

Zastosowanie algorytmów do interpretacji wyników FRA

Streszczenie. W artykule przedstawiono porównanie najczęściej spotykanych w literaturze wzorów do interpretacji wyników uzyskanych przy pomiarach metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej stosowanej do diagnostyki transformatorów energetycznych. Kontrolowane deformacje wprowadzone w uzwojenia transformatora oraz wykorzystanie dwóch układów pomiarowych wykazały znaczne różnice w możliwości wykrycia uszkodzeń.

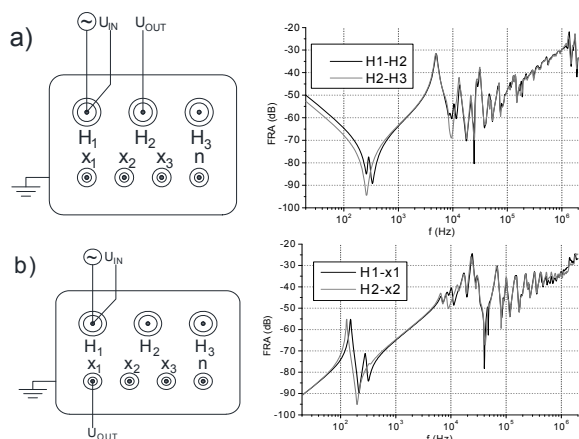
Abstract. The paper presents a comparison of the most frequently used formulas for interpreting the results obtained with the frequency response analysis method used to diagnose of power transformers. Controlled deformations introduced into windings and the use of two measuring setups showed significant differences in the possibility of detecting damages. (**Application of algorithms for interpreting FRA results**).

Słowa kluczowe: Transformator, analiza odpowiedzi częstotliwościowej, FRA, uzwojenia

Keywords: Transformer, Frequency Response Analysis, FRA, windings.

Wstęp

Niezawodna praca transformatorów w systemie elektroenergetycznym zapewnia stałe dostawy energii do odbiorców. Każdy transformator powinien być poddawany okresowym badaniom diagnostycznym w celu wykrycia uszkodzenia lub zapobieżenia rozwojowi defektów, co może doprowadzić do wykluczenia urządzenia z eksploatacji. Jedną z metod diagnostycznych aktywnej części transformatora jest analiza odpowiedzi częstotliwościowej FRA – (Frequency Response Analysis). Pomimo wielu zalet tej metody, interpretacja wyników pomiarów jest bardzo trudna i wymaga dużego doświadczenia. Aby ułatwić i zautomatyzować analizę wyników pomiarów, opracowano szereg algorytmów do oceny stanu technicznego transformatora [1]. W artykule przedstawiono porównanie najczęściej stosowanych współczynników w metodzie FRA, na podstawie danych zarejestrowanych na transformatorze testowym w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem dwóch układów pomiarowych.



Rys.1. Schematyczna prezentacja układów pomiarowych i odpowiadające im przykłady wyników badań: a) pomiar między końcami uzwojenia, b) pomiar międzyuzwojeniowy pojemnościowy

Metodyka pomiarowa

Metoda FRA opiera się na bezpośrednich pomiarach w dziedzinie częstotliwości. Aby wykonywane pomiary były powtarzalne metodyka badań została znormalizowana [2]. Podstawową konfiguracją pomiarową proponowaną przez normę jest pomiar między końcami wybranego uzwojenia, przy otwartych uzwojeniach strony przeciwnej (end-to-end

open - e2e) (rys. 1a), gdzie sygnał sinusoidalnie zmienny podany jest na jeden koniec uzwojenia i rejestrowany na drugim końcu.

Drugą konfiguracją jest pomiar międzyuzwojeniowy pojemnościowy (capacitive inter-winding - intCap) (rys. 1b), który polega na podaniu sygnału na jeden koniec uzwojenia pierwotnego i pomiarze na końcu uzwojenia wtórnego tej samej fazy.

