

Kamil LEWANDOWSKI*, Hubert MORAÑDA*

ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKRYWANIA MIEJSCA ZWARCIA ZWOJOWEGO W TRANSFORMATORZE ENERGETYCZNYM NA PODSTAWIE JEGO ODPOWIEDZI CZĘSTOTLIWOŚCIOWEJ (SFRA)

W artykule zaprezentowano wyniki badań części aktywnej transformatora uzyskane przy użyciu metody SFRA. Przebadano jednostkę o mocy 630 kVA i układzie połączeń Dyn5. Przedstawiono i porównano uzyskane charakterystyki odpowiedzi częstotliwościowej dla transformatora bez defektów oraz z zaimplementowanym defektem, w postaci zwarcia zwojowego. Zwarcie zwojowe wykonywano w różnych częściach uzwojenia górnego napięcia, w celu sprawdzenia możliwości lokalizowania miejsca wystąpienia tego defektu. Pomiar wykonano czterema różnymi sposobami: pomiar odpowiedzi częstotliwościowej badanego uzwojenia przy zwartych i rozwartych zaciskach liniowych pozostałych uzwojeń oraz pomiar międzyuzwojeniowy – indukcyjny i pojemnościowy. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań oceniono wpływ lokalizacji zwarcia zwojowego w transformatorze na przebieg jego odpowiedzi częstotliwościowej.

SŁOWA KLUCZOWE: SFRA, transformator energetyczny, zwarcie zwojowe.

1. WSTĘP

Transformatory energetyczne są kluczowymi elementami systemu elektroenergetycznego. Jakiegokolwiek przerwy w dostawie energii elektrycznej, które są wynikiem awarii transformatora, generują olbrzymie koszty z tytułu napraw i kar za niedostarczenie energii odbiorcom. Z tych powodów prewencyjna diagnostyka transformatorów jest niezwykle ważna [1].

Istnieje wiele metod diagnostyki stanu technicznego transformatora. Jedną z nich jest analiza odpowiedzi częstotliwościowej SFRA (ang. *Sweep Frequency Response Analysis*). W metodzie tej generuje się sinusoidalne sygnały napięciowe o szerokim zakresie częstotliwości, podaje się je na wejście (izolator przepustowy) transformatora, oraz mierzy napięcie na wejściu i wyjściu badanego urządzenia [2].

W celu wyznaczenia odpowiedzi częstotliwościowej transformatora należy obliczyć wartość funkcji przenoszenia *FRA*, rozumianej jako logarytm ze sto-

* Politechnika Poznańska

sunku napięcia na wejściu i wyjściu badanego układu, dla każdej częstotliwości probierczej [2]:

$$FRA = 20 \cdot \log \left(\frac{U_2}{U_1} \right), \quad (1)$$

gdzie: FRA – wartość funkcji przenoszenia [dB], U_1 – napięcie mierzone na wejściu transformatora [V], U_2 – napięcie mierzone na wyjściu transformatora [V].

Norma [3] zaleca wykonywanie pomiarów dla częstotliwości z zakresu od 20 Hz do 2 MHz. Uwzględnienie w trakcie pomiarów niższych częstotliwości wydłuża czas tych pomiarów i nie wnosi wiele do możliwości diagnostycznych samej metody. Natomiast wyniki pomiarów w zakresie wysokiej częstotliwości (powyżej 2 MHz) charakteryzują się dużą zmiennością, która może być spowodowana, poza defektem transformatora, także czynnikami zewnętrznymi (np. wpływem ułożenia przewodów pomiarowych). Znacząco utrudnia to analizę uzyskanych charakterystyk i wyciąganie na ich podstawie wniosków [4].

