



Andrzej GRACZKOWSKI, Jarosław SZYMAŃSKI

Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki

Analiza wpływu parametrów geometrycznych i materiałowych na spektrum napięcia powrotnego w oparciu o schemat zastępczy izolacji papierowo-olejowej

Streszczenie. Przedstawiono, oparty na schemacie zastępczym, model izolacji papierowo-olejowej. Parametry schematu zastępczego wyznaczone na podstawie odpowiedzi dielektrycznej preszpanu o znanym zawilgoceniu. Zaprezentowany model został wykorzystany do analizy wpływu geometrii układu izolacyjnego, rezystywności oleju, temperatury i zawilgocenia na spektrum napięcia powrotnego.

Abstract. (Analysis of influence of geometric and material parameters on recovery voltage spectrum on the basis of equivalent circuit of oil-paper insulation). Equivalent circuit model for oil-paper insulation was described. The parameters of the model were found on the basis of measurements on impregnated pressboard samples with known moisture content. The model was used for calculation of recovery voltage spectrum. An influence of geometry of insulation system, oil resistivity, temperature and moisture content on recovery voltage spectrum was investigated.

Słowa kluczowe: izolacja papierowo-olejowa, odpowiedź dielektryczna, schemat zastępczy, napięcie powrotne

Keywords: oil-paper insulation, dielectric response, equivalent circuit, recovery voltage

Wstęp

Jednym z istotnych parametrów izolacji papierowo-olejowej transformatora jest jej stopień zawilgocenia. Wzrost zawartości wody powoduje znaczące pogorszenie parametrów elektrycznych i mechanicznych układu izolacyjnego. Woda w znacznym stopniu przyspiesza procesy starzenia celulozy oraz jest także jednym z produktów starzenia. Ocena stopnia zawilgocenia jest więc kluczowa w diagnostyce transformatorów energetycznych, szczególnie w odniesieniu do jednostek, które osiągnęły już przewidywany czas życia technicznego [1, 2].

Tradycyjny sposób oceny zawilgocenia izolacji papierowej transformatora, oparty na tzw. krzywych równowagi, jest niejednoznaczny i obciążony znaczną niepewnością [3].

W ostatniej dekadzie wprowadzono nowe metody oceny zawilgocenia papieru oparte na analizie odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego, takie jak: spektroskopia dielektryczna w dziedzinie częstotliwości FDS, metoda napięcia powrotnego RVM oraz pomiar prądu polaryzacji i depolaryzacji PDC. Decydującą sprawą, w przypadku tych metod, jest prawidłowa interpretacja wyników, oparta na modelowaniu odpowiedzi dielektrycznej [4, 5].

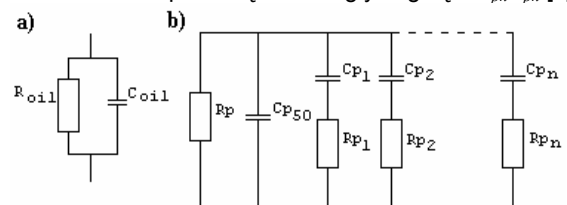
Istnieje szereg kontrowersji, co do poprawności interpretacji wyników, szczególnie w odniesieniu do metody RVM [2, 6]. Konieczne są zatem dalsze badania w celu ich wyjaśnienia i opracowania pewnego i uniwersalnego sposobu interpretacji wyników.

Pomiary w dziedzinie częstotliwości

W celu uzyskania danych potrzebnych do modelowania przeprowadzono pomiary odpowiedzi dielektrycznej preszpanu w dziedzinie częstotliwości. Przygotowano i zbadano próbki preszpanu impregnowanego olejem o zawartości wilgoci: 0,6, 1, 2, 3 i 4 %. Wykonano pomiary co najmniej 3 różnych próbek o tym samym stopniu zawilgocenia, oceniając rozrzut wyników. Do dalszej analizy przyjęto wartość średnią z wyników pomiarów. Pomiary wykonano w temperaturze 20°C, 50°C, 80°C, w zakresie częstotliwości od 0,1 mHz do 1 MHz, przy napięciu 5V RMS. Procedurę przygotowania próbek i analizę wyników przedstawiono szczegółowo w [7].