Współczynniki obliczeniowe

FRA jest metodą porównawczą, dlatego by poprawnie interpretować wyniki należy posiadać dane referencyjne, nazywane inaczej odciskiem palca. W tabeli 1 przedstawiono wszystkie zebrane nazwy współczynników prezentowanych w literaturze, wraz z akronimem, źródłem literaturowym oraz stanem idealnym, czyli wartością przy porównywaniu identycznych wyników pomiarów (idealny przypadek). Strzałka wskazuje kierunek zmiany wartości wraz ze wzrostem odkształcenia.

Tabela 1. Współczynniki obliczeniowe FRA

Akronim	Pełna nazwa algorytmu	Stan idealny	Lit.
ASLE	Absolute Sum of Logarithmic Error	0 ↑	[3]
MSE	Mean Square Error	0 ↑	[4]
CSD	Comparative Standard Deviation	0 ↑	[4]
ED	Euclidean Distance	0 ↑	[5]
SD	Standard Deviation	0 ↑	[6]
RMSE	Root Mean Square Error	0 ↑	[7]
σ	Spectrum deviation	0 ↑	[8]
σ_s	Stochastic spectrum deviation	0 ↑	[9]
SSRE	Sum Squared Ratio Error	0 ↑	[10]
SSMMRE	Sum Squared Max-Min Ratio Error	0 ↑	[3]
MM	Minimum-Maximum Ratio	1 ↑	[4]
CCF	Cross Correlation Factor	1 ↓	[11]
ρ	Normalized correlation coefficient	1 ↓	[12]
CC	Correlation Coefficient	1 ↓	[9]

Poniżej przedstawiono wzory, które zostały użyte do opracowania danych uzyskanych z pomiarów FRA:

$$(1) \quad ASLE = \frac{\sum_{i=1}^N |20 \log_{10} Y_{li} - 20 \log_{10} Y_{0i}|}{N}$$

$$(2) \quad MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{0i} - Y_{li})^2}{N}$$

$$(3) \quad CSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(Y_{0i} - \bar{Y}_{0i}) - (Y_{li} - \bar{Y}_{li})]^2}{N - 1}}$$

$$(4) \quad ED = \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_{0i} - Y_{1i})^2}$$

$$(5) \quad SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{0i} - Y_{1i})^2}{N}}$$

$$(6) \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{|Y_{0i}| - |Y_{1i}|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_{1i}|} \right]^2}$$

$$(7) \quad \sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\left[\frac{Y_{0i} - \left(\frac{Y_{0i} + Y_{1i}}{2} \right)}{\frac{Y_{0i} + Y_{1i}}{2}} \right]^2 + \left[\frac{Y_{1i} - \left(\frac{Y_{1i} + Y_{0i}}{2} \right)}{\frac{Y_{1i} + Y_{0i}}{2}} \right]^2}$$

$$(8) \quad \sigma_s = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Y_{0i} - Y_{1i}}{Y_{1i}} \right|$$

$$(9) \quad SSRE = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_{1i}}{Y_{0i}} - 1 \right)^2}{N}$$

$$(10) \quad SSMRE = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\max(Y_{0i}, Y_{1i})}{\min(Y_{0i}, Y_{1i})} - 1 \right)^2}{N}$$

$$(11) \quad MM = \frac{\sum_{i=1}^N \min(Y_{0i}, Y_{1i})}{\sum_{i=1}^N \max(Y_{0i}, Y_{1i})}$$

$$(12) \quad CCF = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{1i} - \bar{Y}_1)(Y_{0i} - \bar{Y}_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_{1i} - \bar{Y}_1)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_{0i} - \bar{Y}_0)^2}}$$

$$(13) \quad \rho = \frac{\sum_{i=1}^N \left[|Y_{1i}| - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{1i} \right] \left[|Y_{0i}| - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{0i} \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \left[|Y_{1i}| - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{1i} \right]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[|Y_{0i}| - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{0i} \right]^2}}$$

$$(14) \quad CC = \frac{\sum_{i=1}^N Y_{0i} Y_{1i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_{0i})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_{1i})^2}}$$

gdzie: Y_0 jest zbiorem danych odniesienia, Y_1 jest serią porównywanych danych, \bar{Y}_0 , \bar{Y}_1 są arytmetycznymi wartościami średnimi wszystkich zsumowanych wartości zbioru danych, N jest całkowitą liczbą punktów.

