

*В статті проаналізовано існуючі методи та засоби визначення технічного стану обмоток силових трансформаторів (СТ) та доведена можливість використання методу контрольних меж для визначення меж діапазону частот, в якому проявляється дефект зсуву витків обмотки за результатами аналізу амплітудно-частотних характеристик, що може бути використано під час контролю стану обмоток СТ.*

*Ключові слова: діагностування, пошкодження, силовий трансформатор, частотний аналіз, обмотки.*

A.E. RUBANENKO, M.A. GRISHCHUK

Vinnitsa National Technical University

M.H. LABZUN

NEC «Ukrenergo» South-Western Electricity System

### **BREAKDOWN OF THE RANGE OF THE FREQUENCY RANGE OF FREQUENCY OF TRANSFORMERS IN RELEVANT DEFECTS OF CURRENT STATUS**

*The article analyzes the existing methods and means for determining the technical state of winding power transformers and proves the possibility of using the control limit method to determine the limits of the frequency range in which the deflection of the winding turns is detected by the results of the analysis of the amplitude-frequency characteristics that can be used during the control I will become winding. In modern power systems, the power transformer is one of the main types of high-voltage equipment. Failure of the power transformer during operation significantly impairs the reliability parameters and economic performance of the power plant. The growing number of outdated transformers during their operation reduces reliability and increases the likelihood of failure; therefore, a reliable diagnostic tool is needed to determine the current technical state and the remaining power equipment resource. Frequency response analysis (FRA) is a powerful diagnostic method for detecting the deformation of the winding and damage to the magnetic circuit, even at an early stage in their development. Although this method of test control of power transformers is relatively simple since the creation of the FRA special equipment, the interpretation of the results remains highly specialized and requires qualified personnel and proper technical documentation to determine the type and location of damage. The purpose of the research is to improve the quality of the diagnosis of power transformers. Research objectives: analysis existing methods and means for determining the technical state of winding power transformers; to prove the possibility of using the method of control limits in order to substantiate conclusions about the state of windings by the results of the analysis of their amplitude-frequency characteristics.*

*Keywords: diagnostics, damage, power transformer, frequency analysis, winding.*

. В сучасних електроенергетичних системах (ЕЕС) СТ є одним з основних видів високовольтного обладнання. Вихід з ладу СТ під час експлуатації значно погіршує параметри надійності та економічні показники роботи енергетичного підприємства. Пошкодження СТ під час їх експлуатації в ЕЕС [1, 2] зменшує надійність та збільшує ймовірність відмови іншого обладнання, тому потрібен надійний інструмент діагностування. Зростаюча кількість застарілих трансформаторів під час їх експлуатації в ЕЕС зменшує надійність та збільшує ймовірність відмови, тому для визначення поточного технічного стану та залишкового ресурсу силового обладнання потрібен надійний інструмент діагностування.

Електродинамічні сили, які діють на обмотки СТ під час перехідних процесів в ЕЕС, наприклад, під час коротких замкнень на шинах або поблизу електричних підстанцій, за певних умов викликають деформацію обмоток. Однією з причин того, що трансформатор зазнає механічних пошкоджень обмоток, є зміна сили затиску витків. При незначних деформаціях обмотки трансформатор продовжує працювати. Однак, його здатність витримувати перевантаження зменшується. Деформація обмоток може мати багато форм, включаючи радіальне та осьові зсуви, вигинання провідника, затягування спіралі та пошкодження опори обмотки. Цей тип внутрішніх несправностей важко виявити за допомогою традиційних методів діагностування [3]. Аналіз частотних характеристик СТ (FRA) – це потужний діагностичний метод для виявлення деформації обмотки та пошкоджень магнітопроводу [4, 5], навіть на ранній стадії їх розвитку.

Хоча цей метод тестового контролю СТ є відносно простим з моменту створення спеціального обладнання FRA, інтерпретація результатів залишається вузькоспеціалізованою та потребує кваліфікованого персоналу та належної технічної документації, для визначення виду та можливого розташування пошкодження [6].

