

## Zastosowanie wykresów polarnych w analizie odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora

**Streszczenie.** Artykuł omawia możliwość zastosowania wykresów polarnych do analizy danych pomiarowych odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatorów. Zaprezentowano dane pochodzące z eksperymentu polegającego na wprowadzaniu do transformatora defektów i rejestrowaniu odpowiedzi w dwóch różnych konfiguracjach pomiarowych. Najlepsze efekty uzyskano prezentując na wykresach polarnych dane różnicowe zmierzone w układzie międzyuzwojeniowym pojemnościowym.

**Abstract.** The paper describes the possibility of using polar plots to the analysis of measurement data of transformer windings frequency response. There is presented data from the experiment based on introduction into transformer faults and measurements of the response in two measurement setups. The best effects were achieved for presentation on the polar plots differential data measured in the interwinding capacitive test configuration. (The application of polar graphs in frequency response analysis of transformer windings).

**Słowa kluczowe:** transformator, analiza odpowiedzi częstotliwościowej (FRA), wykres polarny, deformacja.

**Keywords:** transformer, Frequency Response Analysis (FRA), polar graph, deformation.

### Wstęp

Metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej (FRA – Frequency Response Analysis) jest obecnie wdrożona do przemysłowej praktyki badań stanu technicznego transformatorów. Umożliwia ona określenie stanu mechanicznego części aktywnej transformatora. Wynika to z bezpośredniego powiązania kształtu krzywej odpowiedzi częstotliwościowej ze zmianami w geometrii uzwojenia lub z wystąpieniem w nim zwarcia [1, 2].

Technika pomiarowa FRA jest obecnie dobrze znana i znormalizowana [3], jednak wciąż problematyczna jest interpretacja wyników pomiarów. Wynika to m.in. z tego, że analiza odpowiedzi częstotliwościowej jest metodą porównawczą, a także z faktu, że każdy transformator ma inny kształt krzywej odpowiedzi. Dlatego porównanie dokonuje się zazwyczaj w określonych zakresach częstotliwości, które kolejno odpowiadają za obwód magnetyczny, deformacje zgrubne, deformacje lokalne oraz wyprowadzenia i układ pomiarowy. Dokładny podział na te zakresy zależy głównie od mocy (czyli gabarytów) danej jednostki, a po części także jej konstrukcji.

Odpowiedź częstotliwościowa może być rejestrowana w różnych konfiguracjach pomiarowych. Zgodnie z normą podstawowym układem jest połączenie end-to-end, czyli pomiar pomiędzy początkiem i końcem danego uzwojenia. Wiele cennych informacji daje także pomiar wykonany w układzie międzyuzwojeniowym pojemnościowym, w którym sygnał podawany jest na uzwojenie górnego napięcia, a mierzony na uzwojeniu dolnego napięcia, przy końcach obu tych uzwojeń pozostawionych otwartymi [4]. W niniejszej pracy autorzy omówili wyniki pomiarów zarejestrowanych w obu tych układach pomiarowych.

### Interpretacja wyników pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej

Wyniki rejestracji przedstawiane są zazwyczaj w postaci wykresów Bodego, z tłumieniem i przesunięciem fazowym przedstawionymi na dwóch wykresach w funkcji częstotliwości. Zazwyczaj analiza wyników pomiarowych polega na ich bezpośrednim porównaniu do wcześniejszych rejestracji (lub innych jednostek) przez eksperta. Od doświadczenia takiego eksperta i dostępu do bazy danych rejestracji wykonanych na innych (najlepiej podobnych) jednostkach zależy jakość oceny analizowanych danych. Rozwijane jest również komputerowe modelowanie odpowiedzi uzwojeń transformatora szeregiem metod, które docelowo powinno umożliwić uzyskanie zagadnienia

odwrotnego, t.j. powiązania zmian w krzywej z wprowadzoną do uzwojenia deformacją. Jednak na obecnym etapie techniki modelowania nie stanowią realnej alternatywy dla oceny danych przez wykwalifikowanego eksperta. Wynika to z mnogości konstrukcji transformatorów i ich różniącej się znacznie odpowiedzi [5, 6]. Innym kierunkiem rozwoju technik pomocnych w interpretacji wyników jest wdrażanie algorytmów oceniających wyniki. Niestety porównanie działania algorytmów prowadzi często do sprzecznych wniosków, a wyniki z nich otrzymane muszą być weryfikowane przez człowieka, co sprowadza analizę wyników do podstaw.