Większość współczynników przyjmuje wartość 0 jako idealną i zwiększa się wraz ze wzrostem deformacji. Tylko trzy algorytmy przedstawione w artykule przyjmują wartość 1 przy porównaniu identycznych przebiegów, a wartość ta spada wraz ze wzrostem deformacji.

Pomiary laboratoryjne i przedstawienie wyników

Algorytmy przedstawione w tabeli 1 zostały przetestowane w oparciu o pomiary wykonane na rzeczywistym transformatorze 15/0,4 kV, o mocy 800 kVA, w którego uzwojenia zostały wprowadzone dwa symulowane uszkodzenia.

Pierwsza deformacja uzwojenia, przedstawiona na rysunku 2, polegała na rozsuwaniu kolejnych cewek o 6 mm, zaczynając od pierwszej górnej, a kończąc na piątej.



Rys.2. Symulowana deformacja uzwojenia – rozsuwanie cewek

Druga deformacja, pokazana na rysunku 3, polegała na usunięciu oryginalnych przekładek dystansowych między cewkami i ściśnięciu uzwojenia.



Rys.3. Symulowana deformacja uzwojenia – ścisnięcie cewek

Wyniki uzyskane w czasie pomiarów po wprowadzeniu deformacji części aktywnej transformatora, przeprowadzone w dwóch układach pomiarowych, zostały przedstawione w tabelach 2-5. Wszystkie wartości pokazują porównanie określonego stanu uszkodzenia uzwojeń w zestawieniu z badaniem referencyjnym, tzn. pomiarem wykonanym przed wprowadzeniem jakiegokolwiek deformacji. Tabela 2 przedstawia wyniki pomiarów wykonanych w układzie między końcami uzwojenia, gdzie cewki uzwojenia transformatora były rozsuwane kolejno o 6mm. Każdy kolejny poziom wprowadzonej deformacji powoduje spodziewaną zmianę wartości obliczonych współczynników. Wyniki przedstawione w ostatniej kolumnie znacząco różnią się od wcześniejszych serii, ponieważ nadmierne rozsuniecie cewek doprowadziło do zwarcia uzwojenia do jarzma transformatora.

Tabela 2. Wartości otrzymane przy użyciu współczynników obliczeniowych FRA - symulowana deformacja - rozsuwanie cewek w układzie e2e

	Idealne	1 góra	1,2 góra	1,2,3 góra	1,2,3,4 góra	Zwarcie
ASLE	0 ↑	0,131	0,165	0,188	0,23	0,805
MSE	0 ↑	3,593	4,64	5,631	8,57	44,369
CSD	0 ↑	1,856	2,113	2,329	2,88	6,643
ED	0 ↑	46,119	52,413	57,738	71,227	162,07
SD	0 ↑	1,895	2,113	2,329	2,927	6,661
RMSE	0 ↑	0,034	0,039	0,043	0,053	0,118
σ	0 ↑	0,011	0,013	0,015	0,019	0,065
σ_s	0 ↑	1,5124	1,901	2,184	2,662	9,299
SSR	0 ↑	0,000910	0,00123	0,00147	0,00238	0,0140
SSMRE	0 ↑	0,000795	0,00105	0,00131	0,00192	0,0120
MM	1 ↓	1,016	1,02	1,023	1,028	1,098
CCF	1 ↓	0,9028864	0,875067	0,8458	0,7656	0,4325
ρ	1 ↓	0,99986	0,99982	0,999782	0,999666	0,998264
CC	1 ↓	0,9994492	0,9992845	0,9991311	0,9986681	0,9931257

W tabeli 3 przedstawiono wyniki pomiarów podczas rozsuwania cewek zarejestrowane w układzie międzyuzwojeniowym pojemnościowym. Podobnie jak we wcześniej przedstawionych wynikach, tutaj także wszystkie wzory wykazują spodziewane tendencje do zmiany wartości wraz ze wzrostem zaawansowania deformacji.