Aktualnie, wielu naukowców trudni się opracowaniem algorytmu, który potrafiłby w sposób jednoznaczny zdiagnozować stan transformatora na podstawie wyników pomiarów uzyskanych metodą SFRA [1, 5]. Główną trudnością w tych pracach jest fakt, że w tym celu należy zamodelować analizowany transformator przez skomplikowany układ elementów RLC. Przy zakładanym wysokim podobieństwie odpowiedzi częstotliwościowej rzeczywistego transformatora i jego modelu okazuje się, że siatka elementów RLC tworzących model może zawierać miliony tych elementów. Ponadto, każdy transformator jest nieco inny i nawet transformatory bliźniacze charakteryzują się pewnymi różnicami w ich odpowiedzi częstotliwościowej. W związku z tym nadal najskuteczniejszą i najpowszechniej stosowaną metodą interpretacji wyników pomiarów jest jakościowa analiza różnic pomiędzy dwiema odpowiedziami częstotliwościowymi (choć czasami wspierana wynikami prostych obliczeń, np. współczynnika korelacji między przebiegami).

Ideałem byłoby, aby uzyskaną podczas pomiarów diagnostycznych odpowiedź częstotliwościową transformatora można było porównać z jego odpowiedzią wzorcową, zarejestrowaną podczas np. pomiarów fabrycznych nowej jednostki. W przypadku braku przebiegów wzorcowych do analizy porównawczej można wykorzystać wyniki pomiarów uzyskane na transformatorze bliźniaczym. W przypadku braku jakichkolwiek przebiegów wzorcowych praktykowanym sposobem jest porównywanie ze sobą przebiegów ze skrajnych faz badanego transformatora. Jednak podczas analizy porównawczej należy wtedy uwzględnić fakt, że odpowiedź częstotliwościowa tych uzwojeń nigdy nie będzie identyczna. Wynika to np. z niesymetryczności magnetycznej rdzenia transformatorów czy z różnego położenia uzwojeń poszczególnych faz transformatora względem przełącznika zaczepek. Ponadto, pomimo, że zdiagnozowanie obecności i rodzaju defektu w jednej z faz transformatora może być jednoznaczne, to porów-

nywanie przebiegów dla skrajnych faz zazwyczaj nie da informacji o tym która z tych faz jest zdefektowana. W tym celu może być konieczne posłużenie się innymi metodami diagnostycznymi.

Metoda SFRA pozwala na wykrycie szeregu defektów transformatorów, takich jak [6, 7]:

- a) przemieszczenie uzwojeń,
- b) deformacja uzwojeń,
- c) zwarcia wewnątrz uzwojeń,
- d) zmiana siły ściskającej część aktywną,
- e) uszkodzenia rdzenia.

Wykrywanie wyżej wymienionych defektów jest możliwe, gdyż w różny sposób wpływają one na odpowiedź częstotliwościową transformatora.

Celem przeprowadzonych i opisanych w artykule badań była ocena możliwości lokalizowania zwarcia zwojowego w transformatorze na podstawie przebiegów jego odpowiedzi częstotliwościowej.

2. OPIS BADANEGO TRANSFORMATORA I SPOSÓB WYKONANIA POMIARÓW

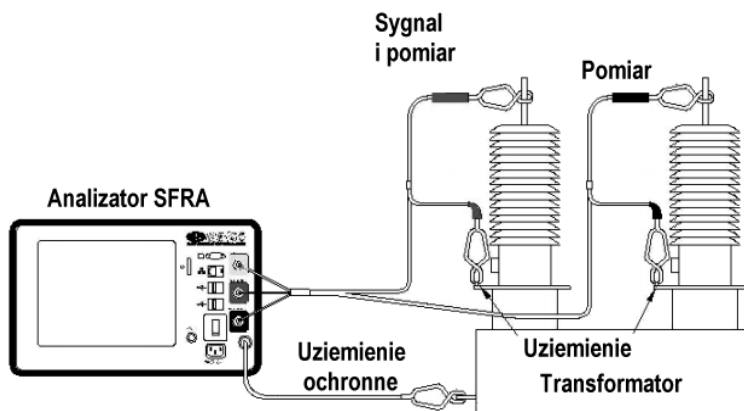
Obiektem badań był transformator o mocy 630 kVA i układzie połączeń Dyn5. Fotografia części aktywnej tego transformatora została przedstawiona na rysunku 1. Do badań część aktywna była wyjęta z kadzi ale miała zamontowane izolatory przepustowe oraz pokrywę górną.

