

## **Analiza czynników wpływających na odpowiedź częstotliwościową cewki transformatora**

**Abstract.** *The paper describes results of two experiments based on frequency response measurements performed on HV transformer winding. The first of them was based on the controlled deformations of windings, while during the second one additional capacitance elements were attached to various points of the winding. It allowed to identify the influence of capacitances on FRA curve shape and therefore to determine connection between resonances and their physical representatives. These results were to be found similar to results taken from deformations, therefore it can be concluded that described axial, but also radial deformations depend mainly on capacitance changes.*

**Keywords:** Frequency Response Analysis, power transformer, deformation

### **Wprowadzenie**

Jednym z zagrożeń prawidłowej pracy transformatorów energetycznych jest problem odkształceń ich uzwojeń. Od kilku lat wdrożona została do praktyki przemysłowej metoda umożliwiająca ocenę stanu mechanicznego części aktywnej transformatora. Jest to metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej (z ang. *Frequency Response Analysis - FRA*) polegająca na zarejestrowaniu na końcu uzwojenia odpowiedzi na podawany sygnał niskonapięciowy o zmiennej częstotliwości. Wyniki przedstawia się w formie tłumienia sygnału oraz przesunięcia fazowego. Zmiana geometrii w uzwojeniu np. na skutek odkształcenia, skutkuje lokalną zmianą wielkości elektrycznych, a tym samym uwidacznia się w rejestrowanej krzywej jako przesunięcie rezonansów, zmiana tłumienia lub nawet jako zmiana fragmentu charakterystyki. Zasadniczym problemem metody FRA jest brak zestandaryzowanych narzędzi do oceny wyników pomiarów. Strona pomiarowa metody doczeka się wkrótce publikacji normy IEC [1], jednak przy



Rys. 1. Uzwojenie wykorzystane do badań

interpretacji wykorzystuje się różne podejścia i metody, zależne od doświadczeń producenta aparatury pomiarowej, jak i eksploatorów transformatorów. Dodatkowo zagadnienie utrudnia niejednoznaczne powiązanie rzeczywistych deformacji w uzwojeniu z ich wpływem na zmiany w rejestrowanych charakterystykach. Możliwa jest identyfikacja charakterystycznych zakresów częstotliwości odpowiedzialnych za różne elementy części składowej i ogólne rodzaje defektów [2, 3], jednak zazwyczaj nie jest możliwe dokładne określenie rodzaju, miejsca i skali odkształcenia. Uzwojenia transformatora można przedstawić w formie obwodowego schematu zastępczego, na który składają się szeregowo i równoległe rezystancje, indukcyjności własne i wzajemne oraz pojemności poszczególnych fragmentów uzwojenia. W artykule przedstawiono wyniki badań

deformacyjnych oraz modyfikacji wielkości elektrycznych uzwojenia przedstawionego na Rys.1. Porównanie wyników umożliwiło zidentyfikowanie charakterystycznych parametrów zmieniających się wraz z odkształceniem uzwojenia.

### **Cel i metodyka badań**

W celu identyfikacji wpływu rzeczywistych wielkości elektrycznych uzwojenia transformatora na jego odpowiedź częstotliwościową, a co za tym idzie poszczególnych składowych typowego schematu obwodowego tej odpowiedzi, przeprowadzono eksperyment polegający na rejestracji krzywych FRA na uzwojeniu z dołączonymi międzyzwojowo i międzycewkowo elementami R i C o różnej wartości, a także z tymi elementami dołączonymi pomiędzy uzwojenie a potencjał ziemi. Powyższe kombinacje odpowiadają zwarciom mało i wielkorezystancyjnym, upływnościom, zmieniającej się geometrii skutkującej zmianą pojemności międzyzwojowej, międzycewkowej i doziemnej. Przetestowany został wpływ pojedynczych elementów R i C o różnych wielkościach oraz kombinacje tych elementów. W dalszej części pracy eksperyment ten nazywany będzie symulacją elektryczną. Obiektem badawczym było uzwojenie strony górnej 6,3 kV pochodzące z transformatora T3Ch/D800/6 o mocy 800 kVA. Uzwojenie badane było bez rdzenia i kadzi. W drugiej części eksperymentu dokonano deformacji uzwojenia polegających na zmianie odstępów pomiędzy poszczególnymi cewkami (deformacja poosiowa) oraz wysuwaniu kolejnych cewek (deformacja promieniowa), a także zasymulowano zwarcia międzyzwojowe i międzycewkowe. Deformacje przeprowadzono zarówno dla pojedynczych cewek, jak i ich grup. Porównanie wyników zarejestrowanych dla obu eksperymentów umożliwiło identyfikację charakterystycznych parametrów odpowiedzialnych za zmiany krzywych odpowiedzi częstotliwościowej. W dalszej części artykułu przedstawiono wybrane wyniki dotyczące deformacji poosiowych i promieniowych.