Метою досліджень є підвищення якості діагностування силових трансформаторів.

Задачі досліджень: аналіз існуючих методів та засобів визначення технічного стану обмоток силових трансформаторів (СТ); доведення можливості використання методу контрольних меж з метою обґрунтування висновків про стан обмоток СТ за результатами аналізу їх амплітудно-частотних характеристик (АЧХ).

. Методи та засоби діагностування СТ ґрунтуються на результатах вимірювання діагностичних параметрів і передбачають їх накопичення, зберігання та обробку з метою визначення технічного стану, причин та місця пошкодження. Для визначення стану СТ (справний – несправний; роботоздатний – нероботоздатний і т. п.) порівнюють вимірне значення діагностичного параметра з його нормованим значенням, або з нормованим відхиленням від результатів попередніх вимірів.

Так, наприклад, опір обмоток постійному струму, в процесі експлуатації, не повинний істотно змінюватися. Вимірне значення опору не повинно відрізнятися більш ніж на 2% від результатів заводських

і/або попередніх випробувань [6]. Вимірювання проводяться на всіх відгалуженнях кожної фази. Значення опору на одних і тих самих відгалуженнях різних фаз також не повинні відрізнятися один від іншого, якщо немає особливих застережень у паспорті трансформатора.

Опори обмоток силових трансформаторів – невеликі. Вони вимірюються вимірювальними мостами [6], або методом падіння напруги (метод також називають методом вольтметра-амперметра).

Контроль параметрів холостого ходу дозволяє визначити дефекти обмотки і магнітопроводу на підприємстві-виробнику, а також, за [6], під час проведення капітального ремонту, пов'язаного з необхідністю перешихтування осердя, або його верхнього ярма, застосовують контроль параметрів холостого ходу при напрузі, яка дорівнює номінальній, або при меншій за номінальну напругу.

Згідно [6] вимірюють напругу короткого замикання ( $U_k, \%$ ) для діагностування трансформатора, яка характеризує стан обмоток. Під час протікання струмів короткого замикання (КЗ), на обмотки трансформатора діють електродинамічні сили. Під їх впливом можуть виникнути деформації обмоток.

Під час таких деформацій, особливо радіальних, змінюється розташування та відстань витків, між собою, а також відносно магнітопроводу. Як наслідок, відбувається зміна напрямків магнітних потоків розсіювання, що призводить до зміни індуктивного опору короткого замикання ( $X_k$ ), а отже, і повного опору  $Z_k$  (у потужних трансформаторах  $Z_k \approx X_k$ ).

В деяких випадках, під час контролю механічного стану обмоток успішно поєднують метод контролю  $Z_k$  з методом низьковольтних імпульсів, який дозволяє виявляти дефекти обмоток на ранній стадії їх розвитку.

З метою визначення технічного стану магнітопроводу контролюють струм або потужність холостого ходу СТ, або, наприклад, вимірюють магнітних властивості осердя методом Стілуса, який базується на вимірюванні локального магнітного потоку в магнітопроводі трансформатора. Однак такий метод вимагає свердління отворів у листі шихтованої сталі. Новоутворений простір між листами впливає на розподіл магнітного потоку.

Відомий метод вимірювання місцевих втрат в сталі за допомогою термографії, який базується на місцевому магнітному вимірюванні втрат в сталі за допомогою методики Стілус-зонда. Також вимірюють інтенсивність та щільність магнітного потоку [7, 8].

Проте, поблизу спільних частин, де сталеві листи перекриваються, виникає похибка вимірювання щільності магнітного потоку. Тому для аналізу втрат в сталі, потрібно вдосконалювати методи вимірювань та контролю стану магнітопроводу.

Наприклад відомий метод розрахунку втрат в сталі з використанням значень підвищення температури листа сталі осердя. Зокрема, контролюють температуру за допомогою інфрачервоної термографії. Це дозволяє одночасно контролювати розподіл тепла на більшій поверхню магнітопроводу, в порівнянні з методами, що використовують термопари або терморезисторні термометри.