Badane uzwojenie górnego napięcia składało się z 64 cewek. W trakcie realizacji wszystkich pomiarów dla danej konfiguracji pomiarowej nie zmieniano położenia przewodów pomiarowych, co pozwoliło wyeliminować wpływ ułożenia tych przewodów na wyniki badań.

Pomiary były realizowane zgodnie z metodą drugą (rys. 2), opisaną w PN-EN 60076-18:2013 [3]. W metodzie tej ekrany przewodów pomiarowych uziemia się do postawy izolatora przepustowego przewodami o znanej, równej długości. Mimo, że powtarzalność wyników pomiarów w tej metodzie jest nieco gorsza niż dla, również opisanej w normie, metody pierwszej (w której uziemienie ekranów następuje jak najkrótszą drogą wzdłuż izolatora) to, ze względu na prostotę, taki sposób łączenia przewodów jest najczęściej wykorzystywany. Należy jednak podkreślić, że w przeprowadzonym eksperymencie wady metody drugiej nie ujawniły się, gdyż przewody pomiarowe dla każdej konfiguracji pomiarowej nie zmieniały swojego ułożenia.



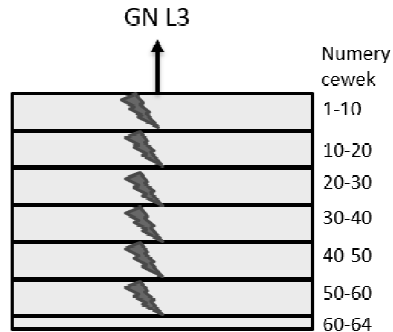
Rys. 1. Fotografia części aktywnej badanego transformatora



Rys. 2. Sposób łączenia przewodów pomiarowych w metodzie drugiej [Na podstawie 8]

W trakcie badań była realizowana następująca procedura pomiarowa:

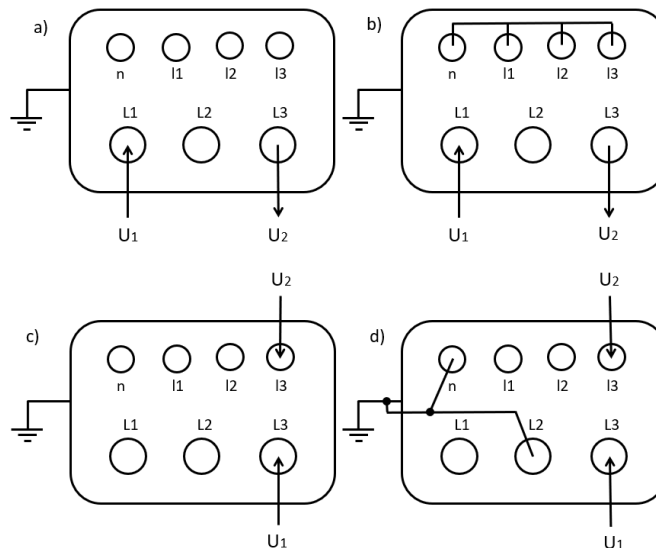
- podłączenie przewodów pomiarowych i zarejestrowanie odpowiedzi częstotliwościowej transformatora „zdrowego” – bez zamodelowanego defektu,
- wykonanie zwarcia zwojowego w fazie L3 górnego napięcia, poprzez zwarcie miedzianymi linkami wybranych dziesięciu kolejnych cewek uzwojenia (rys. 3),
- zarejestrowanie odpowiedzi częstotliwościowej zdefektowanego transformatora,
- zmiana miejsca zwarcia,
- powtórzenie punktów c i d.



