

ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ДЕФОРМАЦІЇ ОБМОТОК СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИМІРЮВАНЬ FRA

Рубаненко О. Є.¹, Лабзун М. П.², Гришук М. О.¹

¹Вінницький національний технічний університет,
²ДП НЕК Укренерго Південно-Західна електроенергетична система (м. Вінниця)

Проаналізовано можливість виявлення дефектів обмоток та магнітопроводу силових трансформаторів за результатами перевірки адекватності їх частотних характеристик у досліджуваному частотному діапазоні.

Постановка проблеми. В даний час швидко розвиваються методи та засоби діагностування силових трансформаторів (СТ). Так наприклад, шляхом контролю тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta$, хроматографічного аналізу розчинених в трансформаторній оливі газів, можна виявити дефекти ізоляції СТ на ранній стадії їх розвитку. Але в той же час з [1,2] відомо, що мають місце чимало пошкоджень обмоток та магнітопроводу СТ. Це свідчить про те, що існуючі методи та засоби контролю та визначення, за їх результатами, технічного стану СТ, причин та місця пошкодження потребують подальшого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел [3÷9], свідчить про те, що з допомогою вимірювання частотних характеристик (наприклад приладом FRAAnalyzer), з'являється можливість виявлення таких дефектів навіть на ранній стадії їх розвитку. Однак, обґрунтування висновків за результатами використання такого діагностичного

обладнання в Україні обмежено відсутністю нормативної технічної документації. Дефекти обмоток та магнітопроводів СТ проявляються в різних діапазонах частот частотних характеристик (табл. 1) [3÷7] і не завжди ці діапазони для вироблених та експлуатованих в Україні трансформаторів співпадають з іншими, адже відомо, що частотна характеристика певного трансформатора є унікальною і часто відрізняється від характеристик інших СТ.

Мета статті. підвищення якості обґрунтування висновків по стан обмоток та магнітопроводу силового трансформатора за результатами контролю частотних характеристик.

Результати досліджень. Дослідимо можливість виявлення дефектів зсуву витків обмоток СТ шляхом порівняння (з використанням критерію Фішера) частотної характеристики справного і несправного трансформаторів в раніше визначеному частотному діапазоні зміни тестового сигналу.

Таблиця 1 – Прояв дефектів трансформаторів на частотних характеристиках

Вузол трансформатора	Дефекти вузлів	Діапазон частотного сигналу, Гц		
		від	до	літ. джерело
Обмотки	Деформація в межах основної обмотки	20×10^3	400×10^3	[3]
	Зсув основної обмотки	400×10^3	1×10^7	[3]
	Зміщення витків між обмотками та кріпленням	2×10^3	20×10^3	[3]
	Осьове зміщення витків	$> 400 \times 10^3$		[4]
	Зміна проміжку між обмотками	$> 100 \times 10^3$		[5]
	Радіальне зміщення витків	$> 50 \times 10^3$		[6]
		$> 100 \times 10^3$		[7]
	Міжвиткове коротке замикання	5×10^3	500×10^3	[4]
		$> 200 \times 10^3$		[5]
		$< 2 \times 10^3$		[3]
Осьове зміщення обмотки	$< 10 \times 10^3$		[4]	
	$> 500 \times 10^3$		[7]	
	$> 100 \times 10^3$		[6,7]	
Осердя	Деформації в магнітному осерді	$< 2 \times 10^3$		[3]
	Обертання магнітопроводу	$< 10 \times 10^3$		[4]
Щупи	Порушення контакту з вимірювальними проводами	$> 2 \times 10^7$		[3]
Інші	Слабкий контакт заземлення	$> 500 \times 10^3$		[7]
	Зміна опору заземлення	400×10^3	1×10^7	[5]
	Залишковий магнетизм	$< 2 \times 10^3$		[3]
	Пошкодження підводів до обмоток	$> 1 \times 10^7$		[8,9]

На прикладі досліджуваного трансформатора ТМН-6300/35, що мав дефект зсуву обмотки, в діапазоні частот від 20 кГц до 400 кГц мало місце відхилення поточних значень передатної функції (після сповзання витків обмотки) від початкових значень цієї функції (коли сповзання не було і трансформатор був справний).

З метою обґрунтування можливості виявлення зсуву витків обмоток СТ за результатами вимірювань параметрів його частотних характеристик перевіримо вплив фактору – зсув витків обмотки трансформатора на зміну графіку залежності передатної функції k_U , значення якої залежать від частоти тестового сигналу у досліджуваному частотному діапазоні.