Відомо, що осердя є джерелом акустичного шуму, викликаного електромагнітними коливаннями на стиках листів шихтованої сталі. Відповідно, для аналізу його стану використовують метод трьох вимірних контролю вібрації в різних точках осердя трансформатора.

Однак, аналіз пошкоджуваності СТ свідчить про те, що незважаючи на велику кількість методів та засобів діагностування мають місце пошкодження як нових СТ, так і тих, які експлуатуються понад 25 років, що перевищує їх паспортний ресурс. Отже потрібно вдосконалювати методи та засоби діагностування СТ з метою виявлення пошкоджень на ранній стадії їх розвитку.

Результати досліджень пошкоджень вузлів та деталей СТ свідчать про те, що, як в Україні, так за кордоном (табл. 1), чимало з них припадає на пошкодження обмоток та магнітопроводів [1, 2, 9].

Це доводить необхідність врахування стану цих елементів трансформатора під час його експлуатації.

Таблиця 1

Пошкодження	В Україні	В Німеччині
Бак	7,6 %	3,6 %
РПН	9,5 %	33,9 %
Обмотка	9,7 %	32,1 %
Магнітопровід	5,4 %	7,1 %
Система охолодження	23,1 %	0,9 %
Вводи	15,6 %	11,6 %
Ізоляція	29,1 %	9,8 %

Наприклад, виправданим є використання передатної функція тестового сигналу змінюваної в часі частоти; залежності залишкового опору тестового сигналу від частоти; відхилення початкового графіку залежності значення передатної функції тестового сигналу, від частоти для поточних та передостанніх вимірювань.

Пропонуємо обґрунтувати межі інформативного діапазону частот АЧХ СТ для виявлення дефекту зсуву витків обмотки СТ, шляхом аналізу АЧХ однотипних трансформаторів з використанням методу контрольних меж [10÷13].

З метою визначення найбільш інформативних меж частот в яких виявляються зсуви обмоток за допомогою FRAnalyzer здійснено обстеження 16 одиниць трансформаторів ТМ – 6300/35/10, які мають

пошкодження у вигляді деформації обмоток. В якості вимірювального приладу використовуємо FRAnalyzer виробництва фірми Omicron.

Запишемо до таблиці 2 мінімальних значень частот  $f$  діапазону АЧХ несправних трансформаторів, в якому відхилення передатної функції досліджуваного пошкодженого трансформатора відрізняється від значень передатної функції однотипного справного СТ на понад 1%.

В таблиці 1 показані результати вимірів для 16 однотипних трансформаторів з зсувами обмоток. Для кожного трансформатора для усунення впливу завод розташування трансформаторів, для усунення похибок персоналу вимірювання параметрів кожного трансформатора повторювалось по п'ять разів. Незважаючи на те, що вигляд графіків залежностей майже не змінювався та підтверджував висновки, зроблені за результатами вимірювань напруги та опору короткого замикання – все одно мали місце незначні відхилення граничних значень меж діапазону в якому проявлявся дефект зсувів обмоток.

Таблиця 2

Номер вимірювання	Граничні значення меж залежностей значень передатної функції від частоти, Гц															
	Номер трансформатора															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	42513	42655	46077	42185	43945	42115	44474	43428	43182	43359	45303	43520	43403	45579	45200	41894
2	45853	46082	45681	43596	43837	45021	44809	41803	45891	44395	43546	43954	44674	43304	44364	45890
3	45765	42550	43471	42528	43576	46103	42421	42103	43406	44062	43530	43663	43585	42225	43537	41937
4	43665	42457	42478	44064	43653	45938	42295	42309	43810	43653	45102	44545	45229	45187	41957	42819
5	45597	45987	43516	42909	42613	43348	44902	43626	44550	45985	45601	45487	43176	45183	41982	45801

Отже кожен трансформатор досліджувався 5 разів –  $n = 5$ . Кількість трансформаторів  $m = 16$ . Загальна кількість вимірів  $n_0 = n \cdot m = 80$ . Для кожного трансформатора визначаємо середнє значення з п'яти вимірних значень одного того самого трансформатора.