Rys. 3. Miejsca wykonywania zwarć zwojowych uzwojenia górnego napięcia fazy L3

Pomiary wykonano dla czterech konfiguracji pomiarowych (rys. 4) [9]:

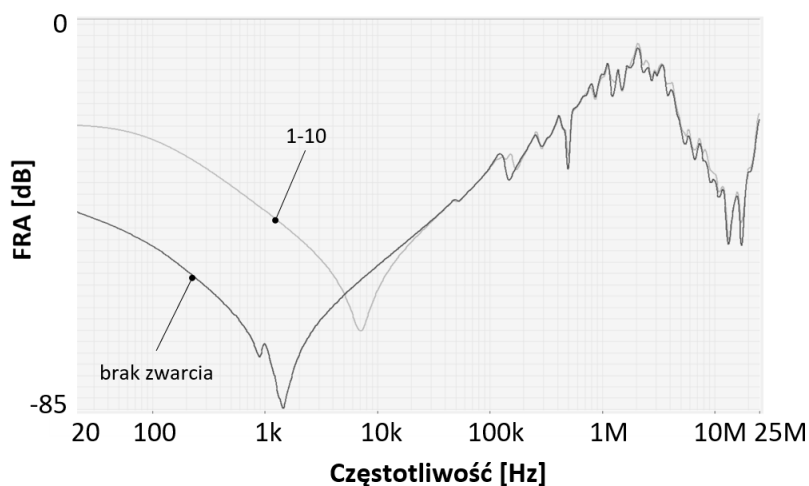
- A: wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej badanego uzwojenia przy rozwartych zaciskach liniowych drugiego uzwojenia,
- B: wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej badanego uzwojenia przy zwartych zaciskach liniowych drugiego uzwojenia,
- C: wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej w układzie międzyuzwojeniowym pojemnościowym (pomiędzy początkami uzwojeń górnego i dolnego napięcia tej samej fazy, przy rozwartych końcach badanych uzwojeń),
- D: wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej w układzie międzyuzwojeniowym indukcyjnym (pomiędzy początkami uzwojeń górnego i dolnego napięcia tej samej fazy, przy zwartych i uziemionych końcach badanych uzwojeń).



Rys. 4. Zrealizowane w trakcie badań konfiguracje pomiarowe: a) sposób A, b) sposób B, c) sposób C, d) sposób D [8]

3. WYNIKI POMIARÓW I ICH ANALIZA

Na rysunku 5 przedstawiono odpowiedzi częstotliwościowe badanego transformatora, dla zakresu częstotliwości od 20 Hz do 2 MHz, wykonane sposobem A, dla przewodów pomiarowych podłączonych do zacisków liniowych L1 oraz L3 uzwojenia górnego napięcia. Z rysunku wynika, że zwarcie zwojowe w transformatorze objawia się, przede wszystkim, w zakresie niskiej częstotliwości, do około 50 kHz. Jest to zakres w którym objawiają się defekty obwodu magnetycznego rdzenia transformatora.

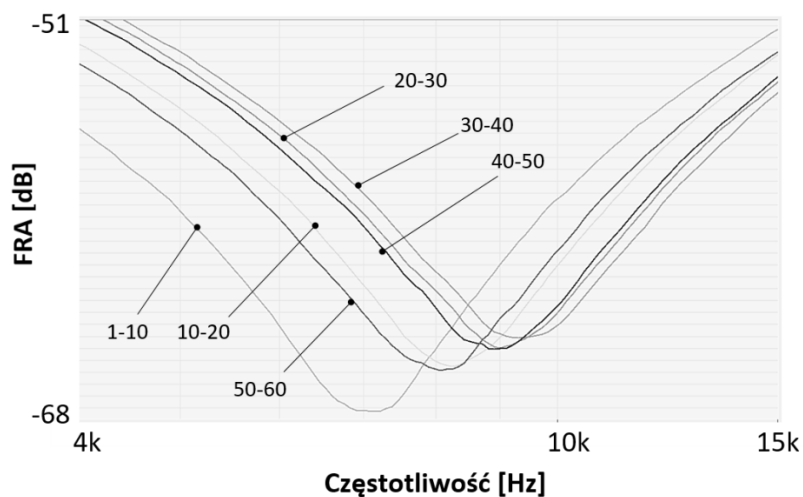


Rys. 5. Odpowiedzi częstotliwościowe uzwojeń transformatora sprawnego oraz z wykonanym zwarcie zwojowym; pomiary przeprowadzono między zaciskami faz L1 i L3 górnego napięcia