Результати вимірювання значень параметрів частотної характеристики показані у вигляді графіків а і б на рис. 1. Це графіки значень передатної функції k_U , які змінюються в залежності від частоти тестового сигналу для двох однотипних силових трансформаторів.

Вимірювання проводились за умов, що один із досліджуваних трансформаторів (графік а) не має пошкоджень, а у іншого (графік б) – є осьовий зсув витків обмотки.

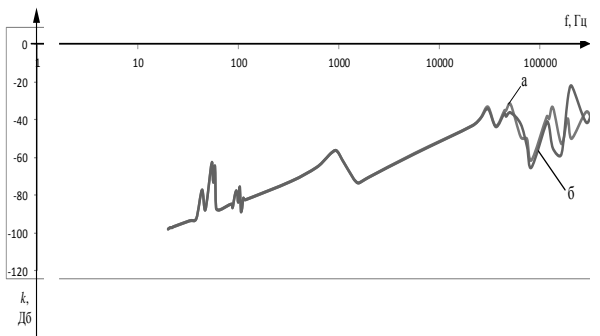


Рисунок 1 – Залежність передатної функції k_U від частоти

Передатна функція $k_U(f)$ визначається за виразом (1) [10].

$$k_U(f) = 20 \cdot \log_{10} [U_1(f) / U_2(f)], \text{ Дб.} \quad (1)$$

де U_1 – напруга тестового сигналу на виході FRAnalyzer; U_2 – напруга тестового сигналу на вході FRAnalyzer, яка є напругою сигналу відгуку на тестовий сигнал; f – частота тестового сигналу на виході FRAnalyzer. Напруга U_1 тестового сигналу з виходу FRAnalyzer подається на ввід 35 кВ (фаза А), а напруга U_2 тестового сигналу з вводу 10 кВ (фаза а) подається на вхід FRAnalyzer. Відповідно до рис.1 суттєві відхилення між графіками спостерігаються в діапазоні частот від 50690 до 462850 Гц., що говорить про можливі дефекти обмоток [3÷7]. Перевіримо, чи свідчить таке відхилення про дефект обмоток. Використовуємо виміряні значення передатної функції $k_U(f)$ в діапазоні саме цих частот. Результати вимірів, отримані за допомогою приладу FRAnalyzer (рис 1.) для справного та несправного силового трансформатора приведені в табл. 2. Вважаємо, що виконуються припущення дисперсійного аналізу, а

саме: значення передатної функції мають нормальний розподіл і номер графіка залежності (перший або другий графіки) не має впливу на дисперсію σ^2 величини k_U , але викликає розбіжність середніх значень k_U .

Таблиця 2 – Результати вимірів

Частота сигналу f , Гц	Значення передатної функції k_U , Дб	
	для справного трансформатора	для трансформатора з дефектом
20	-97,8	-97,8
21	-96,99	-96,99
...
50690	-37,57	-32
63980	-48,94	-45,9
73760	-49,91	-50,5
81800	-61,16	-62,5
115990	-38,07	-39
122150	-39,37	-40
133720	-33,33	-55
162350	-52,51	-54,1
187180	-39,2	-40
204910	-49,73	-21,85
286820	-35,58	-41,2
339340	-42,27	-31,52
396310	-34,69	-33
462850	-41,21	-40,95
...
1730000	-67,62	-67,63
1870000	-50,47	-50,47
1970000	-45,03	-45,03

Номер трансформатора j змінюється від 1 до u , тому $u = 2$. Номер точки на графіках l змінюється від 1 до m . Згідно з результатами вимірювань, де спостерігається відхилення значень передатної функції, максимальне значення частоти сигналу $f_{max}=462850$ Гц. Отримані результати відповідно до графіків (рис. 1), які мають видиму різницю значень передатної функції (між графіком а та графіком б) та які в подальшому необхідні для знаходження суми квадратів відхилень значень передатної функції та вибіркової дисперсії, показані в табл. 3. Вважатимемо, що j – номер графіка залежності, i – порядковий номер точки на графіку. Далі отримане значення першої точки k_U графіку а додається до значення першої точки k_U графіку б (i -тий результат графіку а додається до i – того результату графіку б, при $i = 1$). Так для перших точок при $i = 1$

$$\sum_{j=1}^2 k_{j,l} = \sum_{j=1}^2 k_{j,l} = -37,57 + (-32) = -69,57, \text{ Дб.}$$