Знаходимо суму результатів вимірів для кожного трансформатора, наприклад для першого трансформатора:

$$\sum_{i=1}^5 f_i = 42513 + 45853 + 45765 + 43665 + 45597 = 223393, \text{ Гц.} \quad (1)$$

Знаходимо середнє значення результатів вимірів для першого трансформатора

$$F = \bar{f}_1 = \frac{1}{5} \times 223393 = 44678,6, \text{ Гц.} \quad (2)$$

З результатів вимірів для першого трансформатора вибираємо максимальний  $F_{1 \text{ макс.}}$  та мінімальний результати  $F_{1 \text{ мин.}}$

$$F_{1 \text{ макс.}} = 45853, \text{ Гц;} \\ F_{1 \text{ мин.}} = 42513, \text{ Гц.}$$

Знаходимо максимальний розмах результатів вимірів для першого трансформатора

$$R_1 = F_{1 \text{ макс.}} - F_{1 \text{ мин.}} = 45853 - 42513 = 3340, \text{ Гц.} \quad (3)$$

Порахуємо оцінки (для кількості вимірів  $m = n_0/n = 16 \cdot 5/5 = 80/5 = 16$  вимірів, для загальної кількості вимірних трансформаторів  $n_0 = 16 \cdot 5 = 80$  вимірів; для кількості вимірів для 1 трансформатора  $n = 5$  вимірів)

$$\hat{f}_0 = f = \frac{1}{16} \times \sum_{g=1}^{16} \bar{y}_g = (44679 + 43946 + 44245 + 43056 + \\ + 43525 + 44505 + 43780 + 42654 + 44168 + 44291 + \\ + 44616 + 44234 + 44013 + 44296 + 43408 + 43668) / 16 = 43942,73, \text{ Гц;} \\ + 43525 + 44505 + 43780 + 42654 + 44168 + 44291 + \\ + 44616 + 44234 + 44013 + 44296 + 43408 + 43668) / 16 = 43942,73, \text{ Гц;}$$

$$\hat{R} = R = \frac{1}{16} \sum_{g=1}^{16} R_g = (3340+3625+1879+1332+3988+2607+1823+$$

$$+2709+2626+2071+1967+2053+3354+3243+3996+3599)/16=2763,25, \text{ Гц};$$

Середньоквадратичне відхилення

$$\hat{d} = \frac{\hat{R}}{d} = \frac{2763,25}{2,33} = 1185,95, \text{ Гц.} \tag{4}$$

де  $d=2,33$  [14] з врахуванням того, що  $n = 5$ ).

Перевіримо  $\hat{d}$  більш точним методом

$$\hat{d} = \sqrt{\frac{1}{n_0 - 1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \sqrt{\frac{1}{80-1} \times 102459627,8} = \sqrt{1296957} = 1138,8, \text{ Гц.} \tag{5}$$

Похибка при спрощеному визначенні  $\hat{d}$  не перевищує

$$\left| \frac{1138,8 - 1185,95}{1138,8} \right| \times 100\% = 4,136\%. \tag{6}$$

Розраховуємо нижню контрольну межу (за умови двосторонніх меж) для середніх значень за умови, що рівень значимості  $\alpha = 0,0027$ , а довірна імовірність  $1 - \alpha = 1 - 0,0027 = 0,9973$

$$F_{n,\bar{y}} = \bar{f}_0 - U\left(\frac{1+\alpha}{2}\right) \cdot \frac{\hat{d}}{\sqrt{n_0}} = 43942,73 - U\left(\frac{1+0,0027}{2}\right) \cdot \frac{1185,95}{\sqrt{80}} = 43921, \text{ Гц.} \tag{7}$$

Квантіль нормального закону розподілу

$$U\left(\frac{1+p_1}{2}\right) = U\left(\frac{1+1-0,0027}{2}\right) = 3,0024 \approx 3. \tag{8}$$

Верхня межа діапазону прояву дефекту зсуву витків обмотки.

