian and New Zealand power transformer failures resulting in fires and explosions", in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2019, p. 7-14.
- [11] І. В. Притискач, "Параметрична ідентифікація моделей діагностичних параметрів у системі діагностики силових трансформаторів", *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*, №. 2, с. 82-87, 2016.
- [12] О. Є. Рубаненко, М. О. Гришук, М. П. Лабзун, "Обґрунтування меж діапазону частот ачх трансформаторів відповідного дефектам зсуву витків", *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, №. 5, с. 171–176, 2017.
- [13] М. О. Гришук, О. Є. Рубаненко, О. О. Рубаненко, "Планування технічного обслуговування силових трансформаторів для отримання результатів їх частотних характеристик", *Світлотехніка та енергетика*, Т. 3, №. 56, с. 92–98, 2019.

[14] 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.

[15] О. С. Рубаненко, М. П. Лабзун, 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.

[16] O. Rubanenko, M. Hryshchuk, O. Rubanenko, "Planning of the experiment for the defining of the technical state of the transformer by using amplitude-frequency characteristi", *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, Vol 2020, No 3, p. 184-191, 2020.

[17] V. Nurmanova, M. Bagheri, A. Zollanvari, K. Aliakhmet, Y. Akhmetov, G. Gharehpetian, "A New Transformer FRA Measurement Technique to Reach Smart Interpretation for Inter-Disk Faults", in *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(4), 1508-1519. [8682123], 2020, p. 1508-1519.

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

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

[20] 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

Стаття надійшла до редакції \_\_\_\_2021

**Рубаненко Олександр Євгенійович** — к.т.н., професор, професор кафедри електричних станцій та систем; e-mail: [rubanenkoae@ukr.net](mailto:rubanenkoae@ukr.net);

**Рубаненко Олена Олександрівна** — к.т.н., 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. E. Rubanenko<sup>1</sup>**  
**O. O. Rubanenko<sup>1</sup>**  
**M. O. Hryshchuk<sup>2</sup>**

## Analysis of amplitude-frequency characteristics of power transformers and interpretation of technical conditions with their help.

<sup>1</sup>Vinnitsia national technical university

<sup>2</sup>LLC «Ukrayinski tekhnolohichni produkty»

The article proposes to first determine the ST defect by comparing and analyzing the frequency response of the sample of the studied ST with the current frequency response of the same ST. Frequencies at which more than normal deviations of the frequency response are detected indicate a certain type of defect. Thereafter, in order to reduce the errors of the first (existing defect not identified) or second (misidentified non-existent defect) type, during the diagnosis of CT it is proposed, in case of suspicion of the defect, to repeat the frequency response a reasonable number of times. Next, you need to determine the average values of the deviations of the sample and the current frequency response and the frequency range that corresponds to them. These frequency ranges allow to substantiate or refute the conclusion about this or that type of CT defect. For an exemplary frequency response, it is proposed to take the frequency response of the CT obtained at the factory of the CT manufacturer after the recognition of the CT is working (immediately after the commissioning of the CT or after repair work on the CT). The obtained frequency response of CT type TMG 1000/10 U1 was investigated. However, in the frequency range 6060 ÷ 7010 Hz, sharp deviations were observed, which were previously removed from the calculations, considering them omitted. Additional measurements of the frequency response were performed, which showed the same deviations in the frequency range 6060 ÷ 7010 Hz as in the previous measurements. These results indicate a probable defect of the axial deformation of the CT windings. Additional CT scans were performed, which indicated a possible axial displacement of the turns of the winding of the studied CT at an early stage of development.

**Keywords:** diagnosing; technical condition, transformer, frequency response

**Rubanenko Oleksandr Y.** - Ph.D., Professor, Professor of the Department of Power Plants and Systems; e-mail: [rubanenkoae@ukr.net](mailto:rubanenkoae@ukr.net);

**Rubanenko Olena O.** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral Student of the Department of Power Plants and Systems;

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia.

**Hryshchuk Maksim O.** - PhD, Leading Energy Engineer LLC «Ukrayinski tekhnolohichni produkty», Vinnitsia.



А.Е Рубаненко<sup>1</sup>  
 А.А Рубаненко<sup>1</sup>  
 М.А. Грищук<sup>2</sup>

## Анализ полученных амплитудно-частотных характеристик силовых трансформаторов и интерпретация их технического состояния с их помощью

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет  
<sup>2</sup>ООО «УКРАИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОДУКТЫ»

*В статье предложено сначала определять дефект, сравнивая и анализируя образцовую АЧХ исследуемого СТ с текущей АЧХ этого же СТ. Частоты, на которых выявлены отклонения АЧХ которые превышают максимально-допустимые, свидетельствуют о том виде дефекта, которому соответствует диапазон частот с таким отклонением АЧХ. После этого, с целью уменьшения ошибок первого рода (дефект существует, но не выявлен) или второго рода (выявлен несуществующий дефект). При диагностировании СТ, в случае подозрения о наличии дефекта, предлагаем измерить АЧХ СТ еще несколько раз. Количество повторных измерений необходимо обосновать. Далее нужно определить средние значения отклонений серии текущих АЧХ от образцовой АЧХ и диапазон частот, которые соответствуют сверх нормированным отклонениям. Именно эти частотные диапазоны, позволяют обосновать или опровергнуть вывод о том, или другой виде дефекта СТ. Предложено в качестве образцовой АЧХ брать АЧХ СТ полученную на заводе изготовителе СТ после того, как СТ был признан исправным (сразу после введения СТ в эксплуатацию, или после окончания ремонтных работ СТ). Далее необходимо исследовать полученные АЧХ СТ типа ТМГ 1000/10 У1. В рассмотренном примере в диапазоне частот 6060 ÷ 7010 Гц наблюдались скачко-образные отклонения напряжения сигнала отклика на тестовый сигнал, которые ранее предлагалось изъять из АЧХ, считая их считая их помехой. Проведены дополнительные измерения АЧХ, на промежутке частоты 6060 ÷ 7010 Гц показали такие же отклонения, как и в предыдущих измерениях. Эти результаты указывают на вероятный дефект осевой деформации обмоток СТ. Также дополнительные исследования состояния СТ указали на возможное осевое смещение витков обмотки исследуемого СТ, на ранней стадии развития этого дефекта.*

**Ключевые слова.** диагностирования; техническое состояние, трансформатор, амплитудно-частотная характеристика.

*Рубаненко Александр Евгеньевич* - к.т.н., профессор, профессор кафедры электрических станций и систем; e-mail: rubanenkoae@ukr.net;

*Рубаненко Елена Александровна* - к.т.н., доцент, докторант кафедры электрических станций и систем; Винницкий национальный технический университет, Винница.

*Грищук Максим Александрович* - доктор философии, ведущий инженер-энергетик ООО «Украинские технологические продукты, Винница.