Obwód zastępczy oleju i preszpanu impregnowanego

Jako schemat zastępczy oleju przyjęto obwód RC pokazany na rysunku 1a, natomiast do reprezentacji preszpanu impregnowanego schemat zastępczy pokazany na rysunku 1b. Pojemność C_{p50} reprezentuje pojemność próbki przy częstotliwości 50 Hz, natomiast R_p reprezentuje straty przewodnościowe. Zależne od częstotliwości straty polaryzacyjne oraz związana z nimi zmiana pojemności są zamodelowane za pomocą równoległych gałęzi $R_{pn}C_{pn}$ [8].



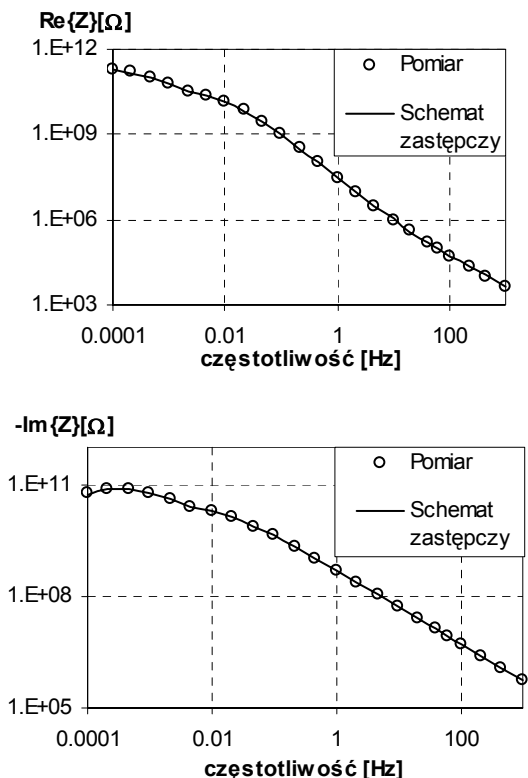
Rys. 1. Schemat zastępczy oleju (a) oraz preszpanu impregnowanego (b) [8]

Na podstawie wyników pomiarów w dziedzinie częstotliwości wyznaczono parametry schematu zastępczego, odpowiadające preszpanowi impregnowanemu o różnej zawartości wilgoci (1%, 2%, 3% i 4%), dla różnych wartości temperatury (20°C, 50°C, 80°C). Stwierdzono, że do prawidłowej reprezentacji preszpanu impregnowanego, w badanym zakresie zawilgocenia i częstotliwości, wystarczy 7 gałęzi RC. Maksymalny błąd dopasowania w zakresie częstotliwości 0,0001-1000 Hz nie przekraczał 3%. Porównanie odpowiedzi zmierzonej z odpowiedzią schematu zastępczego pokazano na rysunku 2.

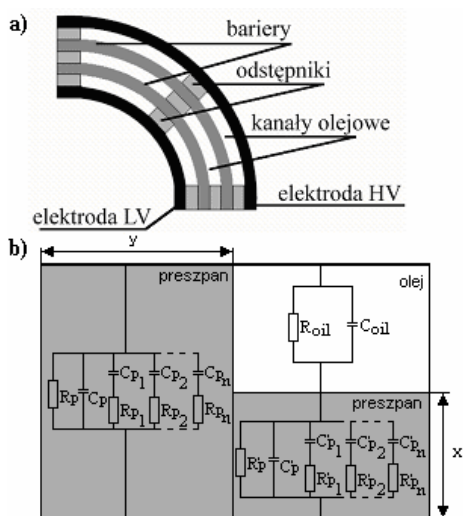
Model układu izolacyjnego transformatora

Układ izolacyjny transformatora energetycznego składa się z preszpanowych barier i odstępników oraz przestrzeni olejowych - jak pokazano na rysunku 3a. W celu wyznaczenia odpowiedzi dielektrycznej takiego układu posłużono się modelem X-Y. Parametr X reprezentuje względną zawartość barier, a parametr Y względną zawartość odstępników [9]. Każdemu z elementów modelu X-Y (olej, bariery i odstępniki) przypisano odpowiedni obwód zastępczy, jak pokazano na rysunku 3b. Wyznaczone wcześniej parametry obwodu

zastępczego zostały w tym modelu odpowiednio przeskalowane, w zależności od przyjętej geometrii (X - Y) oraz pojemności geometrycznej układu izolacyjnego.