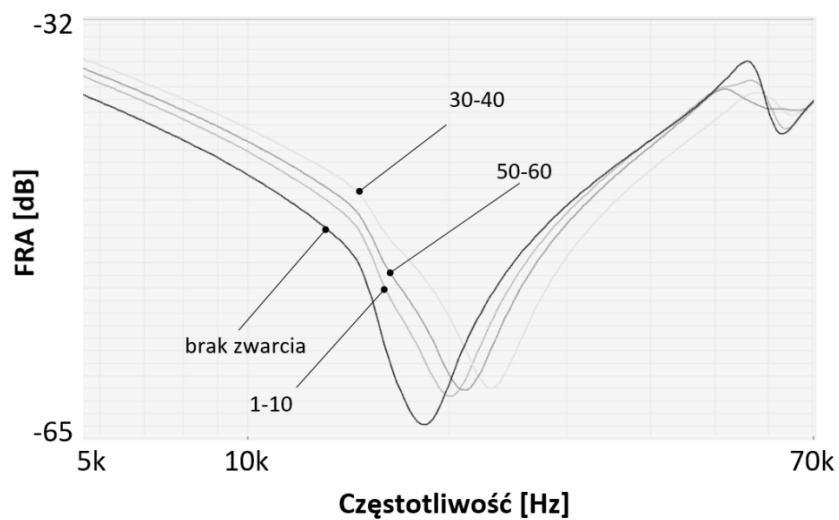
Analiza wybranych charakterystyk wykazała, że zakres częstotliwości, który mógłby posłużyć do zlokalizowania zwarcia zwojowego w transformatorze, zawiera się:

- w przypadku wykonywania pomiarów w konfiguracji A, B oraz D – między 6 i 10 kHz (rys. 6, 7 i 9),
- w przypadku wykonywania pomiarów w konfiguracji C – między 6,5 i 8,5 kHz (rys. 8).

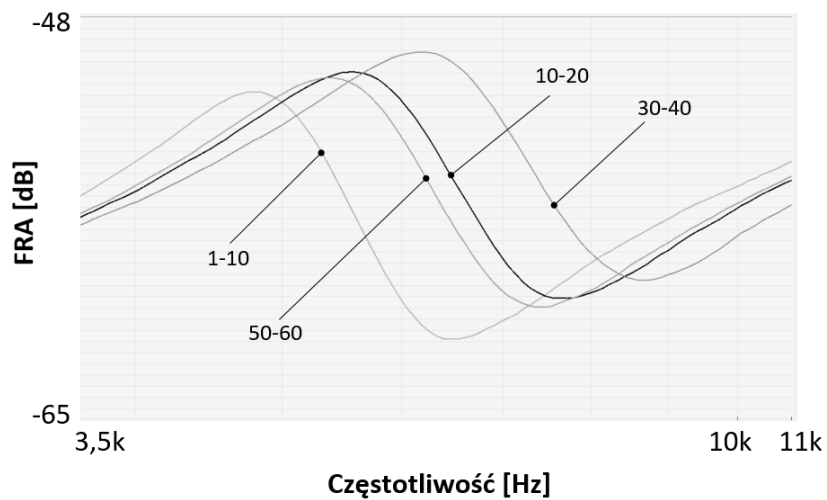
W tabelicy 1 zestawiono wartości pierwszej częstotliwości rezonansowej dla konfiguracji A, B i D oraz, dogodniejszy do analizy, rezonans dla konfiguracji C, wraz z odpowiadającymi danej częstotliwości wartościami funkcji przeniesienia $TF(f)$.



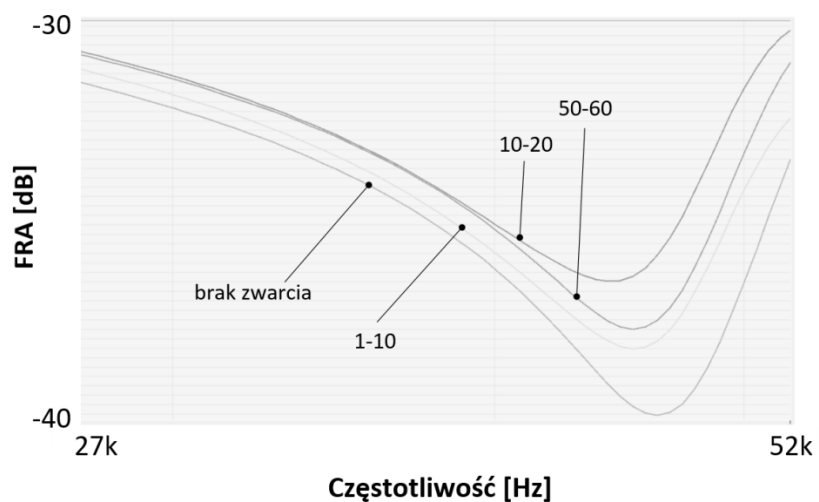
Rys. 6. Odpowiedzi częstotliwościowe badanego transformatora ze zwarcim międzyzwojowym, zarejestrowane między zaciskami L1 i L3 uzwojenia górnego napięcia, w konfiguracji A, w zakresie częstotliwości od ok. 4 kHz do ok. 15 kHz



Rys. 7. Odpowiedzi częstotliwościowe badanego transformatora ze zwarcim międzyzwojowym, zarejestrowane między zaciskami L1 i L3 uzwojenia górnego napięcia, w konfiguracji B, w zakresie częstotliwości od ok. 5 kHz do ok. 70 kHz



Rys. 8. Odpowiedzi częstotliwościowe badanego transformatora ze zwarcim międzyzwojowym, zarejestrowane między zaciskami górnego i dolnego napięcia uzwojenia fazy L3, w konfiguracji C, w zakresie częstotliwości od ok 3,5 kHz do ok. 11 kHz



Rys. 9. Odpowiedzi częstotliwościowe badanego transformatora ze zwarcim międzyzwojowym, zarejestrowane w zakresie częstotliwości od ok. 27 kHz do ok. 52 kHz, między zaciskami górnego i dolnego napięcia uzwojenia fazy L3, w konfiguracji D

Tablica. 1. Zestawienie wartości pierwszej częstotliwości rezonansowej w zależności od zastosowanej konfiguracji pomiarowej i miejsca zwarcia cewek.

Konfiguracja pomiarowa	Miejsce podłączenia przewodów pomiarowych	Numery zwartych cewek	Częstotliwość rezonansowa f_r [Hz]	TF dla f_r [dB]
A	L1 – L3	1–10	7136	-67,9
		10–20	8240	-65,8
		20–30	9102	-65,0
		30–40	9203	-64,6
		40–50	9002	-65,2
		50–60	8424	-65,6
B	L1 – L3	0	18273	-64,0
		1–10	20185	-61,7
		30–40	23307	-61,0
		50–60	20867	-61,1
C	L3 – l3	1–10	6460	-62,0
		10–20	7797	-60,1
		30–40	8518	-59,4
		50–60	7459	-60,5
D	L3 – l3	0	46273	-40,1
		1–10	45261	-38,3
		10–20	44271	-36,5
		50–60	45261	-37,8

Analizując uzyskane wyniki pomiarów można stwierdzić, że:

- a) zwarcie zwojowe objawia się:
 - dla konfiguracji pomiarowej A, B oraz D, przede wszystkim, w przesunięciu pierwszej częstotliwości rezonansowej,
 - dla konfiguracji pomiarowej C najdogodniejsze są rezonanse występujące przy częstotliwości pomiędzy 6,5 kHz i 8,5 kHz,
- b) zlokalizowanie miejsca zwarcia na podstawie pierwszej częstotliwości rezonansowej jest częściowo możliwe; częstotliwość rezonansowa rośnie dla zwieranych cewek od 1-10 do 30-40, natomiast dla cewek od 40-50 do 50-60 częstotliwość rezonansowa maleje, niemal pokrywając się z wynikami dla cewek od 1-10 do 30-40; przeprowadzone badania wykazały, że niemożliwe jest jednoznaczne wskazanie miejsca zwarcia zwojowego ale na podstawie analizy przebiegów SFRA można wskazać w jakiej odległości od środka uzwojenia zwarcie zwojowe jest umiejscowione,

- c) analiza pozostałych częstotliwości rezonansowych wykazała podobny charakter zmian odpowiedzi częstotliwościowej w zależności od lokalizacji defektu; zmiany te są jednak dużo mniej widoczne niż w przypadku pierwszych rezonansów.

4. PODSUMOWANIE

Metoda SFRA pozwala w skuteczny i szybki sposób stwierdzić fakt wystąpienia zwarcia zwojowego w transformatorze. Lokalizacja miejsca wystąpienia zwarcia zwojowego na podstawie analizy odpowiedzi częstotliwościowej transformatora jest możliwa ale problematyczna. Metoda ta pozwala ustalić jak daleko zwarcie zwojowe jest oddalone się od środka uzwojenia, ale nie wskazuje jednoznacznie (w górę albo w dół od środka uzwojenia) położenia tego defektu.

LITERATURA

- [1] Senobari R.K., Sadeh J., Borsi H., Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: A review, *Electric Power Systems Research* 155, s. 172–183, 2018.
- [2] Banaszak S., Ocena stanu mechanicznego części aktywnej transformatorów metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej, Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, Szczecin 2016.
- [3] PN-EN 60076-18:2015-05. Pomiar odpowiedzi częstotliwościowej.
- [4] Lewandowski K., Zasady poprawnego wykonywania pomiarów transformatorów energetycznych przy użyciu metody SFRA, *Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, No 95, s. 163–174, 2018.
- [5] Mitchell S. D., Welsh J. S., Modeling Power Transformers to Support the Interpretation of Frequency-Response Analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 2, No. 4, pp. 2705–2717, October 2011.
- [6] Purnomoadi A. P., Fransisco D., Modeling and Diagnostic Transformer Condition Using Sweep Frequency Response Analysis, *Proceedings of 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp. 19–23 July 2009, Harbin, China.
- [7] Islam S. M., Detection of Shorted Turns and Winding Movements in Large Power Transformers using Frequency Response Analysis, *Materials of 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*, pp. 23–27, Jan. 2000.
- [8] Lewandowski K., Morańda H., Wykrywanie zwarc zwojowych w transformatorze energetycznym przy użyciu metody SFRA, *Przegląd Elektrotechniczny*, T. 94, Nr 10/2018, s. 118–121.
- [9] Samimi M. H., Tenbohlen S., Shayegani Akmal A. A., Mohseni H., Using the Complex Values of the Frequency Response to Improve Power Transformer Diagnostics, *Materials of 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 1012 May 2016, pp. 1689–1693.

**ANALYSIS OF POSSIBILITY OF SHORTED COIL LOCALIZATION
IN POWER TRANSFORMER ON THE BASIS OF ITS
FREQUENCY RESPONSE (SFRA)**

The article presents the results of transformer investigation using SFRA method. The 630 kVA unit with the Dyn5 connection system were tested. The characteristics of the frequency response for the transformer without defect and with the implemented defect - shorted turns – were presented and compared. The shorted turns was performed in various parts of the high voltage transformer's winding in order to check the possibility of localization of this defect. The measurements were carried out in four different ways: measurement of the frequency response of the tested winding with shorted and on free potential line terminals of the remaining windings, and inter-winding measurement - inductive and capacitive. Based on the obtained results, the influence of the shorted turns location in the transformer on the frequency response was evaluated.

(Received: 25.01.2019, revised: 04.03.2019)