Tabela 3. Wartości otrzymane przy użyciu współczynników obliczeniowych FRA; symulowana deformacja: rozsuwanie cewek w układzie intCap

	Idealne	1 góra	1,2 góra	1,2,3 góra	1,2,3,4 góra	Zwarcie
ASLE	0 ↑	0,104	0,144	0,189	0,26	1,033
MSE	0 ↑	0,764	1,0776	1,568	2,862	57,237
CSD	0 ↑	0,86	0,985	1,101	1,366	7,488
ED	0 ↑	21,265	25,258	30,469	41,165	184,078
SD	0 ↑	0,874	1,038	1,252	1,692	7,566
RMSE	0 ↑	0,018	0,022	0,026	0,035	0,164
σ	0 ↑	8,49E-03	0,012	0,015	0,021	0,084
σ_s	0 ↑	1,1833	1,627	2,138	2,923	12,612
SSR	0 ↑	0,000480	0,000652	0,000903	0,00165	0,0210
SSMMRE	0 ↑	0,000433	0,000583	0,000810	0,00144	0,0190
MM	1 ↑	1,010	1,015	1,021	1,029	1,128
CCF	1 ↓	0,991779	0,990493	0,9878	0,9799	0,0711
ρ	1 ↓	0,99996	0,99994	0,999928	0,999887	0,996801
CC	1 ↓	0,999834	0,999777	0,999715	0,999556	9,873387

W tabeli 4 zawarte są wyniki badań wykonanych w układzie koniec do końca otwartym. Porównania badania referencyjnego z odpowiedziami częstotliwościowymi zdeformowanego uzwojenia podczas ściskania uzwojeń w większości przypadków wyniki nie wykazały jednoznacznej tendencji. Obliczenia przeprowadzone dla tego układu pomiarowego po ściśnięciu pięciu górnych cewek wykazują mniejszy poziom deformacji niż przy ściśnięciu czterech cewek. Takie rezultaty mogą wynikać z wielkości wprowadzonej deformacji, gdyż wypadnicę przekładek dystansowych jest możliwe w warunkach eksploatacyjnych, ale ściśnięcie pięciu cewek jest przewymiarowaną deformacją, zasymulowaną na potrzeby porównania wartości współczynników.

Tabela 4. Wartości otrzymane przy użyciu współczynników obliczeniowych FRA; symulowana deformacja: ściskanie cewek w układzie e2e

	Idealne	1,2 bez	1,2,3 bez	1,2,3,4 bez	1,2,3,4,5 bez
ASLE	0 ↑	0,14	0,189	0,225	0,23
MSE	0 ↑	2,916	4,1996	5,113	5,044
CSD	0 ↑	1,594	1,842	1,93	1,902
ED	0 ↑	41,548	49,862	55,015	54,647
SD	0 ↑	1,708	2,049	2,261	2,246
RMSE	0 ↑	0,03	0,036	0,04	0,039
σ	0 ↑	0,011	0,015	0,018	0,019
σ_s	0 ↑	1,5998	2,141	2,543	2,6
SSR	0 ↑	0,000742	0,00111	0,00142	0,00138
SSMMRE	0 ↑	0,000662	0,000960	0,00120	0,00119
MM	1 ↑	1,017	1,023	1,027	1,028
CCF	1 ↓	0,939928	0,928548	0,9181	0,9164
ρ	1 ↓	0,9999	0,99987	0,999858	0,999862
CC	1 ↓	0,999605	0,999482	0,9994352	0,9994494

Tabela 5 przedstawia porównania wyników otrzymanych w układzie międzyuzwojeniowym pojemnościowym, uzyskanych dla ściskanych cewek. W tym układzie różnice w wynikach obliczeń były współmiernie do poziomu wprowadzonej deformacji; nie pojawił się problem, jaki zaobserwowano w układzie koniec do końca.