Rys. 2. Porównanie zmierzonej i obliczonej impedancji próbki preszpanu o zawilgoceniu 4% w 20°C



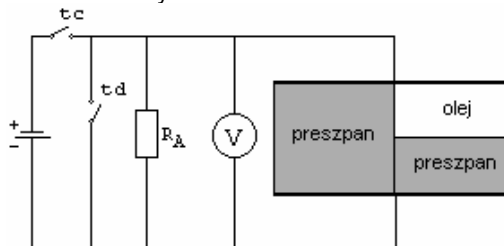
Rys. 3. Układ izolacyjny transformatora (a) oraz jego reprezentacja za pomocą modelu X - Y i schematu zastępczego (b)

Obliczenia spektrum napięcia powrotnego

Przedstawiony wcześniej model układu izolacyjnego transformatora został zaimplementowany w programie PSpice celem przeprowadzenia symulacji. Model umożliwia wyznaczenie odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie czasu (RVM, PDC) i częstotliwości (FDS). W dalszej części artykułu przedstawiono zastosowanie modelu do badania wpływu parametrów geometrycznych i materiałowych na spektrum napięcia powrotnego.

Schemat układu do wyznaczania napięcia powrotnego pokazano na rysunku 4. Rezystor R_A reprezentuje rezystancję miernika oraz rezystancję upływu. Spektra napięcia

powrotnego wyznaczono dla czasów ładowania od 0,02 s do 2000 s, przyjmując czas rozładowania równy połowie czasu ładowania. Parametry obliczeń zestawiono w tabeli 1.

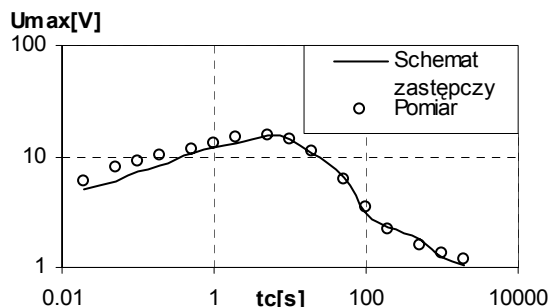


Rys. 4. Schemat układu do wyznaczania napięcia powrotnego

Tabela 1. Parametry obliczeń

Parametr	Wartość
względna zawartość barier X	20 %
względna zawartość odstępników Y	20 %
rezystywność oleju	$10^{10} \Omega\text{m}$
temperatura	20 °C
rezystancja równoległa R_A	$10^{10} \Omega$

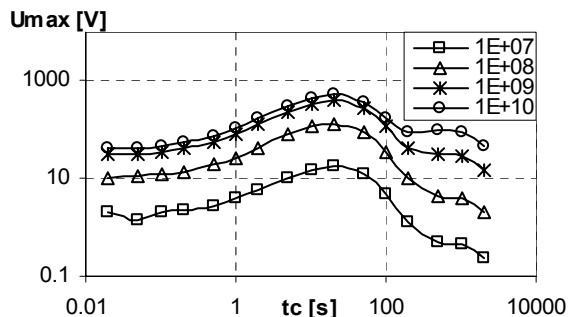
W celu weryfikacji przyjętego modelu przeprowadzono pomiary napięcia powrotnego za pomocą przyrządu RVM 5462 firmy Tettex. Porównanie wyników symulacji oraz pomiaru przedstawia zadowalającą zgodność (rys.5).



Rys. 5. Porównanie zmierzonego i obliczonego spektrum napięcia powrotnego dla próbki preszpanu o zawilgoceniu 4% w 30°C

Wpływ rezystancji równoległej

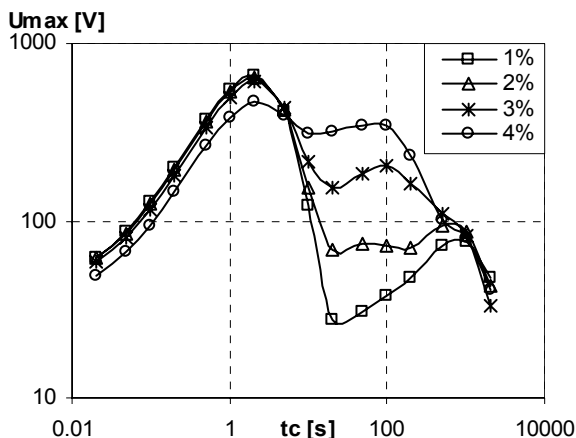
Dla stałych parametrów modelu izolacji wyznaczono spektra napięcia powrotnego dla różnych wartości rezystancji równoległej - zmieniając wartość rezystora R_A w granicach od 10^7 do $10^{10} \Omega$. W układzie rzeczywistym wartość tej rezystancji jest trudna do oszacowania i zależy od wielu czynników. Różne wartości R_A mogą odpowiadać np. różnym wartościom rezystancji upływu na przepustach transformatora. Jak pokazano na rysunku 6, wartość maksimum spektrum napięcia powrotnego zależy od rezystancji R_A , podczas gdy czas wystąpienia maksimum nie zależy znacząco od tego parametru.