Граничні значення меж на графіках залежностей передатної функції від частоти для трансформаторів з обмотками, що мали осьові зсуви приведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Номер вимірювання	Граничні значення меж залежностей значень передатної функції від частоти, Гц															
	Номер трансформатора															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	408870	382845	388668	406804	378023	402231	390236	406636	381545	399185	395566	384495	392317	406189	405989	400015
2	385136	383867	387915	406888	389963	393251	402400	407873	380674	391585	401667	407030	399537	391779	386798	385609
3	391751	397915	391030	402974	379605	397606	386074	385848	385527	379781	394529	398236	383595	384254	381555	392785
4	404945	381858	390303	378585	397578	394293	394703	379614	401676	387020	391074	397167	405355	381800	398512	408964
5	404339	398029	382228	390210	406110	401525	380276	390778	394594	403408	401025	379859	395855	389927	397702	376629

Сума результатів вимірів для кожного трансформатора, наприклад для першого трансформатора:

$$\sum_{i=1}^5 f_i = 408870+385136+391751+404945+404339 = 1995041, \text{ Гц.}$$

Середнє значення результатів вимірів для першого трансформатора

$$F = \bar{f}_1 = \frac{1}{5} \times 1995041 = 399008,2, \text{ Гц.}$$

З результатів вимірів максимального значення межі передатної функції для першого трансформатора вибираємо максимальне  $F_{1 \text{ макс.}}$  та мінімальне значення  $F_{1 \text{ мін.}}$

$$F_{1 \text{ макс.}} = 408870 \text{ Гц;}$$

$$F_{1 \text{ мін.}} = 385136 \text{ Гц.}$$

Знаходимо максимальний розмах результатів вимірів для першого трансформатора

$$R_1 = F_{1 \text{ макс.}} - F_{1 \text{ мін.}} = 408870 - 385136 = 23734 \text{ Гц.}$$

Порахуємо оцінки (для кількості вимірів  $m = n_0/n = 16 \cdot 5/5 = 80/5 = 16$  вимірів, для загальної кількості виміряних трансформаторів  $n_0 = 16 \cdot 5 = 80$  вимірів; для кількості вимірів для 1 трансформатора  $n = 5$  вимірів)

$$\hat{f}_0 = f = \frac{1}{16} \sum_{g=1}^{16} \bar{y}_g = (399008 + 388903 + 388029 + 397092 +$$

$$+ 390255 + 397781 + 390737 + 394150 + 388803 + 392196 +$$

$$+ 396772 + 393357 + 395332 + 390790 + 39411 + 392800) / 16 = 393132, \text{ Гц;}$$

$$\hat{R} = R = \frac{1}{16} \sum_{g=1}^{16} R_g = (23734 + 16171 + 8802 + 28303 + 28087 + 8980 +$$

$$+ 22124 + 28259 + 21002 + 23627 + 10593 + 27171 + 21760 + 24389 +$$

$$+ 24434 + 32335) / 16 = 21860,68 \text{ Гц;}$$

$$\hat{d} = \frac{\hat{R}}{d} = \frac{21860,68}{2,33} = 9382,27, \text{ Гц.}$$

Перевіримо  $\hat{d}$  більш точним методом

$$\hat{d} = \sqrt{\frac{1}{n_0 - 1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \sqrt{\frac{1}{80 - 1} \times 5575579674} = \sqrt{70576958} = 8401, \text{ Гц.}$$

Похибка при спрощеному визначенні  $\hat{d}$  не перевищує

$$\left| \frac{8401 - 9382,27}{8401} \right| \times 100\% = 11,68\%.$$

Розраховуємо верхню контрольну межу (за умови двосторонніх меж) для середніх значень за умови, що рівень значимості  $\alpha = 0,0027$ , а довірна імовірність  $\beta = 1 - \alpha = 1 - 0,0027 = 0,9973$

$$F_{\text{н.ж.}} = \bar{f}_0 - U_{\left(\frac{1+\beta}{2}\right)} \cdot \frac{\hat{R}}{\sqrt{n_0}} = 393132 - U_{\left(\frac{1+0,9973}{2}\right)} \cdot \frac{21860,68}{\sqrt{80}} = 393289,9, \text{ Гц.}$$

Отже, за таким алгоритмом можна визначити верхню та нижню межу діапазону частот, в яких виявляються дефекти радіального зсуву обмоток трансформатора.