Autorzy artykułu podjęli próbę sprawdzenia na ile forma prezentacji wyników FRA ułatwia ich analizę. Poniżej zaprezentowane zostały wyniki przedstawione jako typowe wykresy Bodego oraz wykresy polarne, które mogą stanowić skuteczną alternatywę w ocenie wyników FRA przez eksperta. W literaturze podejmowane były pewne próby wykorzystania wykresów polarnych, zazwyczaj związane z technikami zliczania pikseli [7, 8]. W artykule zaproponowana została także forma prezentacji różnicowa, gdzie prezentowany jest wynik odejmowania dwóch przebiegów przekształconych na postać zespoloną.

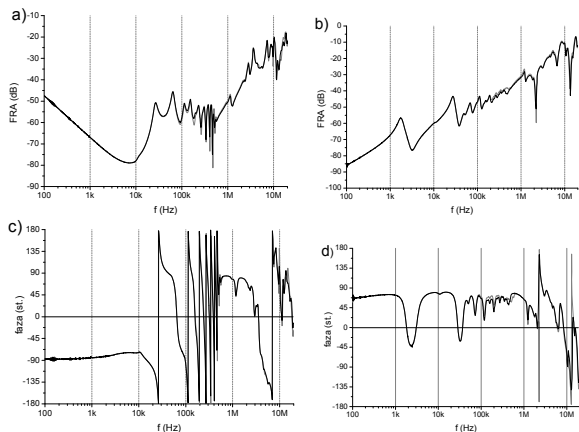
### Obiekt i metodyka badań

Prezentowane wyniki pomiarów zarejestrowane zostały na transformatorze 800 kVA, 15/0,4 kV, dostępnym w laboratorium. Dzięki temu możliwe było wprowadzanie różnych defektów do części aktywnej. W artykule przedstawiono wyniki wpływu deformacji poosiowej, polegającej na przesunięciu kompletnych cewek o zadany odstęp oraz wpływu zwarcia pomiędzy zwojami na zmiany w przebiegach odpowiedzi częstotliwościowej. Do pomiaru wykorzystano komercyjny rejestrator FRAnalyzer firmy Omicron. Jak już wspomniano rejestracji dokonywano w dwóch układach połączeń: na stronie górnej pomiędzy końcami uzwojenia (end-to-end), przy stronie dolnej otwartej, oznaczonego jako H1-H2 oraz pomiędzy stroną górną a dolną, przy końcach obu uzwojeń otwartych, czyli w układzie międzyuzwojeniowym pojemnościowym (H1-x1). Wyniki przeliczano w środowisku Origin 8.0.

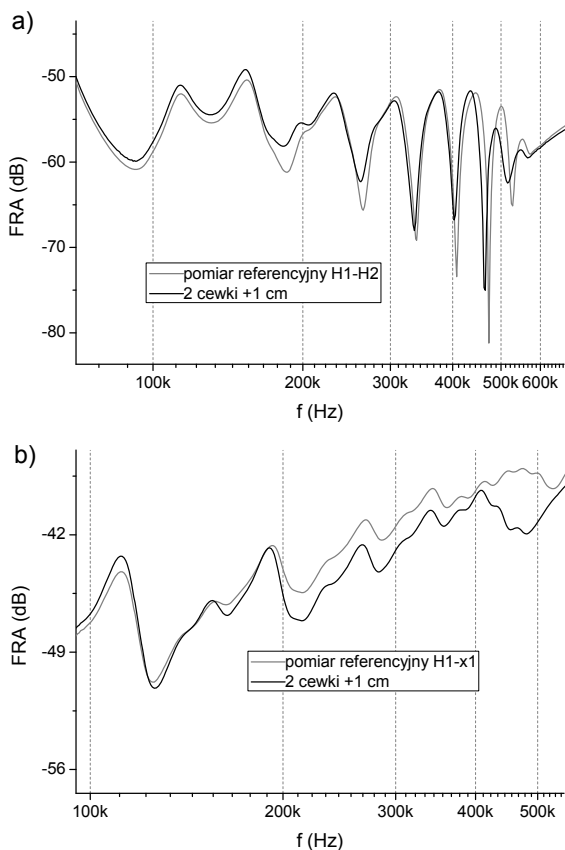
### Klasyczne wykresy Bodego

Omówione defekty, rejestrowane w dwóch układach pomiarowych, przedstawiono poniżej na wykresach Bodego z dziedziną częstotliwości w postaci logarytmicznej. Jest to standardowa forma prezentacji wyników FRA. Na rysunku 1 zawarto odpowiedź transformatora przed i po

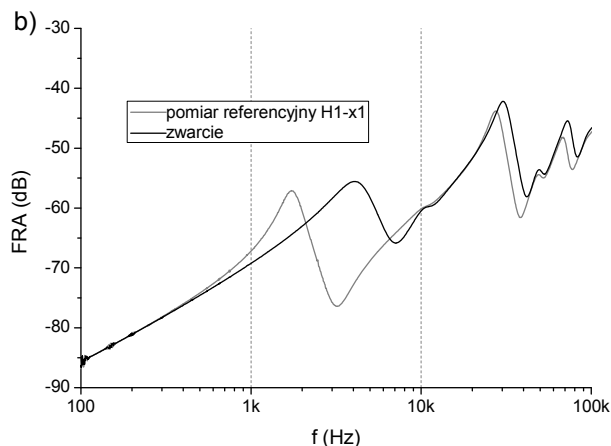
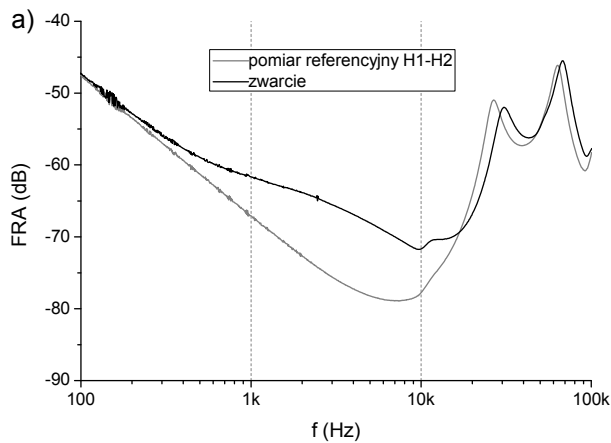
wprowadzeniu deformacji poosiowej, prezentując cały zakres mierzonych częstotliwości. Zauważyć można, że zmiany pomiędzy krzywymi są niewielkie i zachodzą tylko w wąskim zakresie częstotliwości, co jest efektem spodziewanym. Widoczne także jest powiązanie charakterystyk tłumienia i kąta fazowego. Dla pomiaru w układzie pomiędzy końcami uzwojenia występuje wielokrotny skok fazy, typowy dla obszaru zjawisk falowych (lewy dolny wykres). Efektu tego nie zaobserwujemy dla wyników uzyskanych z pomiarów międzyuzwojeniowych pojemnościowych. Aby ukazać różnice pomiędzy krzywymi na rysunku 2 przedstawiono powiększone zakresy wykresów dla deformacji poosiowej, a na rysunku 3 powiększone zakresy wykresów prezentujących wpływ zwarcia na uzwojeniu.



Rys. 1. Odpowiedź częstotliwościowa uzwojenia mierzona w układzie pomiędzy końcami (a oraz c) oraz w układzie międzyuzwojeniowym pojemnościowym (b oraz d)



Rys. 2. Powiększony zakres odpowiedzi częstotliwościowej (sama amplituda) z rysunku 1, dla dwóch układów pomiarowych



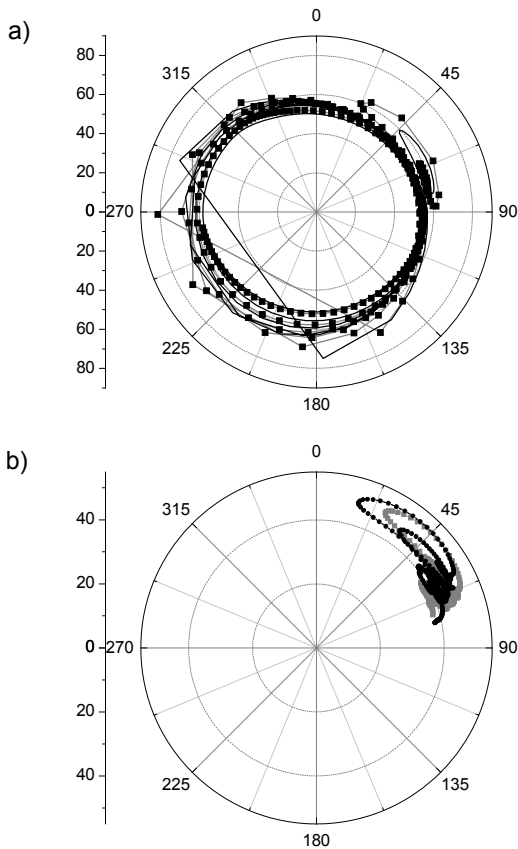
Rys. 3. Powiększony zakres odpowiedzi częstotliwościowej prezentujący wpływ zwarcia na zmiany w krzywej (amplituda) dla dwóch układów pomiarowych

Prezentując wyniki jako wykresy Bodego ciężko jest jednoznacznie określić, który układ pomiarowy jest bardziej przydatny, w obu różnice pomiędzy krzywymi pojawiają się w podobnych zakresach częstotliwości i są podobnej skali, tj. różnice w tłumieniu są porównywalne dla danych częstotliwości. W praktyce przemysłowej stosuje się zazwyczaj tylko analizę amplitudy dla pomiaru pomiędzy końcami uzwojenia.

### Wykresy polarne

Dane zawarte w poprzednim punkcie przedstawione zostały poniżej w formie wykresów polarnych, uwzględniających amplitudę i kąt fazowy na jednym grafie. Prezentacja na takich wykresach całego zakresu częstotliwości nie ma większego sensu, gdyż liczba punktów pomiarowych sprawia, że taka postać staje się nieczytelna. Dlatego od razu ograniczono się do prezentacji tylko tych zakresów częstotliwości, w których występują dla danych defektów różnice pomiędzy rejestrowanymi przebiegami. Dodatkowo tłumienie przedstawione zostało z dodatnim znakiem, aby uzyskać początek układu współrzędnych w środku wykresu polarnego. W przeciwnym razie niemożliwe byłoby porównywanie wykresów między sobą, gdyż w początku wykresu znajdowałoby się zawsze maksymalne tłumienie, inne dla stosowanych układów pomiarowych, czy też różnych transformatorów.

Na rysunku 4 przedstawiono wykresy polarne dla deformacji poosiowej w uzwojeniu (zakres 100 kHz – 600 kHz) dla obu układów pomiarowych.

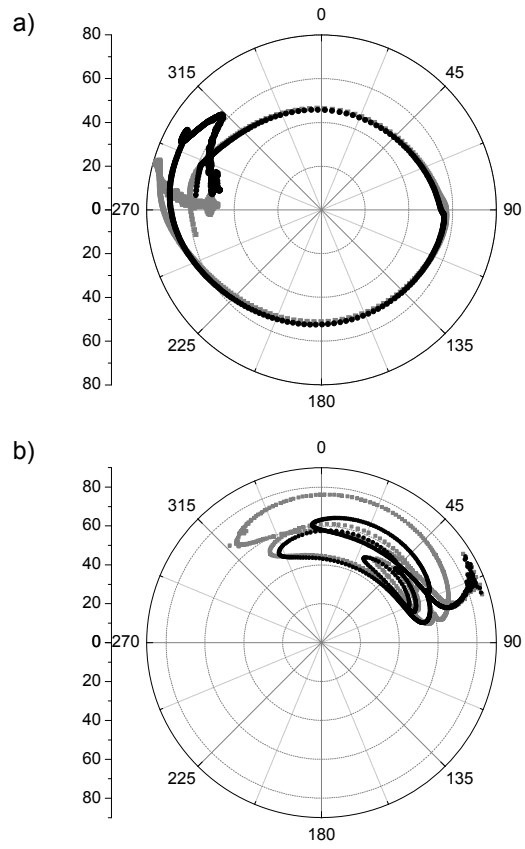


dla deformacji poosiowej w układach pomiarowych: a) pomiędzy końcami uzwojenia, b) międzyuzwojeniowym pojemnościowym