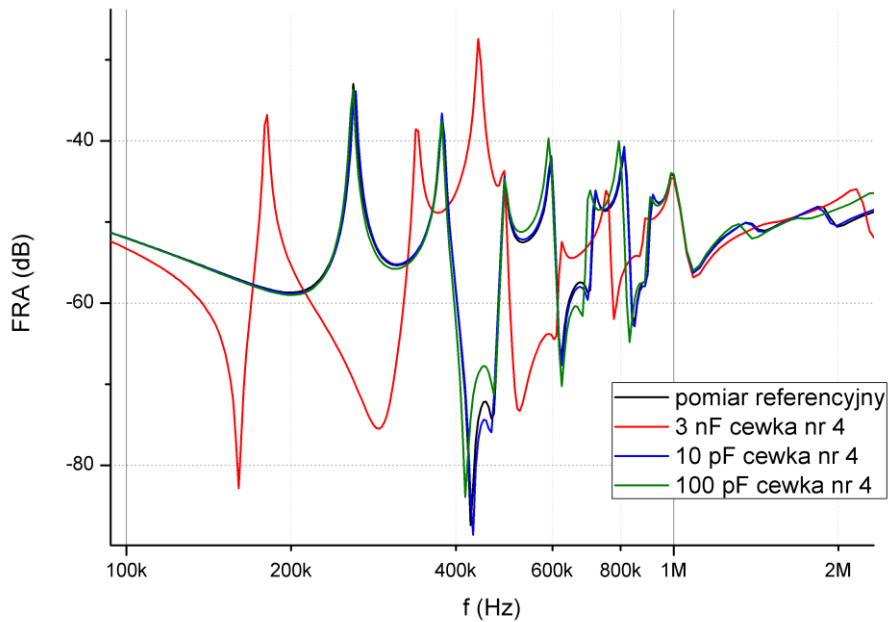
### **Wyniki badań – deformacja poosiowa**

W celu uzyskania wyników FRA dla symulacji elektrycznej wykonano pomiary przy dołączonych do uzwojenia elementach o różnych wartościach, w kilku miejscach uzwojenia. Na rysunku 2 przykładowe przedstawiono wyniki zarejestrowane z dołączonymi pojemnościami pomiędzy początkiem a końcem cewki nr 4. W zależności od zastosowanej pojemności wyniki bardziej lub mniej odbiegają od krzywej referencyjnej, przy czym zmiany dla pojemności 3 nF są ewidentnie za duże. W rzeczywistym transformatorze taka zmiana w krzywej odpowiedzi częstotliwościowej oznaczałaby kolosalną deformację uzwojenia. Poszukiwano więc takich wartości pojemności, które odpowiadałyby zmianom występującym w przypadkach niewielkich deformacji, a zasymulowanych w eksperymencie deformacyjnym. Dla testowanego uzwojenia i danej deformacji wybrano wielkości 100 pF.