Незважаючи на велику кількість існуючих методів та засобів визначення технічного стану обмоток силових трансформаторів мають місце їх пошкодження. Використання методу контрольних меж дозволяє визначити межі діапазону частот в якому проявляється дефект зсуву витків обмотки на за результатами аналізу амплітудно-частотних характеристик, що може використано під час контролю стану обмоток СТ.

1. Рубаненко, О. Є. Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів / О. Є. Рубаненко, М. П. Лабзун, М. О. Гришук // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХП». – 2017. – № 23 (1245). – С. 41–46. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.07.

2. Tenbohlen S., Vahidi F., Müller P., Gebauer J., Krüger M. Zuverlässigkeitsbewertung von Leistungstransformatoren (em inglês), Proc. Stuttgarter Hochspannungssymposium, 2012. pp. 61–70.

3. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування нормальними режимами ЕЕС з урахуванням технічного стану трансформаторів із РПН / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, О. І. Казьмірук // Наукові праці ВНТУ. –

2012. – № 4. – 9 с.

4. Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій : монографія / О. О. Матусевич ; Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. – 295, [1] с. : рис., табл. – ISBN 978-966-8471-55-1
5. Галузевий керівний документ. Норми випробовування електрообладнання : затверджено і введено в дію наказом Міністерства палива та енергетики України № 13 від 15 січня 2007 р. / ДП «ДОНОРГРЕС», ВАТ «ЛьвівОРГРЕС» ; розробники : Г. Шкуринський, В. Бочаров, В. Сприса. – К. : Державний стандарт України, 2007. – 262 с.
6. Wang, S. Cumulative Deformation Analysis for Transformer Winding Under Short-Circuit Fault Using Magnetic-Structural Coupling Model / S. Wang et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2016. – Т. 26. – №. 7. – С. 1–5. – doi: 10.1109/TASC.2016.2584984.
7. Zhang Z. W. Experimental investigation of localized axial winding displacement in a high frequency range for power transformers / Z. W. Zhang et al. // Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), International Conference on IEEE. – 2016. – P. 388–391. – doi: 10.1109/CMD.2016.7757841.
8. FLORKOWSKI, Marek; FURGAŁ, Jakub. Detection of transformer winding deformations based on the transfer function-measurements and simulations. *Measurement science and technology*, 2003, 14.11: 1986.
9. BEHJAT, Vahid; MAHVI, Mojtaba; RAHIMPOUR, Ebrahim. New statistical approach to interpret power transformer frequency response analysis: non-parametric statistical methods. *IET Science, Measurement & Technology*, 2016, 10.4: 364–369.
10. GONZALES, J. C.; MOMBELLO, E. E. Fault interpretation algorithm using frequency-response analysis of power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31.3: 1034–1042. DOI: 10.1109 / TPWRD.2015.2448524
11. RAHIMPOUR, Hossein; MITCHELL, Steve; RAHIMPOUR, Saeed. Online monitoring of power transformers using impulse frequency response analysis. In: *Electrical Engineering (ICEE), 2017 Iranian Conference on. IEEE*, 2017. p. 1390–1394. DOI: 10.1109 / IranCEE.2017.7985259
12. ALSUHAIBANI, Saleh, et al. A Review of Frequency Response Analysis Methods for Power Transformer Diagnostics. *Energies*, 2016, 9.11: 879.
13. Лежнюк П.Д. Основи теорії планування експерименту. Лабораторний практикум / П.Д. Лежнюк, О.С. Рубаненко, Ю.В. Лук'яненко. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 167 с.
14. Круг Г.К. Теоретические основы планирования экспериментальных исследований / Круг Г.К. – М. : Изд-во МЭИ, 1974. – 185 с.

#### References

1. Rubanenko, O. C. Vyznachennja defektiv transformatornogo obladnannja z vikoristannjam chastotnih diagnostichnih parametriv / O. C. Rubanenko, M. P. Labzun, M. O. Grishhuk // Visnik NTU «HPI», Serija: Novi rishennja v suchasnih tehnologijah. – Harkiv : NTU «HPI». – 2017. – № 23 (1245). – S. 41–46. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.07.
2. Tenbohlen S., Vahidi F., Müller P., Gebauer J., Krüger M. Zuverlässigkeitsbewertung von Leistungstransformatoren (em inglés), Proc. Stuttgarter Hochspannungssymposium, 2012, pp. 61–70.
3. Lezhnjuk P. D. Optimal'ne keruvannja normal'nimi rezhimami EES z urahuvannjam tehničnogo stanu transformatoriv iz RPN / P. D. Lezhnjuk, O. C. Rubanenko, O. I. Kaz'miruk // Naukovi praci VNTU. – 2012. – № 4. – 9 s.
4. Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій : монографія / О. О. Матусевич ; Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. – 295, [1] с. : рис., табл. – ISBN 978-966-8471-55-1
5. Галузевий керівний документ. Норми випробовування електрообладнання : затверджено і введено в дію наказом Міністерства палива та енергетики України № 13 від 15 січня 2007 р. / ДП «ДОНОРГРЕС», ВАТ «ЛьвівОРГРЕС» ; розробники : Г. Шкуринський, В. Бочаров, В. Сприса. – К. : Державний стандарт України, 2007. – 262 с.
6. Wang, S. Cumulative Deformation Analysis for Transformer Winding Under Short-Circuit Fault Using Magnetic-Structural Coupling Model / S. Wang et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2016. – Т. 26. – №. 7. – С. 1–5. – doi: 10.1109/TASC.2016.2584984.
7. Zhang Z. W. Experimental investigation of localized axial winding displacement in a high frequency range for power transformers / Z. W. Zhang et al. // Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), International Conference on IEEE. – 2016. – P. 388–391. – doi: 10.1109/CMD.2016.7757841.
8. FLORKOWSKI, Marek; FURGAŁ, Jakub. Detection of transformer winding deformations based on the transfer function-measurements and simulations. *Measurement science and technology*, 2003, 14.11: 1986.
9. BEHJAT, Vahid; MAHVI, Mojtaba; RAHIMPOUR, Ebrahim. New statistical approach to interpret power transformer frequency response analysis: non-parametric statistical methods. *IET Science, Measurement & Technology*, 2016, 10.4: 364–369.
10. GONZALES, J. C.; MOMBELLO, E. E. Fault interpretation algorithm using frequency-response analysis of power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31.3: 1034–1042. DOI: 10.1109 / TPWRD.2015.2448524
11. RAHIMPOUR, Hossein; MITCHELL, Steve; RAHIMPOUR, Saeed. Online monitoring of power transformers using impulse frequency response analysis. In: *Electrical Engineering (ICEE), 2017 Iranian Conference on. IEEE*, 2017. p. 1390–1394. DOI: 10.1109 / IranCEE.2017.7985259
12. ALSUHAIBANI, Saleh, et al. A Review of Frequency Response Analysis Methods for Power Transformer Diagnostics. *Energies*, 2016, 9.11: 879.
13. Lezhnjuk P.D. Osнови теорії планування експерименту. Laboratornij praktikum / P.D. Lezhnjuk, O.C. Rubanenko, Ju V. Luk'janenko. □ Vinnicja : VNTU, 2005. □ 167 s.
14. Krug G.K. Teoreticheskie osnovy planirovanija jeksperimental'nyh issledovanij / Krug G.K. – M. : Izd-vo MJeI, 1974. □ 185 s.

Рецензія/Peer review : 08.09.2017 р.

Надрукована/Printed : 29.10.2017 р.

Рецензент: стаття порецензована редакційною колегією