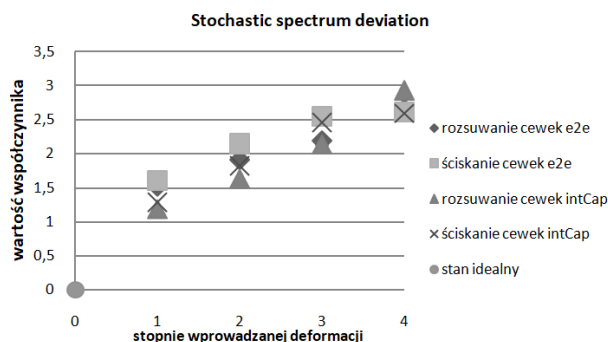
Tabela 5. Wartości otrzymane przy użyciu współczynników obliczeniowych FRA; symulowana deformacja: ściskanie cewek w układzie intCap

	Idealne	1,2 bez	1,2,3 bez	1,2,3,4 bez	1,2,3,4,5 bez
ASLE	0 ↑	0,109	0,155	0,21	0,222
MSE	0 ↑	0,774	1,0267	1,518	1,857
CSD	0 ↑	0,873	0,997	1,181	1,296
ED	0 ↑	21,407	24,654	29,977	33,157
SD	0 ↑	0,88	1,013	1,232	1,363
RMSE	0 ↑	0,019	0,022	0,026	0,029
σ	0 ↑	8,86E-03	0,013	0,017	0,018
σ_s	0 ↑	1,2757	1,813	2,451	2,597
SSR	0 ↑	0,000486	0,000690	0,000822	0,000994
SSMMRE	0 ↑	0,000485	0,000598	0,000816	0,000985
MM	1 ↑	1,010	1,017	1,023	1,024
CCF	1 ↓	0,993956	0,993989	0,9911	0,9877
ρ	1 ↓	0,99996	0,99994	0,999917	0,9999003
CC	1 ↓	0,99983	0,999775	0,999676	0,9996089

Ze względu na dużą liczbę współczynników porównawczych, na wykresach przedstawiono tylko wybrane wyniki. Opisane wzory podzielono w grupy, które

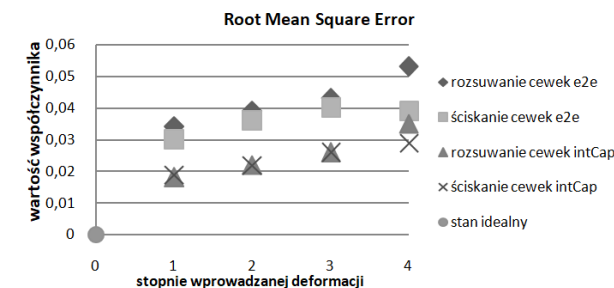
różnią się wartościami, ale zachowują korelację między sobą, co do zdolności wykrywania deformacji.

Współczynniki ASLE, σ_s , σ oraz MM charakteryzują się dobrą zdolnością wykrywania symulowanych deformacji w obu układach pomiarowych. Liniowa zależność wartości kolejnych stopni deformacji ułatwia określenie stopnia głębokości zmian uzwojenia, co można zauważyć na rysunku 4.



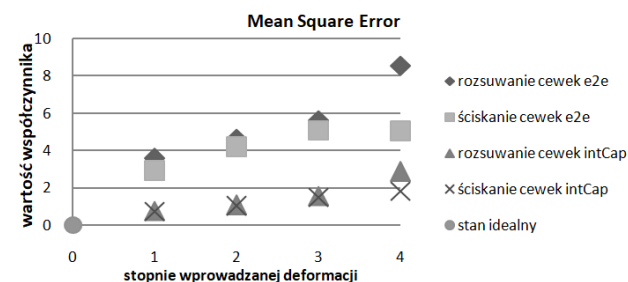
Rys.4. Wyniki wykrywania deformacji uzwojeń transformatora zmierzone dwoma układami pomiarowymi z wykorzystaniem współczynnika Stochastic spectrum deviation

Wyniki uzyskane przez obliczenie RMSE, CSD, ED, SD, SSMMRE wykrywają znacznie lepiej deformacje zmierzone w badaniu między końcami uzwojenia. Wyniki pomiarów wykonanych w układzie międzyuzwojeniowym pojemnościowym mają liniowy charakter, ale przyjmują mniejsze wartości różnic wykrytych deformacji. Wyniki obliczeń dla algorytmów RMSE, CSD, ED, SD, SSMMRE przedstawiono na rysunku 5.