Rys. 6. Wpływ rezystancji równoległej R_A [Ω] na spektrum napięcia powrotnego; zawilgocenie preszpanu 2%, pozostałe parametry jak w tabeli 1

Wpływ zawilgocenia preszpanu

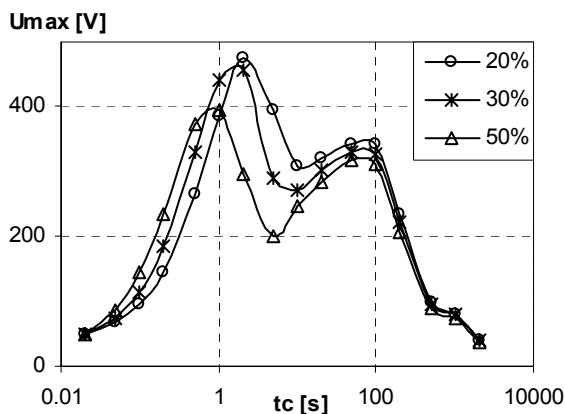
Na rysunku 7 przedstawiono wyniki symulacji dla różnych wartości zawilgocenia preszpanu. Inne parametry modelu pozostały stałe. Jak można zauważyć, w spektrum napięcia powrotnego występują dwa maksima. Czas wystąpienia pierwszego (lewego) z maksimów nie jest, w sposób istotny, zależny od zawilgocenia izolacji preszpanowej. Wartość tego maksimum zmienia się jedynie nieznacznie – osiągając mniejszą wartość dla preszpanu o większym zawilgoceniu. Zmiana zawilgocenia preszpanu powoduje natomiast wyraźną zmianę w spektrum napięcia powrotnego, w zakresie czasów od kilkunastu do kilkuset sekund. Następuje zmiana zarówno wartości, jak i położenia drugiego (prawego) maksimum.



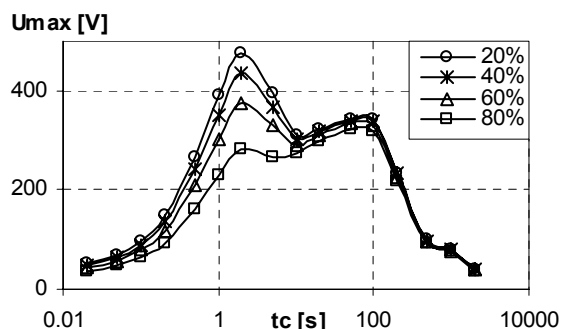
Rys. 7. Wpływ zawilgocenia preszpanu na spektrum napięcia powrotnego; parametry jak w tabeli 1

Wpływ geometrii

Zmiana geometrii układu izolacyjnego (tj. parametrów X , Y) powoduje wyraźną zmianę pierwszego (lewego) z maksimów spektrum napięcia powrotnego. Zwiększenie zawartości barier (parametr X) – co pokazano na rysunku 8. – powoduje przesunięcie tego maksimum w kierunku krótszych czasów, z jednoczesnym zmniejszeniem jego wartości. Obniżenie pierwszego (lewego) maksimum występuje również przy zwiększeniu zawartości odstępników (parametr Y) – jak pokazano na rysunku 9. W tym przypadku czas wystąpienia tego maksimum pozostaje niezmienny. Według przeprowadzonych symulacji, zmiana geometrii nie wpływa znacząco ani na czas wystąpienia, ani na wartość drugiego (prawego) z maksimów w spektrum napięcia powrotnego.