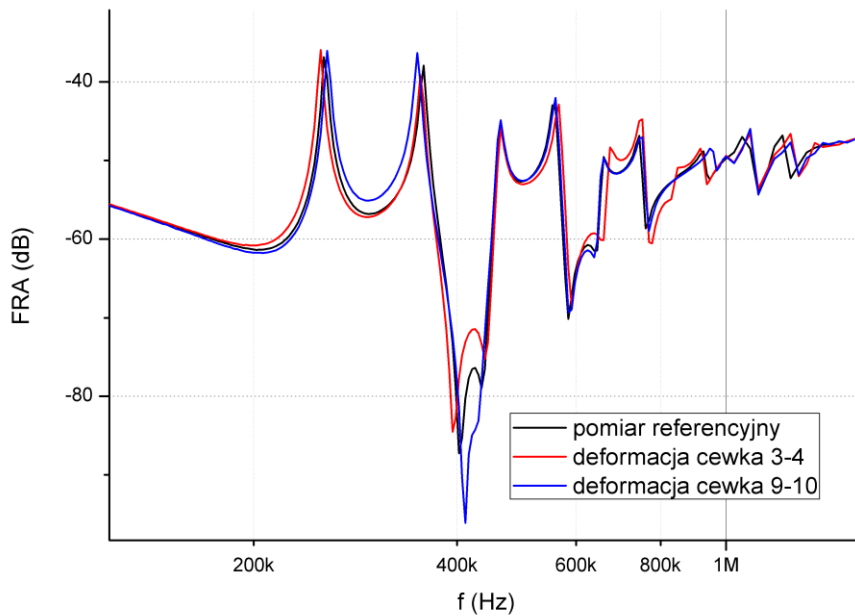
W eksperymencie deformacyjnym również wykonano wiele rejestracji, dla różnych skali i lokalizacji deformacji. Na potrzeby publikacji wybrano wyniki klasycznej deformacji poosiowej, która w rzeczywistym transformatorze może wyniknąć z wypadnięcia przekładek międzycewkowych po wystąpieniu sił dynamicznych w uzwojenia np. na skutek zwarcia. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki zarejestrowane przy zmniejszeniu odstępów międzycewkowego pomiędzy cewkami 3 i 4 oraz 9 i 10.

Wykresy przedstawiają tylko wybrany fragment charakterystyki, obrazujący zakres częstotliwości, w którym widoczne są zmiany dla kolejnych rejestracji. Dla badanego uzwojenia jest to zarazem obszar występowania charakterystycznych rezonansów, w zakresie niższych częstotliwości zarejestrowane jest tylko opadające zbocze indukcyjne.

**VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012**



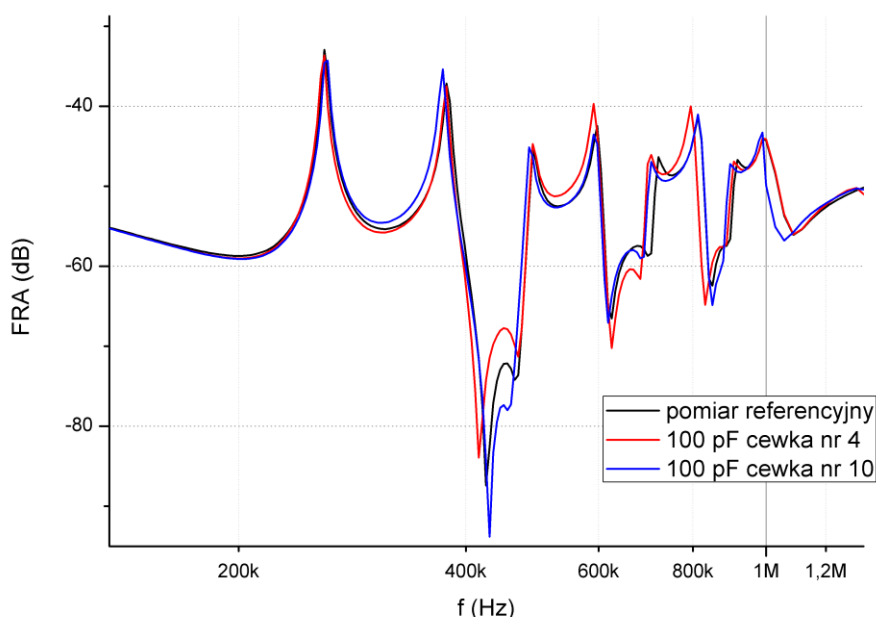
Rys. 2. Wyniki pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia z dołączonymi pojemnościami



Rys. 3. Wyniki pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia z deformacjami poosiowymi

Na wykresie (Rys. 3) zaobserwować można różnice pomiędzy przebiegami referencyjnym i deformacyjnymi głównie w tłumieniu rezonansu w ok. 400 kHz, a także zmianę tłumienia i przesunięcie po częstotliwości fragmentu krzywej od 620 kHz do 900 kHz dla deformacji u góry uzwojenia oraz zmianę tłumienia w zakresie częstotliwości od 280 kHz do 380 kHz dla deformacji w środku uzwojenia.