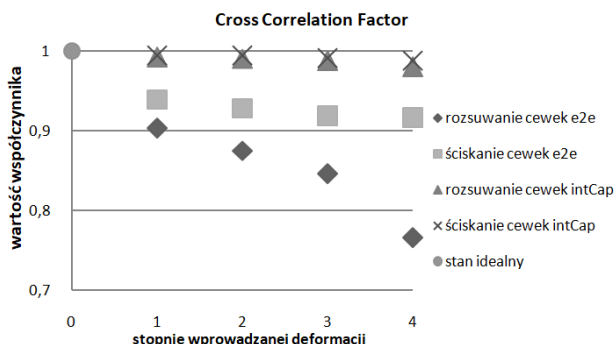
Rys.5. Wyniki wykrywania deformacji uzwojeń transformatora zmierzone dwoma układami pomiarowymi z wykorzystaniem współczynnika RMSE

Porównania wykonane z użyciem wzorów MSE i SSR jeszcze słabiej, niż we wcześniejszej grupie, wykrywają deformacje zbadane układem międzyuzwojeniowym pojemnościowym, ale w jeszcze większym stopniu wykrywają rozsuniecie cewek w pomiarze między końcami uzwojenia. Wyniki uzyskane z obliczenia różnic metodą MSE przedstawiono na rysunku 6.



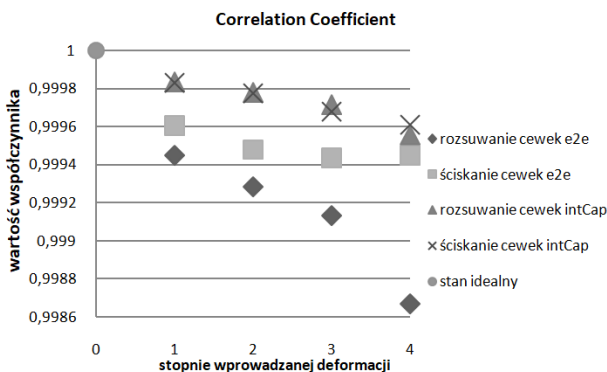
Rys.6. Wyniki wykrywania deformacji uzwojeń transformatora zmierzone dwoma układami pomiarowymi z wykorzystaniem współczynnika MSE

Rysunek 7 przedstawia wyniki uzyskane za pomocą analizy porównawczej CCF. Ten współczynnik porównawczy przyjmuje wartość 1 dla dwóch identycznych zbiorów danych, a jego wartość maleje wraz ze stopniem deformacji uzwojeń. Widać, że wyniki obliczeń uzyskanych dla pomiarów wykonanych w układzie międzyuzwojeniowym pojemnościowym wpływają znacznie mniej na zmiany wartości, niż przy pomiarze między końcami uzwojenia. Najmocniej na zmiany wartości współczynnika wpłynęły badania w układzie e2e, przy rozsuwaniu cewek transformatora.



Rys.7. Wyniki wykrywania deformacji uzwojeń transformatora zmierzone dwoma układami pomiarowymi z wykorzystaniem współczynnika CCF

Podobną czułość na zmianę defektu mają współczynniki CC (Correlation Coefficient) i ρ (Normalized correlation coefficient), które także przyjmują wartość 1 dla zbiorów jednakowych, a ich wartość maleje przy wzroście różnicy między dwoma zbiorami danych. Na rysunku 8 widać, że współczynnik CC w większym stopniu wykrywa deformacje mierzone układem międzyuzwojeniowym pojemnościowym niż CCF, ale mimo to zmiany wartości są dużo mniejsze niż w przypadku badania między końcami uzwojenia.