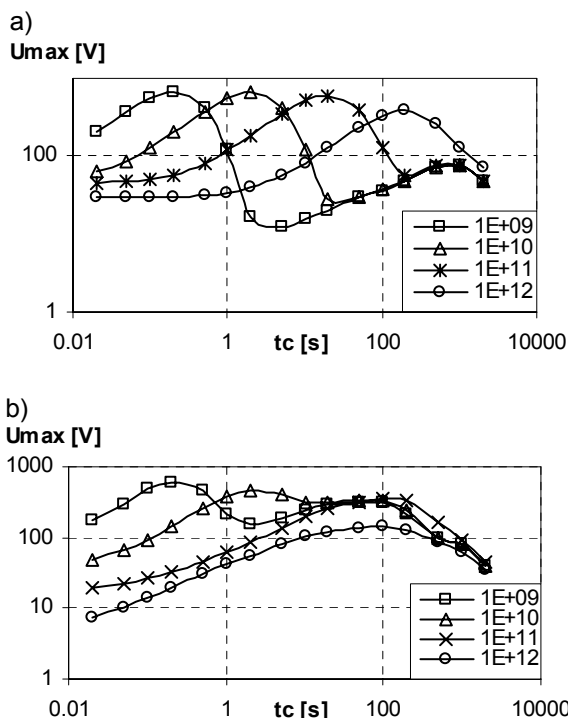
Rys. 8. Wpływ parametru geometrycznego X na spektrum napięcia powrotnego; zawilgocenie preszpanu 4%, pozostałe parametry jak w tabeli 1



Rys. 9. Wpływ parametru geometrycznego Y na spektrum napięcia powrotnego; zawilgocenie preszpanu 4%, pozostałe parametry jak w tabeli 1

Wpływ rezystywności oleju

Jak pokazano na rysunku 10, wpływ rezystywności oleju na spektrum napięcia powrotnego jest bardzo istotny. Dla niewielkiej rezystywności oleju w spektrum napięcia powrotnego występują dwa maksima. Wzrost rezystywności powoduje przesunięcie pierwszego (lewego) maksimum w kierunku dłuższych czasów, z jednoczesnym zmniejszeniem jego wartości. Przy pewnej wystarczająco dużej rezystywności oleju, w spektrum występuje tylko jedno maksimum. Można więc wnioskować, że drugie (prawe) maksimum, zależne od zawilgocenia preszpanu, zostaje „zakryte” przez dominujące maksimum zależne od oleju. Wtedy w spektrum pojawia się tylko jedno maksimum przesunięte w stosunku do maksimum zależnego od zawilgocenia preszpanu. Efekt ten jest bardziej znaczący w przypadku mniejszego zawilgocenia preszpanu (rys.10a), ponieważ drugie (prawe) maksimum jest wtedy niewielkie. Dla preszpanu o dużym zawilgoceniu (rys.10b) i dla dużej rezystywności oleju, maksimum zależne od zawilgocenia preszpanu jest większe i nie występuje efekt „zakrycia” tego maksimum przez maksimum zależne od rezystywności oleju.

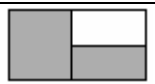


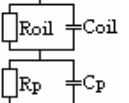


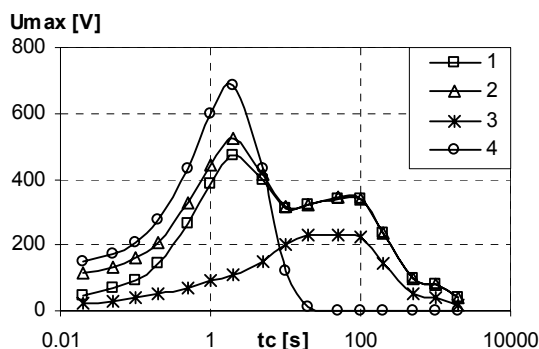
Rys. 10. Wpływ rezystywności oleju $[\Omega m]$ na spektrum napięcia powrotnego; zawilgocenie preszpanu 1% (a) oraz 4% (b), pozostałe parametry jak w tabeli 1

Dyskusja wyników

W celu wyjaśnienia wyników symulacji przeanalizowano spektra napięcia powrotnego dla poszczególnych elementów układu izolacyjnego (tab. 2). Pochodzenie maksimum w spektrum napięcia powrotnego ilustruje rysunek 11. W odpowiedzi całego układu (1) widoczne są dwa maksima. Bardzo zbliżoną odpowiedź daje szeregowo uwarstwiony układ olej-preszpan (2). Maksima występują w tych samych czasach. W odpowiedzi samego preszpanu (3) widoczne jest tylko jedno maksimum. Czas wystąpienia tego maksimum pokrywa się z drugim (prawym) maksimum występującym w przypadkach 1 i 3. Można więc sądzić, że to maksimum jest zdeterminowane właściwościami preszpanu. Spektrum (4) jest odpowiedzią szeregowo układu olej-preszpan, w którym uwzględniono jedynie rezystancję i pojemność oleju i preszpanu, pomijając straty polaryzacyjne w preszpanie (elementy R_{pn} , C_{pn} schematu zastępczego). Jest to typowy układ Maxwella-Wagnera reprezentujący polaryzację strukturalną [10]. Czas wystąpienia maksimum dla takiego układu jest taki sam jak czas wystąpienia pierwszego (lewego) maksimum w spektrum całego układu. Położenie tego maksimum, według przeprowadzonych symulacji, jest zdeterminowane głównie rezystywnością oleju oraz geometrią, a tylko w niewielkim stopniu zawilgoceniem preszpanu.