Na kolejnym wykresie (Rys. 4) przedstawione zostały krzywe zarejestrowane dla symulacji elektrycznych. Geometria uzwojenia pozostała więc bez zmian, a jedynie dołączano pojemności w miejscach odpowiadających deformacjom wykonanym dla części deformacyjnej.



Rys. 4. Wyniki pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia dla elektrycznej symulacji deformacji poosiowej

Zaobserwować można, że różnice pomiędzy rejestracją referencyjną, a symulacjami dla cewek nr 4 i 10 są analogiczne jak dla rzeczywistych deformacji. Największe różnice występują dla rezonansu 400 kHz, widoczna jest zmiana tłumienia w zakresie od 300 kHz do 380 kHz dla zmiany w środku uzwojenia oraz przesunięcie po częstotliwości i zmiana tłumienia w zakresie 600-800 kHz dla zmiany na górze uzwojenia.

Bezpośrednie porównanie wyników obu eksperymentów na jednym wykresie nie jest możliwe, gdyż różnią się od siebie przebiegi referencyjne. Wynika to z faktu, iż po wykonaniu badań deformacyjnych nie było możliwe przywrócenie uzwojenia do pierwotnego kształtu z pełną precyzją. Dlatego też podczas obu eksperymentów przebiegi referencyjne wykonywane były dla każdej grupy deformacji lub symulacji, a nie tylko na początku. Z tych powodów porównanie zmian w przebiegach charakterystyk odpowiedzi częstotliwościowej dla obu przypadków przedstawiono tabelarycznie poniżej. Położenie analizowanych charakterystycznych rezonansów referencyjnych może się w niewielkim stopniu różnić dla obu eksperymentów. Zawarte w tabeli różnice w tłumieniu i częstotliwości dla przebiegów FRA po odkształceniach lub symulacjach elektrycznych odnoszą się zawsze dla tych właśnie wartości częstotliwości. Należy pamiętać, że dla

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

wysokich częstotliwości na wynik pomiaru ma wpływ wiele czynników zewnętrznych, m.in. ułożenie przewodów i konfiguracja poszczególnych elementów względem siebie, stąd w przemysłowej analizie wyników w mniejszym stopniu uwzględnia się zmiany widoczne w tym zakresie. Dodatkowo przy logarytmicznej prezentacji wyników niewielkie przesunięcia rezonansów po częstotliwości mogą mieć znaczne wartości liczbowe, dlatego wyniki w tabeli przedstawiono w postaci logarytmów dziesiętnych, by zachować zgodność z prezentacją graficzną.

Tabela 1. Liczbowa charakterystyka zmian w przebiegach FRA dla deformacji poosiowych względem przebiegu referencyjnego dla wybranych lokalnych ekstremów funkcji.

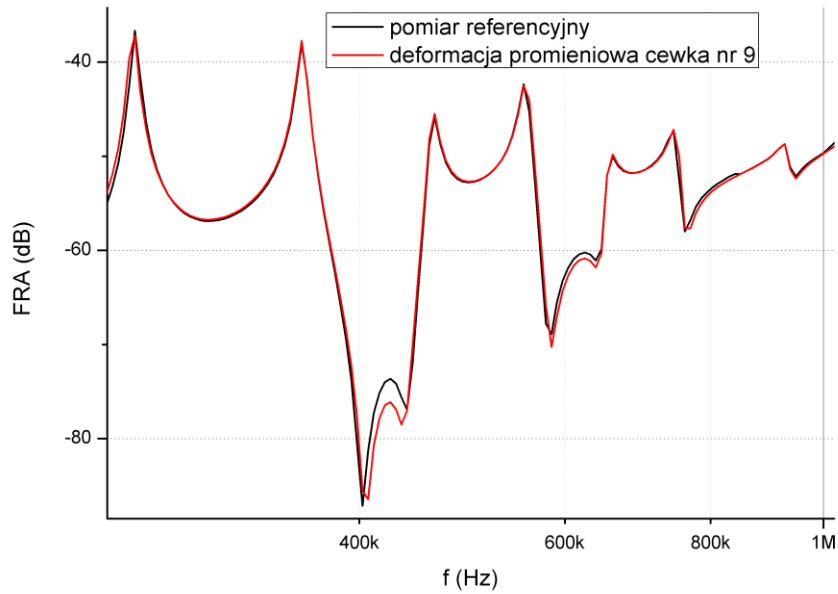
f (Hz)	Deformacja fizyczna $\Delta FRA$ (dB)/ $\Delta \log(f)$		f (Hz)	Symulacja elektryczna $\Delta FRA$ (dB)/ $\Delta \log(f)$	
	cewka nr 4	cewka nr 10		cewka nr 4	cewka nr 10
376	-0,2/ -2,7	1,9/ -3,7	357	-0,9/ 3,6	1,9/ -3,9
425	4/ -3,9	-7,8/ 3,8	404	2,1/ -4,0	-9,6/ 3,8
700	-3/ -4,3	-0,3/ -4,1	642	1,3/ 4,2	-0,7/ -3,6
719	0/ -4,3	-0,7/ -4,0	660	1,3/ 4,2	-0,1/ 0
810	1,5/ -4,2	0,2/ 0	742	2,3/ 4,0	-0,1/ 3,7