Rys.8. Wyniki wykrywania deformacji uzwojeń transformatora zmierzone dwoma układami pomiarowymi z wykorzystaniem współczynnika CC

Wnioski

Wyniki badań przedstawione w artykule pokazują, że różne równania wykrywają deformacje w różnym stopniu w zależności od rodzaju uszkodzenia i układu pomiarowego. Niektóre algorytmy mogą okazać się mniej skuteczne w układzie międzyuzwojeniowym pojemnościowym. Pomimo mniejszych wartości, świadczących o wielkości powstałego defektu, układ międzyuzwojeniowy pojemnościowy w większości przypadków wykazuje dużą liniowość do wykrywania deformacji, co ułatwia interpretację wielkości deformacji,

dlatego wyniki uzyskane z pomiarów układem pojemnościowym powinny być interpretowane niezależnie od wyników zmierzonych między końcami uzwojenia.

Różny poziom czułości w przypadku przesunięcia uzwojeń decyduje o tym, że prawidłowa interpretacja wyników powinna być oparta na porównaniu kilkoma równaniami.

Korzystanie z wielu algorytmów jednocześnie może być czasochłonne i uciążliwe, dlatego w przemyśle powinny być wykorzystane współczynniki, które charakteryzują się największą uniwersalnością, tzn. takie, aby charakter wykrywania deformacji niezależnie od rodzaju uszkodzenia oraz użytego do pomiarów układu pomiarowego nie wpływał znacząco na otrzymane wyniki analizy.

Autor: mgr inż. Wojciech Szoka, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, ul. Sikorskiego 37, 70-310 Szczecin, E-mail: wojciech.szoka@zut.edu.pl

LITERATURA

- [1] Samimi M.H., Tenbohlen S., FRA interpretation using numerical indices: State-of-the-art, *Electrical Power and Energy Systems*, 89, 2017, 115-125.
- [2] IEC 60076-18: Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response, *IEC standard*, 2012.
- [3] Jong-Wook K, et al. Fault diagnosis of a power transformer using an improved frequency-response analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 1, No.1, 2005, 169-178.
- [4] Badgujar K. P., Maoyafikuddin M., Kulkarni SV., Alternative statistical techniques for aiding SFRA diagnostics in transformers, *IET Gener Transm Distrib*, 6(3), 2012, 189-198.
- [5] Pourhossein K., Gharehpetian G., Rahimpour E., Araabi B., A probabilistic feature to determine type and extent of winding mechanical defects in Power transformers. *Electr. Power. Syst. Res.*, 82(1), 2012, 1-10.
- [6] Nirgude P., Ashokraju D., Rajkumar A., Singh B., Application of numerical evaluation techniques for interpreting frequency response measurements in power transformers. *IET Sci. Meas. Technol.*, 2(5), 2008, 275-285.
- [7] Heindl M., Tenbohlen S., Kraetge A., Krüger M., Velásquez J., Algorithmic determination of pole zero representations of power transformers transfer functions for interpretation of FRA data, Paper D-26, 16th int. symp. on high voltage engineering, Johannesburg, 2009.
- [8] Ji T., Tang W., Wu Q., Detection of power transformer winding deformation and variation of measurement connections using a hybrid winding model, *Electr. Power. Syst. Res.*, 87, 2012, 39-46.
- [9] Bak-Jensen J., Bak-Jensen B., Mikkelsen S. D., Detection of faults and ageing phenomena in transformers by transfer functions. *IEEE Trans. Power Delivery*, 10(1), 1995, 308-314.
- [10] Ghanizadeh A. J., Gharehpetian G. B., ANN and cross-correlation based features for discrimination between electrical and mechanical defects and their localization in transformer winding, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 21(5), 2014, 2374-2382.
- [11] Kennedy G. M., McGrail A. J., Lapworth J. A., Using Cross-Correlation Coefficients to Analyze Transformer Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) Traces, *IEEE PES PowerAfrica (2007) Conference and Exposition*. Johannesburg, South Africa, 16-20 July 2007.
- [12] Rahimpour E., Jabbari M., Tenbohlen S., Mathematical comparison methods to assess transfer functions of transformers to detect different types of mechanical faults, *IEEE Trans. Power. Deliv.*, 25(4), 2010, 2544-2555.