Tabela 2. Analizowane elementy układu izolacyjnego

element układu izolacyjnego	spektrum
 kompletny model X-Y	1
 olej i preszpan szeregowo	2
 tylko preszpan	3
 olej i preszpan szeregowo - model Maxwella-Wagnera	4



Rys. 11. Spektra napięcia powrotnego dla poszczególnych elementów układu izolacyjnego z tabeli 2; zawilgocenie preszpanu 4%, inne parametry jak w tabeli 1

Wnioski

Na podstawie wstępnej weryfikacji stwierdzono zgodność przyjętego modelu z wynikami pomiarów napięcia powrotnego.

Wyniki symulacji potwierdzają kontrowersję dotyczącą interpretacji wyników w metodzie RVM. Czas wystąpienia maksimum w spektrum napięcia powrotnego zależy nie

tylko od zawilgocenia papieru, ale także od geometrii i rezystywności oleju.

Generalnie w spektrum napięcia powrotnego układu izolacyjnego transformatora występują dwa maksima. Jedno zależy głównie od geometrii i rezystywności oleju, drugie zależy od zawilgocenia preszpanu.

W pewnych przypadkach maksima mogą na siebie zachodzić – wówczas widoczne jest tylko jedno maksimum. Położenie pojedynczego maksimum może być wtedy inne niż wynikające z zawilgocenia preszpanu.

Przyjęty model układu izolacyjnego może posłużyć do rozszerzonego wnioskowania o zawilgoceniu izolacji transformatora na drodze porównania odpowiedzi modelu z odpowiedzią zmierzoną. Wymaga to jednak dalszych badań modelowych.

Wydaje się, że w przypadku występowania dwóch maksimum i znajomości rezystywności oleju możliwa jest jednoznaczna identyfikacja obu maksimum. W takim przypadku interpretacja wyników może być prostsza, niż w przypadku istnienia tylko jednego maksimum w spektrum napięcia powrotnego.

LITERATURA

- [1] Moser H.P., Dahinden V., Transformerboard II, Rapperswil, Switzerland: H Weidmann AG, 1987.
- [2] Saha T. K., Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 10, No. 5, October 2003.
- [3] Du Y., Zahn M., Lesieutre B.C., Mamishev A.V., Lindgren S.R., Moisture Equilibrium in Transformer Paper-Oil Systems, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 15, No. 1, January/February 1999.
- [4] Zaengl W.S., Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 19, No. 5, 2003.
- [5] Zaengl W.S., Applications of Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 19, No. 6, 2003.
- [6] Gubanski S. M., Boss P., Csepes G., Houhanessian V. D., Filippini J., Guinic P., Gafvert U., Karius V., Lapworth J., Urbani G., Werelius P., Zaengl W. S., Dielectric response methods for diagnostics of power transformers: Report of the TF 15.01.09, *CIGRE*, 2001.08.27.
- [7] Ekanayake C., Graczkowski A., Walczak K, Gubanski S.M., Dielectric Spectroscopy Measurements on Oil Impregnated Paper/Pressboard Samples, *APTADM'2004, 2nd International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials*, pp. 62-69, Wrocław, Poland, September, 15-17, 2004.
- [8] Houhanessian V. D., "Measurement and Analysis of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems", *Ph.D. thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich*, 1998.
- [9] Gafvert U., Frimpong G., Fuhr J., Modelling of dielectric measurements on power transformers, *Proceedings of CIGRÉ*, Paris, 1998.
- [10] Gorur G.R., Dielectrics in Electric Field, *Marcel Dekker Inc.*, New York, Basel, 2003.

Praca wykonana w ramach międzynarodowego projektu RADIATool NNE5 – 200 – 472 współfinansowanego przez Komisję Europejską w ramach 5 Programu Ramowego.

Autorzy: dr inż. Andrzej Graczkowski, mgr inż. Jarosław Szymański, E-mail: andrzej.graczkowski@put.poznan.pl, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań.