



## Praktyczne aspekty badań odkształceń mechanicznych uzwojeń metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej FRA

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono praktyczne aspekty wyznaczania oraz analizy funkcji przenoszenia uzwojeń transformatorów mocy w eksploatacji za pomocą metody FRA (Frequency Response Analysis). Zaprezentowano wyniki badań wykonanych za pomocą urządzenia TRAFTEK firmy B&C Diagnostics LTD. Zamieszczono przykłady zarejestrowanych funkcji przenoszenia badanych transformatorów oraz analizy porównawcze przebiegów zarejestrowanych dla transformatorów tego samego typu.

**Abstract:** (Practical research aspects of mechanical winding distortion with FRA method). In this article are presented the practical aspects of allocation and transfer function analysis of transformer windings in exploitation with FRA (Frequency Response Analysis) method. There are presented the results of accomplished research made by TRAFTEK device (made by B&C Diagnostics LTD). There are placed the examples of measured transfer functions of examined transformer and comparative analysis of registered curves for transformer of the same type.

**Słowa kluczowe:** odkształcenia uzwojeń, funkcja przenoszenia, metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej (FRA).

**Keywords:** windings deformations, transfer function, frequency response analysis method (FRA).

### Wstęp

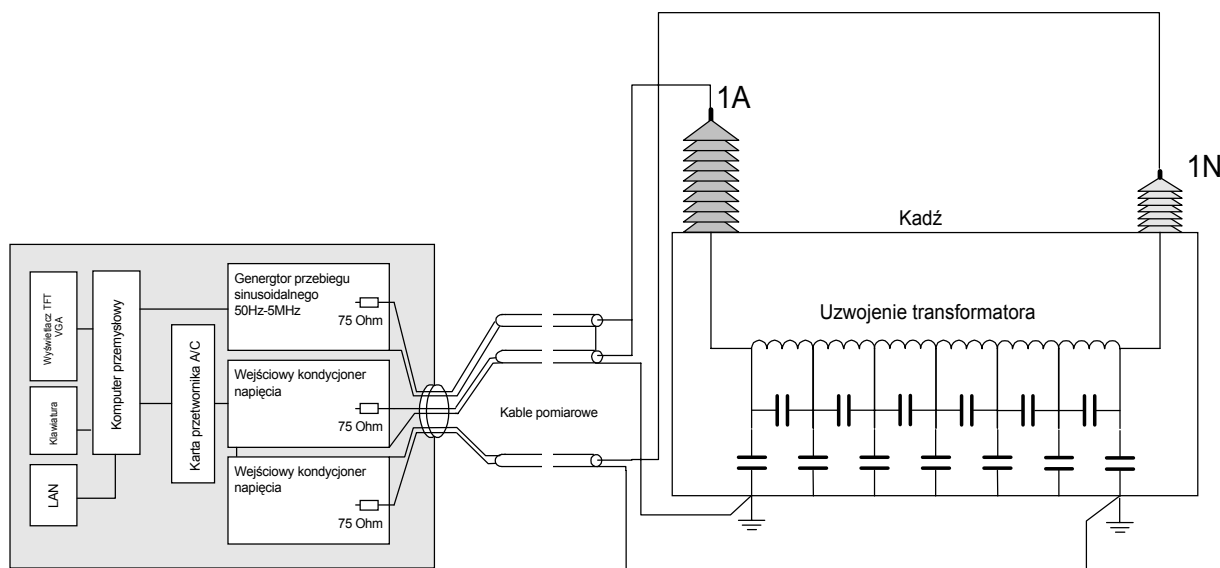
Transformatory energetyczne są kluczowymi i jednymi z bardziej kosztownych elementów sieci energetycznej, a sytuacje awaryjne wpływają w sposób istotny na bezpieczeństwo, niezawodność i koszt zasilania energią elektryczną. Właściwa eksploatacja oparta na odpowiedniej diagnostyce transformatora, pozwala na zwiększenie jego niezawodności, jak również ograniczanie liczby i czasu planowych wyłączeń. Stąd też, przedsiębiorstwa eksploatujące transformatory mocy, zaczynają interesować się wykonywaniem badań diagnostycznych umożliwiających wykrycie ewentualnych przesunięć albo odkształceń uzwojeń [1, 2, 3].

Odpowiednio szybkie wykrycie takich uszkodzeń uzwojenia może zapobiec poważnej awarii oraz jest pomocne w racjonalnym planowaniu remontów eksploatowanych jednostek jednocześnie pozwalając zminimalizować straty spowodowane awaryjnymi wyłączeniami. Stosowane od wielu lat tradycyjne pomiary

indukcyjności rozproszenia przy częstotliwości sieciowej, nie dają możliwości wykrycia lokalnych przesunięć uzwojeń, ponieważ powodują one bardzo małą zmianę mierzonej indukcyjności. Bardziej czuła jest metoda opierająca się na funkcji przenoszenia uzwojenia rejestrowanej w szerokim przedziale częstotliwości - FRA (Frequency Response Analysis) [4, 5, 6, 7].

### Wyznaczanie funkcji przenoszenia uzwojeń transformatora metodą FRA

Uzwojenie transformatora składa się schematycznie z wielu elementów RLC. Każda cewka uzwojenia ma swoją własną indukcyjność i rezystancję, i jest przez indukcyjność i pojemność sprzężona z innymi cewkami, uzwojeniami, rdzeniem i kadzią. Indukcyjności i pojemności uzwojenia są funkcją jego geometrii. Jakkolwiek zmiana w tej geometrii (przesunięcie się lub deformacja uzwojenia) wpływa na elementarne indukcyjności i pojemności, i w ten sposób powstaje inna sieć RLC.



Rys.1. Schemat blokowy urządzenia do pomiaru funkcji przenoszenia uzwojeń [7,8]

Rozważając uzwojenie transformatora jako sieć elementów RLC, oczywistym jest, że każde uzwojenie ma charakterystyczną odpowiedź częstotliwościową. Jest ona niepowtarzalną identyfikacją („odciskiem palca”) uzwojenia, określoną przez jego budowę geometryczną i rozmieszczenie. Jakikolwiek przesunięcie albo odkształcenie uzwojenia, które wpłynie na zmianę pojemności i indukcyjności rozproszenia, będą zmieniać w pewnej mierze tę odpowiedź. Zastosowana w praktyce metoda wyznaczenia funkcji przenoszenia jest oparta na rejestracji przebiegów, które stanowią odpowiedź uzwojenia na przyłożony sygnał napięcia sinusoidalnego w zadanym przedziale częstotliwości. Ten typ pomiarów nazywany jest „ pomiarem w dziedzinie częstotliwości”.

Do rejestracji charakterystyk uzwojeń metodą FRA użyto specjalistycznego analizatora sieciowego węgierskiej firmy B&C Diagnostics LTD o nazwie TRAFTEK [8], którego uproszczony schemat pokazano na rysunku 1.

### Problemy związane z badaniami transformatorów w eksploatacji

Firma ENERGO – COMPLEX przeprowadziła w 2002 roku serię pomiarów funkcji przenoszenia transformatorów mocy metodą FRA [10]. Badania te miały na celu sprawdzenie stanu mechanicznego uzwojeń badanych transformatorów, wykrycie ewentualnych odkształceń bądź przesunięć oraz uzyskanie danych wyjściowych (metryki uzwojeń) dla późniejszych badań FRA. Funkcję przenoszenia wyznaczano w szerokim zakresie częstotliwości od 100 Hz do 1 MHz. Pomiary wykonano dla wszystkich uzwojeń badanych jednostek.