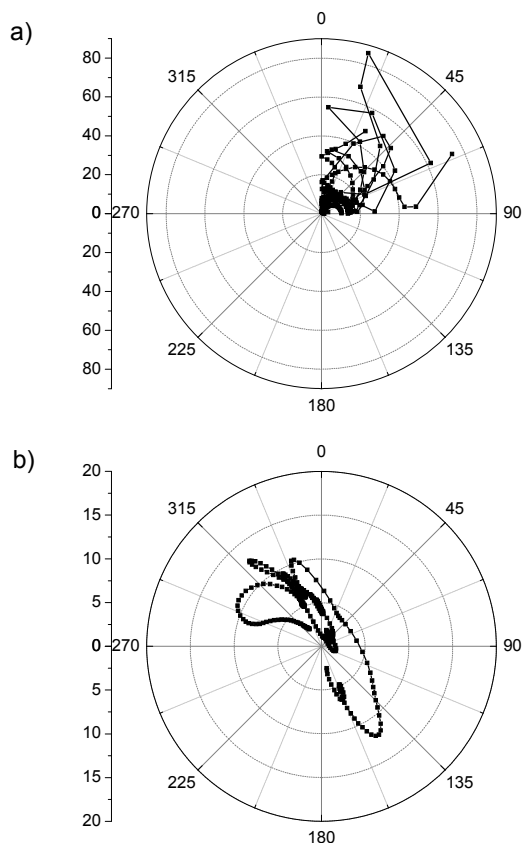
W przypadku pomiaru w układzie pomiędzy końcami uzwojenia wykres jest nieczytelny, mimo zawężenia zakresu częstotliwości. Wynika to z faktu, że w układzie tym występują w tym przypadku (i bardzo często dla innych jednostek) skoki fazy. O wiele lepiej prezentuje się wykres 4b, na którym widać ciągłość charakterystyki i wyraźne różnice pomiędzy krzywymi wzorcową (szara) i po deformacji (czarna).

Dla defektu polegającego na zwarciu zwojów, zaprezentowanego na rysunku 5, wyniki uzyskane z obu układów pomiarowych są dość czytelne, co wynika z faktu, że dla układu pomiędzy końcami uzwojenia nie występują w przedstawionym zakresie 100 Hz – 100 kHz skoki fazy. Jednocześnie zmiany bardziej widoczne są w układzie międzyuzwojeniowym pojemnościowym.

Ponieważ, mimo ograniczenia zakresu częstotliwości, prezentacja dwóch krzywych na wykresach polarnych wciąż jest dość nieczytelna, wprowadzono wykresy różnicowe. Polegają one na wykreśleniu różnicy pomiędzy obiema krzywymi. Aby umożliwić prezentację na wykresie polarnym konieczne jest wykonanie odejmowania na postaci zespolonej zarejestrowanych przebiegów. W tym celu przeliczono wyniki uzyskane w postaci tłumienia i kąta fazowego na taką postać, odjęto dwa przebiegi od siebie, a następnie przeliczono dane z powrotem na amplitudę i kąt. Wyniki odejmowania dla deformacji poosiowej, czyli zakresu 100 kHz – 600 kHz, przedstawione zostały na rysunku 6. Wykres prezentujący pomiary w układzie pomiędzy końcami uzwojenia, podobnie jak poprzednio, jest nieprzydatny do analizy, na skutek skoków fazy odejmowanie dało bardzo nieregularny przebieg. Za to bardzo dobrze widać różnice dla układu międzyuzwojeniowego (Rys. 6b).

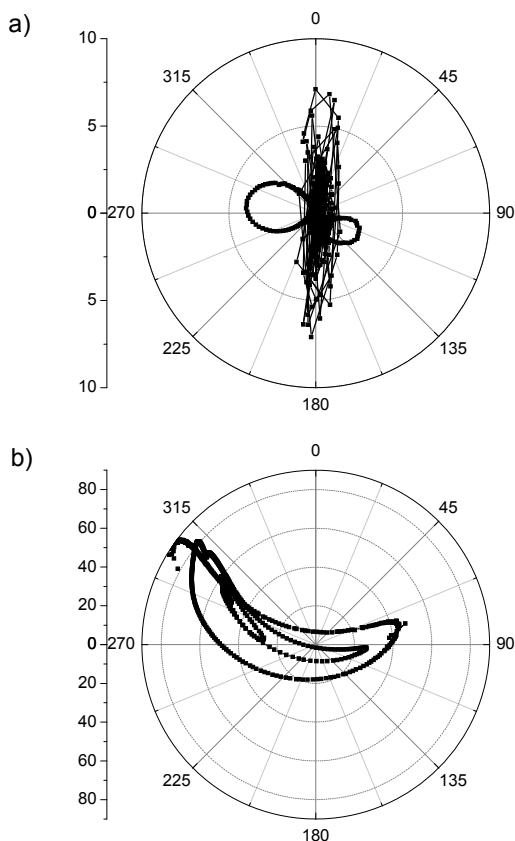


Rys. 5. Odpowiedź częstotliwościowa na wykresach polarnych dla zwarcia w układach pomiarowych: a) pomiędzy końcami uzwojenia, b) międzyuzwojeniowym pojemnościowym



Rys. 6. Wykresy polarne różnicowe dla deformacji poosiowej w układach pomiarowych: a) pomiędzy końcami uzwojenia, b) międzyuzwojeniowym pojemnościowym

Podobne wnioski można wyciągnąć dla przypadku zwarcia w uzwojeniu, czyli prezentacji w zakresie 100 Hz – 100 kHz, widocznej na rysunku 7. Wykres różnicowy dla układu rejestracji pomiędzy końcami uzwojenia jest nieczytelny, w przeciwieństwie do prezentacji wyników uzyskanych z układu międzyuzwojeniowego, gdzie widać ciągłość charakterystyki i charakter zmian.