Z powyższych wyników wyciągnąć można wnioski, że w obu przypadkach dla głównego rezonansu 404/425 kHz przesunięcie po częstotliwości i amplitudzie defektów zarówno na górze, jak i w środku uzwojenia w obu eksperymentach jest analogiczne (niebieski wiersz). Dla cewki nr 4 następuje przesunięcie w lewo i do góry, zaś dla cewki nr 10 w prawo i w dół, przy czym w obu przypadkach są to zmiany znaczące. Pozostałe punkty również wykazują korelację. Zaobserwować można większe zmiany dla pierwszego analizowanego rezonansu dla cewki nr 10, zaś dla cewki nr 4 zmiany widoczne są bardziej przy rezonansach powyżej 600 kHz.

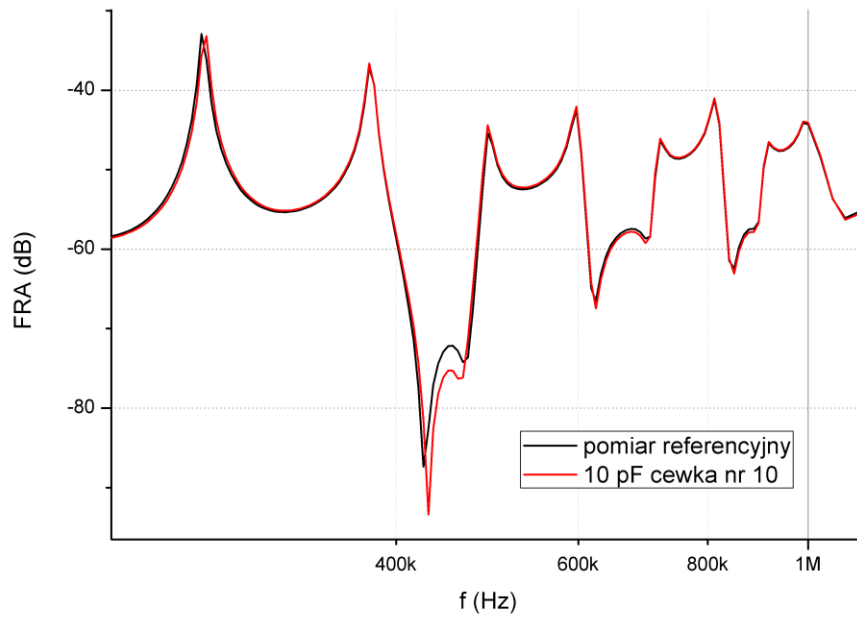
### **Wyniki badań – deformacja promieniowa**

W oparciu o wyniki uzyskane w poprzednim punkcie można założyć, że i w przypadku deformacji promieniowych głównym czynnikiem wpływającym na zmiany w krzywej FRA będzie pojemność międzycewkowa. Deformacja ta polegała na wysuwaniu poszczególnych cewek o ok. 3 cm, tym samym zmiana pojemności pomiędzy cewkami była znacznie mniejsza. Dodatkowo w przypadku takiej deformacji pojemność między cewkami powinna spaść, więc aby móc to poprawnie odwzorować, założono zbliżony efekt w przypadku dodania pojemności do wysuniętego fragmentu. Dzięki temu lokalnie w uzwojeniu wystąpi najpierw mniejsza pojemność, potem większa i znowu mniejsza, tak jak w przypadku deformacji. Oczywiście takie podejście wpłynie na niedokładność w odwzorowaniu przebiegu.

Rys. 5 przedstawia wynik pomiaru dla deformacji cewki nr 10, zaś Rys. 6 symulację elektryczną takiej deformacji. W obu przypadkach różnice pomiędzy przebiegami referencyjnym, a przebiegami odkształconymi zaobserwować można głównie w okolicy głównego rezonansu ok. 420 kHz, a także na zboczach pojemnościowym ok 620-640 kHz. W obu przypadkach zmiany mają podobny charakter, następuje przesunięcie przebiegu po częstotliwości, przy czym dla symulacji elektrycznej dodatkowo zmienia się tłumienie rezonansu, co zapewne wynika z omówionego podłączenia pojemności do wysuniętej cewki, co stanowi swego rodzaju uproszczenie. Być może wyniki byłyby dokładniejsze gdyby najpierw dołączyć elementy pojemnościowe, dokonać deformacji i zarejestrować odpowiedź uzwojenia, a następnie zasymulować elektrycznie deformację poprzez usunięcie dodatkowych elementów. Jednak biorąc pod uwagę liczbę kombinacji różnych deformacji i wartości pojemności jest to trudne do przeprowadzenia.



Rys. 5. Wyniki pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia z deformacją promieniową



Rys. 6. Wyniki pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia dla elektrycznej symulacji deformacji promieniowej

## **VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012**

### **Wnioski**

Na podstawie zaprezentowanych badań można wyciągnąć zasadniczy wniosek, iż deformacja poosiowa uzwojenia transformatora wpływa głównie na zmianę pojemności międzycewkowych. W analizowanym przykładzie na zmiany w przebiegach odpowiedzi częstotliwościowej nie wpływają wartości sprzężeń magnetycznych. Wniosek ten będzie przydatny w modelowaniu tego typu deformacji, szczególnie przy zastosowaniu modeli obwodowych. W takim przypadku wystarczające będzie dodanie elementu odpowiadającego za zmianę pojemności, aby poprawnie zasymulować deformację.

W przypadku deformacji promieniowych również możliwe było zasymulowanie deformacji poprzez dołączenie elementu pojemnościowego, jednak w rzeczywistym transformatorze przesunięcie promieniowe cewki zmieniłoby także pojemności do rdzenia i kadzi oraz innych uzwojeń, więc odpowiedź miałaby inny przebieg. Niemniej jednak wpływ rdzenia dla deformacji poosiowej nie będzie miał większego znaczenia, gdyż w takim przypadku zmiany geometrii nie wpływają na zmianę odległości zwojów od rdzenia. W obu przypadkach deformacji konkretne wartości pojemności, jak i innych elementów stosowanych do symulacji, zależą od gabarytów i konstrukcji danego transformatora, więc przyjęte w eksperymencie wielkości 100 pF i 10 pF nie mają tu decydującego znaczenia.

W dalszych badaniach wykonany zostanie model komputerowy uzwojenia i sprawdzona zostanie metoda symulowania deformacji poosiowej za pomocą pojemności. Zbadane zostaną również inne przypadki deformacji wszystkimi trzema metodami, tj. poprzez kontrolowane deformacje, symulacje elektryczne oraz w drodze modelowania komputerowego.

Prezentowane badania prowadzone są w ramach projektu badawczego własnego nr N N510 698240 pt. „Algorytm identyfikacji odkształceń uzwojeń transformatorów na podstawie pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej (FRA)”, sfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

### **Literatura**

1. Banaszak Sz., Analiza odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatorów w świetle zaleceń projektu normy IEC 60076-18, Miesięcznik Naukowo-Techniczny, Pomiary Automatyka Kontrola, Transformatory w Eksploatacji, Nr 4/2011 r., Vol.57, ISSN 0032-4140.
2. Banaszak Sz., Wybrane czynniki wpływające na odpowiedź częstotliwościową autotransformatora energetycznego, Miesięcznik Naukowo-Techniczny, Pomiary Automatyka Kontrola, Transformatory w Eksploatacji, Nr 4/2011 r., Vol.57, ISSN 0032-4140.
3. Banaszak Sz., Detekcja deformacji uzwojeń transformatorów metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej FRA, X Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć IW-2010, Będlewo, czerwiec 2010, Przegląd Elektrotechniczny 11b'2010, ISSN 0033-2097, s. 174-177.

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