Для інших точок графіку виконуємо таку саму операцію. Сума результатів вимірів для всіх точок графіків а та б. Наприклад, для першого графіка ($j=1$), значення K_1 має такий результат:

$$K_j = K_l = (-37,57) + (-48,94) + \dots + (-41,21) = -603,54, \text{ дБ.}$$

Далі підносимо до квадрату отримані результати додавання:

$$K_l^2 = -603,54^2 = 364260,5, \text{ дБ}^2.$$

Ділимо отримані (для кожного графіку) результати вимірювань на загальну кількість вимірних точок. Наприклад, для першого графіку:

$$\frac{1}{m} \cdot K_j^2 = \frac{1}{m} \cdot K_l^2 = \frac{1}{28} \cdot 364260,5 = 13009,305, \text{ дБ}^2.$$

Знаходимо суми піднесених до квадрату результатів вимірів по кожному графіку досліджуваних залежностей окремо. Так, наприклад, для першого графіку ($j=1, m_j=m_1=14$):

$$\sum_{l=1}^{m_j} k_{j,l}^2 = \sum_{l=1}^{m_l} k_{l,l}^2 = \sum_{l=1}^{14} k_{l,l}^2 = 1411,505 +$$

$$+ 2395,124 + \dots + 1698,264 = 26869,76, \text{ дБ}^2$$

Знаходимо суму значень k_U всіх точок на двох графіках (табл. 3):

Таблиця 3 – Результати проміжних розрахунків

№ j \ № i	f Гц	$k_{l,i}$	$k_{2,i}$	$\sum_{j=1}^{u=2} k_{j,i}$
1	50690	-37,57	-32	-69,57
2	63980	-48,94	-45,9	-94,84
3	73760	-49,91	-50,5	-100,41
4	81800	-61,16	-62,5	-123,66
5	115990	-38,07	-39	-77,07
6	122150	-39,37	-40	-79,37
7	133720	-33,33	-55	-88,33
8	162350	-52,51	-54,1	-106,61
9	187180	-39,2	-40	-79,2
10	204910	-49,73	-21,85	-71,58
11	286820	-35,58	-41,2	-76,78
12	339340	-42,27	-31,52	-73,79
13	396310	-34,69	-33	-67,69
14	462850	-41,21	-40,95	-82,16
K_j		-603,54	-587,52	
$\frac{1}{m} k_j^2$		13009,305	12327,848	
$\sum_{l=1}^{m_j} k_{j,l}^2$		26869,755	26194,395	

$$\sum_{j=1}^m K_j = \sum_{j=1}^{14} K_j = \sum_{j=1}^u \sum_{l=1}^m k_{j,l} =$$

$$= -603,54 - 587,52 = -1191,06, \text{ дБ.}$$

Сума квадратів результатів додавання значень k_U кожної точки для двох графіків, поділених на кількість точок у кожному графіку (по 14 точок):

$$Q_2 = \sum_{j=1}^u \frac{K_j^2}{m_j} = 13009,305 + 12327,848 = 25337,153, \text{ дБ}^2.$$

Сума піднесених до квадрату результатів всіх вимірів:

$$Q_l = \sum_{j=1}^u \sum_{l=1}^{m_j} k_{j,l}^2 = 26194,395 + 26869,755 = 53064,15, \text{ дБ}^2.$$

Загальна кількість вимірів:

$$M = 14 + 14 = 28.$$

Загальне середнє значення k_U за результатами всіх вимірювань:

$$k = -1191,06 / 28 = -42,538.$$

Підносимо до квадрату суму значень k_U всіх точок на двох графіках, поділений на кількість всіх спостережень (точок):

$$Q_3 = \frac{1}{M} \cdot \left(\sum_{j=1}^u K_j \right)^2 = \frac{-1191,06^2}{28} = 50665,14, \text{ дБ}^2.$$

Загальна сума квадратів відхилень k_U між графіками

$$S = Q_l - Q_3 = 53064,15 - 50665,14 \approx 2399,01, \text{ дБ}^2.$$

Сума квадратів відхилень значень k_U для всіх точок в межах одного графіка:

$$S_0 = Q_l - Q_2 = 53064,15 - 25337,153 = 27726,998, \text{ дБ}^2.$$

Сума квадратів відхилень значень k_U між графіками:

$$S_X = |Q_2 - Q_3| = |S - S_0| =$$

$$= |25337,153 - 50665,14| = 25327,987, \text{ дБ}^2.$$

Кількість досліджуваних трансформаторів (графіків) $u=2$. Кількість ступенів свободи значень k_U в межах одного графіка:

$$v_0 = M - u = 28 - 2 = 26.$$

Кількість ступенів свободи значень k_U між графіками:

$$v_X = u - 1 = 2 - 1 = 1.$$

Загальна кількість ступеней свободи

$$v = M - 1 = 28 - 1 = 27.$$

Загальна вибіркова дисперсія значень k_U

$$S^2 = S/v = 2399,01 / 27 = 88,852, \text{ дБ}^2.$$

Вибіркова дисперсія значень k_U в межах графіку:

$$S_0^2 = S_0/v_0 = 27726,998 / 26 = 1066,423, \text{ дБ}^2.$$

Вибіркова дисперсія значень k_U між графіками:

$$S_x^2 = S_x/v_x = 25327,987 / 1 = 25327,987, \text{ дБ}^2.$$

Виконаємо перевірку значимості впливу відхилень передатної функції k_U двох графіків. Тому знайдемо дисперсійне відношення (розрахункове значення критерію Фішера)

$$F = \frac{S_x^2}{S_0^2} = \frac{25327,987}{1066,423} = 23,75.$$

З [11] значення F-критерію для 5%-го рівня значимості і кількості ступенів свободи $v_1 = v_x = 1$ і $v_2 = v_0 = 26$ дорівнює $F_{0,05}(1; 26) = 4,22$.

Висновки. На прикладі двох силових трансформаторів доведена можливість виявлення дефектів обмоток силових трансформаторів за результатами перевірки адекватності їх частотних характеристик у досліджуваному частотному діапазоні, шляхом використання однофакторного аналізу та критерію Фішера. Очікується, що це дасть змогу за результатами вимірювань обґрунтувати висновки, щодо наявності пошкодження та доцільності продовження експлуатації чи виведення в ремонт.

Список використаних джерел

1. Рубаненко О. Є., Лабзун М. П., Гришук М. О. Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – 2017. – №. 23 (1245). – С. 41-46.

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

3. E. Rahimpour, J. Christian, K. Feser, and H. Mohseni, "Transfer function method to diagnose axial displacement and radial deformation of transformer windings," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 2, pp. 493-505, Apr. 2003.

4. J. A. S. B. Jayasinghe, Z. D. Wang, P. N. Jarman, and A. W. Darwin, "Investigations on sensitivity of FRA technique in diagnosis of transformer winding deformations," in Proceedings of International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, IN, 2004, pp. 496-499.

5. Contin, G. Rabach, J. Borghetto, M. D. Nigris, R. Passaglia, and G. Rizzi, "Frequency response analysis of power transformers by means of fuzzy tools," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, no 3, pp. 900-909, June 2011.

6. S. A. Ryder, "Methods for comparing frequency response analysis measurements," in Proceedings of International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA, 2002, pp. 187-190.

7. G. M. Kennedy, A. J. McGrail, and J. A. Lapworth, "Transformer Sweep Frequency Response Analysis," Energize, pp. 28-33, Oct. 2007.

8. E. Rahimpour and S. Tenbohlen, "Experimental and theoretical investigation of disc space variation in real high-voltage windings using transfer function method," IET Electric Power Applications, vol. 4, no. 6, pp. 451-461, July 2010.

9. E. Rahimpour, M. Jabbari, and S. Tenbohlen, "Mathematical comparison methods to assess transfer functions of transformers to detect different types of mechanical faults," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 2544-2555, Oct. 2010.

10. M. Florkowski, J. Furgal, Detection of transformer winding deformations based on the transfer function measurements and simulations, J. Meas. Sci. Technol. 14 (2013) 1986-1992.

11. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

Аннотация

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ДЕФОРМАЦИИ ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ FRA

Рубаненко А. Е., Лабзун М. П., Гришук М. О.

Проанализирована возможность определения дефектов обмоток силовых трансформаторов по результатам проверки адекватности их частотных характеристик в исследуемом частотном диапазоне, путем использования однофакторного анализа и критерия Фишера. Ожидается, что это позволит по результатам измерений обосновать выводы, о наличии повреждений и целесообразности продолжения эксплуатации или вывода в ремонт.

Abstract

REASONING THE POSSIBILITY OF DEFECTS OF DEFORMATION OF POWER TRANSFORMERS BY FRA MEASUREMENT RESULTS

A. Rubanenko, M. Labzun, M. Grischuk

The possibility of detecting defects of power transformer windings based on the results of checking the adequacy of their frequency characteristics in the frequency range studied, is analyzed, using one-factor analysis and Fisher's criterion. It is expected that this will enable the results of the measurements to substantiate the conclusions about the presence of damage and the expediency of continuing the operation or putting it into repair.