Rys. 7. Wykresy polarne różnicowe dla zwarcia w układach pomiarowych: a) pomiędzy końcami uzwojenia, b) międzyuzwojeniowym pojemnościowym

### Podsumowanie

Analiza danych uzyskiwanych z pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatorów jest na obecnym etapie rozwoju metody wciąż problematyczna. Standardowym podejściem do oceny wyników przez eksperta jest ich prezentacja w postaci wykresów Bodego, a w praktyce analiza tylko zmian amplitudy przebiegu. Zupełnie inne informacje można uzyskać przedstawiając wyniki w postaci wykresów polarnych, gdzie amplituda i kąt fazowy są ze sobą bezpośrednio związane. Dokonano sprawdzenia możliwości wykorzystania tych wykresów do oceny wyników FRA, w oparciu o dwa typowe defekty: deformację poosiową i zwarcie w uzwojeniu. Na podstawie zaprezentowanych wyników można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Wykresy polarne dają nowe możliwości analizy wyników odpowiedzi częstotliwościowej.
2. Ich niewątpliwą zaletą jest możliwość obserwacji amplitudy i kąta na jednym wykresie.
3. Wykresy polarne bardzo dobrze prezentują wyniki zmierzone w układzie połączeń międzyuzwojeniowym pojemnościowym. Z kolei dla układu pomiędzy końcami uzwojenia są raczej nieprzydatne, w szczególności gdy w rejestracji występują skoki fazy.
4. Do poprawnej oceny danych na wykresach polarnych konieczne jest stosowanie węższych zakresów pomiarowych.
5. Dobre rezultaty uzyskać można stosując wykresy różnicowe w układzie międzyuzwojeniowym pojemnościowym, które dają jednoznaczną informację nt. różnic pomiędzy przebiegami.

W oparciu o proponowaną metodę prezentacji wyników możliwe jest zastosowanie nowych narzędzi analizy wyników, np. wdrażanych już metod graficznych polegających na zliczaniu punktów w poszczególnych ćwiartkach wykresu, dla wykresu różnicowego zliczanie maksymalnych odchyśleń lub opracowanie algorytmów opartych na danych różnicowych.

**Autorzy:** dr inż. Szymon Banaszak, prof. dr hab. inż. Konstanty M. Gawrylczyk, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: [szymon.banaszak@zut.edu.pl](mailto:szymon.banaszak@zut.edu.pl)

### LITERATURA

- [1] Banaszak Sz. et al., Ocena stanu technicznego i zarządzanie populacją transformatorów, praca zbiorowa pod redakcją J. Subocza, Wydawnictwo OBRE, Piekary Śląskie 2013
- [2] Banaszak Sz., Określenie wpływu geometrii cewki na jej odpowiedź częstotliwościową na podstawie pomiarów deformacyjnych i modeli komputerowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 11b'2012, s.206-208
- [3] IEC 60076-18: Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response. Norma międzynarodowa IEC
- [4] Jayasinghe J.A.S.B., Wang Z.D., Jarman P.N., Darwin A.W., Winding Movement in Power Transformers: A Comparison of FRA Measurement Connection Methods, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 13, No. 6; 2006, pp. 1342-1348
- [5] Mitchell S.D., Welsh J.S., Modeling Power Transformers to Support the Interpretation of Frequency-Response Analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 26, No. 4, 2011
- [6] Banaszak S., Gawrylczyk K.M., Wave Phenomena in High-Voltage Windings of Transformers, *ACTA PHYSICA POLONICA A*, Vol. 125 (2014), No. 6, p. 1335-1338
- [7] Aljohani O., Abu-Siada A., Application of FRA polar plot technique to diagnose internal faults in power transformers, *2014 IEEE PES General Meeting*, IEEE Conference Publication, 2014
- [8] Small B.J., Abu-Siada A., A new method for analysing transformer condition using frequency response analysis, *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, IEEE Conference Publication, 2015