Pierwszym aspektem bardzo ważnym dla badań transformatorów w eksploatacji na miejscu ich zainstalowania jest szybkość oraz prostota wykonania pomiaru przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej czułości i powtarzalności wyników. Urządzenie TRAFTEK doskonale sprawdziło się w warunkach obiektów energetycznych a przeprowadzone eksperymenty wykazały dużą odporność układu pomiarowego na zewnętrzne zakłócenia oraz brak wpływu układu geometrycznego przewodów pomiarowych na powtarzalność wyników.

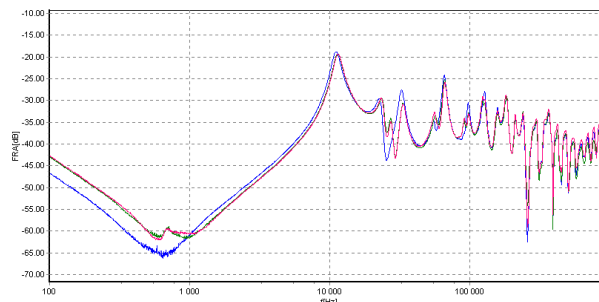
Podstawowym problemem po wykonaniu rejestracji funkcji przenoszenia stało się opracowanie sposobu wiarygodnej oceny uzyskanych wyników. We wszystkich analizowanych przypadkach brak było charakterystyk odniesienia zarejestrowanych przez producentów badanych jednostek, dlatego też jedynymi danymi odniesienia były przebiegi funkcji przenoszenia uzwojeń zarejestrowane na innych fazach tego samego transformatora, a także charakterystyki zarejestrowane na jednostkach bliźniaczych.

### Badanie transformatora oparte na porównaniu funkcji przenoszenia poszczególnych faz

Wykonano rejestracje funkcji przenoszenia uzwojeń transformatora blokowego 240 MVA. Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi funkcji przenoszenia uzwojeń GN transformatora blokowego. Dla badanego transformatora obserwowane różnice pomiędzy wykresami rejestrowanymi dla poszczególnych faz są minimalne i łatwo wytłumaczalne różnicą dróg magnetycznych w rdzeniu występującymi pomiędzy kolumnami skrajnymi a kolumną środkową. Nieco inna geometria uzwojeń w fazie środkowej i w fazach skrajnych może powodować odmienne tłumienie niektórych rezonansów w cewkach uzwojenia, jednakże nie ma wpływu na częstotliwość tych rezonansów.

Jednostki blokowe, ze względu na swą konstrukcję oraz brak podobciążeniowego przełącznika zacze- pów, pozwala-

ją na wykonywanie analiz w oparciu o porównanie poszczególnych faz badanego transformatora.

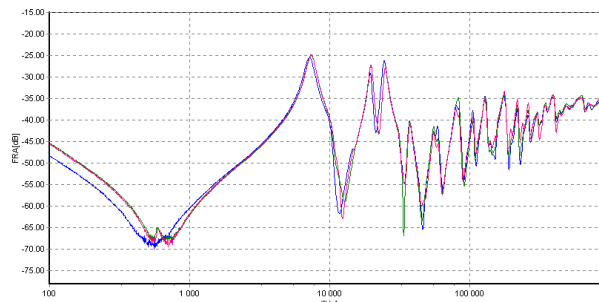


Rys.2. Funkcje przenoszenia faz A,B i C uzwojenia GN transformatora blokowego

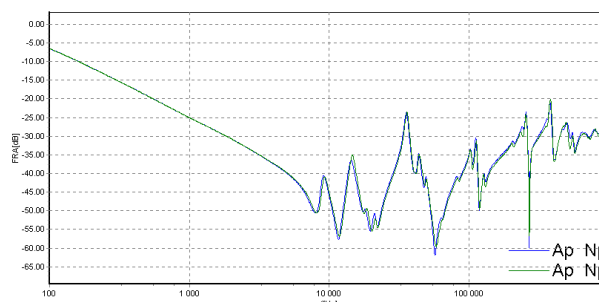
### Przykłady funkcji przenoszenia uzwojeń transformatorów tego samego typu

W wypadku transformatorów sieciowych analiza wyników w oparciu o porównanie faz utrudniona jest przez obecność podobciążeniowego przełącznika zacze- pów oraz często znacznie większe rozbieżności konstrukcyjne pomiędzy fazami niż ma to miejsce w transformatorach blokowych. Jako przykład wykonanych analiz przytoczymy wyniki badań porównawczych transformatorów sieciowych o mocy 16 MVA 110/15 kV zainstalowanych na tej samej stacji energetycznej oraz typowych autotransformatorów RTdxP o mocy 160 MVA.

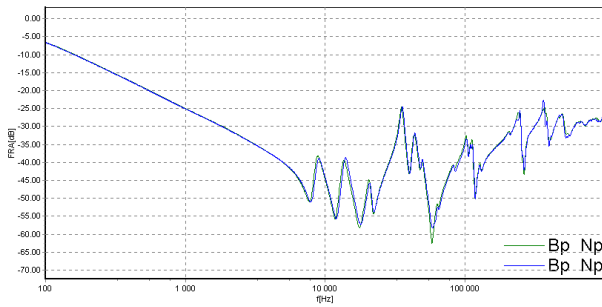
Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi funkcji przenoszenia uzwojenia GN transformatora TR1 16 MVA 110/15 kV. Analiza porównawcza faz tego samego transformatora wykazała istnienie stosunkowo znacznych różnic między fazami a jednoznaczne stwierdzenie obecności odkształceń czy przesunięć uzwojeń bez dodatkowych danych odniesienia jest praktycznie niemożliwe. Dlatego też wykonano badania FRA bliźniaczej jednostki w celu wykonania dodatkowych analiz. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 4, 5 i 6.



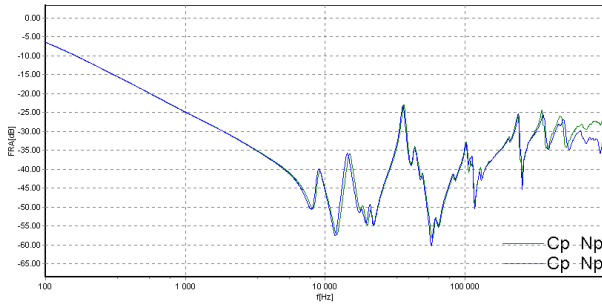
Rys.3. Funkcje przenoszenia faz A,B i C uzwojenia GN transformatora sieciowego



Rys.4. Funkcje przenoszenia fazy A1 transformatora TR1 oraz fazy A1 transformatora TR2



Rys. 5. Funkcje przenoszenia fazy B1 transformatora TR1 oraz fazy B1 transformatora TR2



Rys. 6. Funkcje przenoszenia fazy C1 transformatora TR1 oraz fazy C1 transformatora TR2

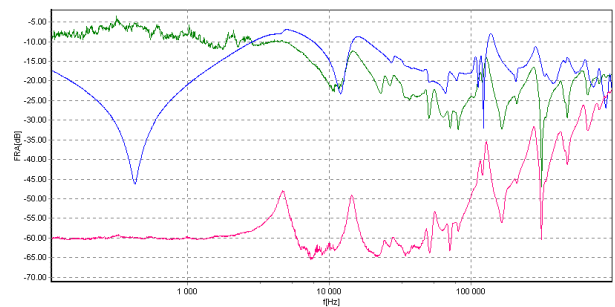
Analiza porównawcza funkcji przenoszenia uzwojeń transformatorów TR1 i TR2 wykazała, że przebiegi zarejestrowane na poszczególnych fazach są praktycznie identyczne dla obu transformatorów. Biorąc pod uwagę fakt, że identyczne odkształcenie uzwojeń w dwóch różnych transformatorach jest mało prawdopodobne można stwierdzić, że badane jednostki są wolne od odkształceń, a różnice między fazami spowodowane są głównie obecnością podobciążeniowego przełącznika zaczepek a szczególnie konstrukcją odpływów poszczególnych faz.

Kolejnymi obiektami badań były typowe autotransformatory RTDxP o mocy 160 MVA. Słaby punkt tego typu autotransformatorów stanowi uzwojenie wyrównawcze, które jest szczególnie podatne na odkształcenia wywołane działaniem prądów zwarciovych. W roku 2002 wykonaliśmy badania dwóch jednostek tego typu zainstalowanych na stacjach PSE. Badanie przebiegów funkcji przenoszenia wyznaczonych dla uzwojenia wyrównawczego wykazało istnienie uszkodzenia na jednej z faz tego uzwojenia.

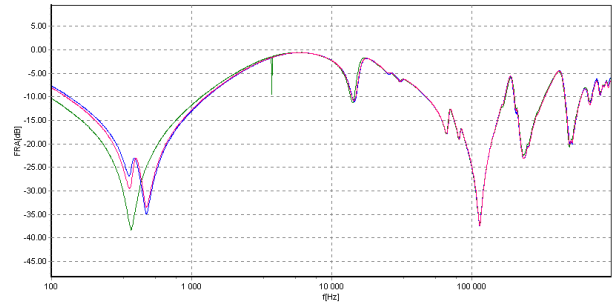
Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi funkcji przenoszenia uzwojenia wyrównawczego autotransformatora ATR1. Dla porównania na rysunku 8 przedstawiono wynik badania uzwojenia wyrównawczego bliźniaczej jednostki.

Porównanie wyników uzyskanych dla autotransformatorów ATR1 i ATR2 pozwoliło na wysunięcie tezy, że do ustalenia pojawienia się odkształceń mechanicznych tego uzwojenia wystarczy badanie porównawcze wykorzystujące jako dane odniesienia funkcje przenoszenia zarejestrowane dla poszczególnych faz tego uzwojenia. Analogicznie wykonane badania dla uzwojeń GN nie dają tak jednoznacznych wyników.

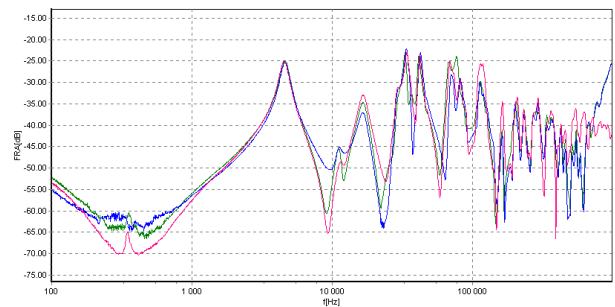
Analiza przebiegów zarejestrowanych dla uzwojeń GN autotransformatora ATR1 wykazuje znaczne rozbieżności w kształcie krzywych wyznaczonych dla poszczególnych faz. Analiza porównawcza z ATR2 sugeruje, że różnice te spowodowane są mechanicznymi przemieszczeniami uzwojeń gdyż ich liczba i charakter znacznie odbiegają od rejestrowanych na bliźniaczej jednostce i nie można tłumaczyć ich tolerancjami produkcyjnymi czy też obecnością podobciążeniowego przełącznika zaczepek.



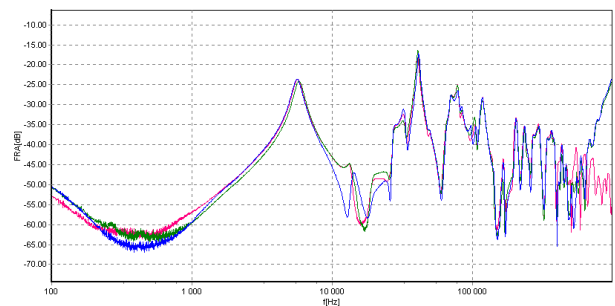
Rys. 7. Funkcje przenoszenia cewek uzwojenia wyrównawczego autotransformatora ATR1



Rys. 8. Funkcje przenoszenia cewek uzwojenia wyrównawczego autotransformatora ATR2



Rys. 9. Funkcje przenoszenia cewek uzwojenia GN autotransformatora ATR1



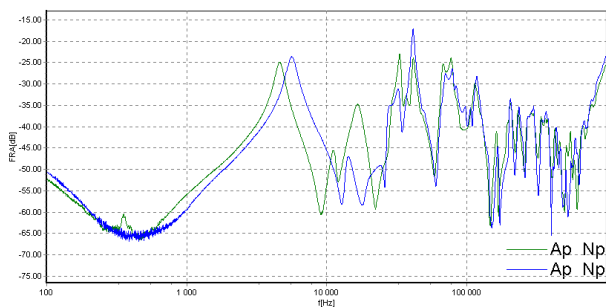
Rys. 10. Funkcje przenoszenia cewek uzwojenia GN autotransformatora ATR2

Porównanie funkcji przenoszenia uzwojeń autotransformatorów ATR1 i ATR2 pokazano na rysunkach od 11 do 13.

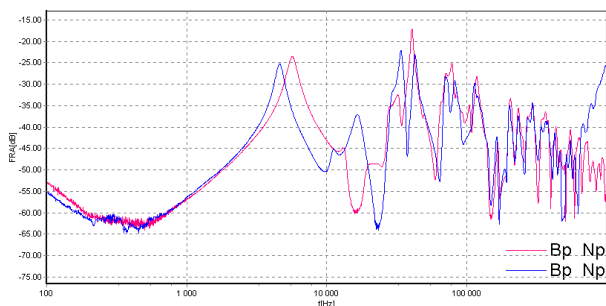
### Podsumowanie

W trakcie wykonywanych badań na różnego typu transformatorach mocy stwierdzono dużą wiarygodność oraz powtarzalność wyników uzyskanych za pomocą zastosowanego sprzętu, a także dostateczną czułość tej metody, która pozwała na wykrycie nawet niewielkich, miejscowych odkształceń. Ze względu na porównawczy charakter metody i w sytuacji braku pomiarów wzorcowych

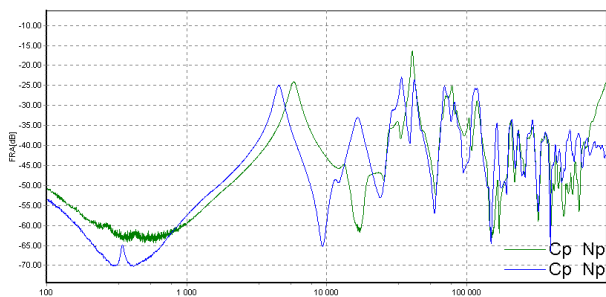
wykonanych na nowym transformatorze fundamentalnym problemem staje się ocena uzyskanych wyników.



Rys. 11. Funkcje przenoszenia fazy A1 autotransformatora ATR1 oraz fazy A1 autotransformatora ATR2



Rys. 12. Funkcje przenoszenia fazy B1 autotransformatora ATR1 oraz fazy B1 autotransformatora ATR2



Rys. 13. Funkcje przenoszenia fazy C1 autotransformatora ATR1 oraz fazy C1 autotransformatora ATR2

W niektórych przypadkach jako dane odniesienia wystarczające są pomiary funkcji przenoszenia uzwojenia innej fazy badanego transformatora. W pozostałych przypadkach wykazano, że przeprowadzenie badań transformatora tego samego typu pozwala na wykonanie wiarygodnych analiz. Pomiar funkcji przenoszenia uzwojeń transformatorów może być wykonywany jako jeden z punktów programu diagnostycznego przed włączeniem do ruchu transformatorów, które zostały wyłączone w trybie awaryjnym przez system zabezpieczeń, a także do oceny stanu uzwojeń transformatorów po dłuższym okresie eksploatacji lub transporcie.

Wykrywanie odkształceń uzwojenia transformatorów metodą odpowiedzi częstotliwościowej (FRA), jest pow-

szechnie stosowane w krajach uprzemysłowionych i zaczyna być wprowadzane w Polsce. Jednakże na drodze do upowszechnienia się pomiarów FRA stoją trudności przy interpretacji zarejestrowanych przebiegów. Różnice pomiędzy porównywanymi przebiegami odpowiedzi częstotliwościowej wskazują na odkształcenie badanego uzwojenia, ale obserwując te różnice trudno jest określić miejsce i stopień odkształcenia. Dalszy rozwój metody FRA uwarunkowany jest stworzeniem możliwości precyzyjnej oceny miejsca i stopnia odkształceń oraz stopnia zagrożenia dla dalszej pracy badanej jednostki. Nadzieje na uzyskanie takich wyników daje opracowanie modeli cyfrowych uzwojeń za pomocą programów komputerowych do analizy obwodów oraz programu do obliczania rozkładu potencjału. Prowadzone badania pozwalają na stwierdzenie, że przeprowadzenie symulacji komputerowych pozwoli na określenie uzwojenia, które uległo odkształceniu oraz wskazanie przybliżonego miejsca uszkodzenia [7]. Biorąc pod uwagę fakt, że wyniki analizy odpowiedzi częstotliwościowej mają stanowić podstawę do decyzji o przeglądzie wewnętrznym transformatora, nawet przybliżona lokalizacja uszkodzeń stanowi istotną informację przed wyłączeniem transformatora z ruchu i podjęciem kosztownych czynności remontowych.

#### LITERATURA

- [1] Boss P., Ravot J.: Detection of mechanical changes in transformers, *CIGRE SC 12, Colloquium in Graz*, June 17 – 21, 1991
- [2] Denis R.J., An S.K., Vandermaar A.J., Wang M., Comparison of Two FRA Methods to Detect Transformer Winding Movement, *EPRI Substation Equipment Diagnostics Conference VIII*, February 20-23, 2000, New Orleans, Louisiana
- [3] Hanique E., Reijnders H.F., Vaessen P.T.M., Frequency response analysis as a diagnostic tool, *Journal of Elektrotechnik*, vol. 68, no. 6, June 1990, pp. 549-557
- [4] Vandermaar A.J., Wang M., Transformer Condition Monitoring By Frequency Response Analysis, *10th Int. Symp. High Voltage Eng.*, vol. 4, pp. 119-122, August 25-29, 1997
- [5] Leibried T., Feser K., Monitoring of Power Transformers using the Transfer Function Method, *IEEE Trans. PD*, Paper PE-053-PWRD-1-08-1998
- [6] Malewski R., Wykrywanie odkształceń uzwojeń metodą funkcji przenoszenia, *Konferencja „Transformatory w eksploatacji”*, Sieniawa, 18 – 21 kwiecień, 2002
- [7] Malewski R., Szrot M., Płowucha J., Lokalizacja odkształcenia uzwojeń transformatora wspomagana modelem komputerowym, *Konferencja „Transformatory w eksploatacji”*, Sieniawa, 23 – 25 kwiecień, 2003
- [8] Csépes G., Kispál I., Winding movement and changes detection in Power transformers by Frequency Response Analysis (FRA), Budapest 2001
- [9] ENERGO – COMPLEX: Protokół z badań FRA uzwojeń transformatorów nr: EC-T-FRA/06/11/2002, EC-T-FRA/02/10/2002, EC-T-FRA/03/10/2002, Chorzów 2002.

**Autorzy:** Marek Szrot, Janusz Płowucha ENERGO-COMPLEX ul. Prof. Olszewskiego 1, 41-503 Chorzów, E-mail: [energo-complex@energo-complex.pl](mailto:energo-complex@energo-complex.pl)