

Stefan WOLNY

POLITECHNIKA OPOLSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI

Wpływ przewodności preszpanu oraz oleju izolacyjnego transformatora na parametry napięcia powrotnego z wykorzystaniem schematu zastępczego X-Y

Dr inż. Stefan WOLNY

Adiunkt Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, pracownik naukowo-dydaktyczny Katedry Inżynierii Materiałowej i Elektrycznej. Autor 60 publikacji z zakresu diagnostyki stanu wysokonapięciowych układów izolacyjnych oraz badań tendencji do elektryzacji cieczy dielektrycznych.



e-mail: s.wolny@po.opole.pl

Streszczenie

Artykuł przedstawia parametryczną metodę analizy charakterystyk czasowych napięcia powrotnego, wykorzystywaną w diagnostyce stanu izolacji papierowo-olejowej transformatorów energetycznych. Ocenie poddano wpływ przewodności preszpanu elektrotechnicznego oraz mineralnego oleju izolacyjnego. Do badań wykorzystano elektryczny schemat zastępczy typu X-Y, symulujący układ głównej izolacji transformatorów energetycznych. W podsumowaniu dokonano wstępnej selekcji parametrów, pod kątem ich przydatności w diagnostyce transformatorów energetycznych.

Słowa kluczowe: izolacja papierowo-olejowa, metoda napięcia powrotnego, diagnostyka transformatorów energetycznych.

Influence of insulating board and insulation transformer oil conductivity on the return voltage parameters using the equivalent diagram X-Y

Abstract

The paper presents a parametric method of the analysis of the return voltage time characteristics (Fig. 3) used for diagnostics of paper-oil insulation system condition of power transformers [8, 9]. The influence of conductivity of a transformer board and mineral insulation oil constituting the system of the transformer main insulation on the return voltage selected parameters was assessed. An electric equivalent diagram X-Y (Figs. 1 and 2) simulating a system of oil channels and transformer board barriers and separators [2, 6] of the main insulation of medium- and high-power transformers was used. The investigations were carried out using PSpice program, and voltage and time values were in compliance with the recommendations for the recovery voltage method (RVM) [5, 6]. The range of the analysed changes of the transformer board and insulation oil conductivity as well as other parameters of the equivalent diagram X-Y (including geometry of the insulation system) were selected basing on the literature data referring to real systems [2]. From the results obtained from simulation investigations (Tabs. 1 and 2) the conclusions were drawn. They made initial selection of the parameters possible when taking into account their usefulness for diagnostics of the paper-oil insulation system condition of power transformers (Fig. 5) on the basis of the parametric analysis of the return voltage characteristics.

Keywords: paper-oil insulation, recovery voltage method, power transformer diagnostics.

1. Wstęp

Stan izolacji papierowo-olejowej jest podstawowym czynnikiem określającym „kondycję” transformatora energetycznego oraz jego ewentualny pozostały „czas życia”, oczywiście przy zachowaniu podobnych warunków eksploatacji [1, 2]. Ponieważ wiele jednostek transformatorowych zainstalowanych zarówno w krajowym systemie energetycznym jak i systemach energetycznych innych państw, przekroczyło już połowę swego życia tech-

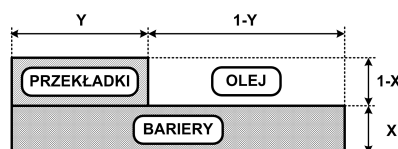
nicznego, powstała potrzeba prawidłowego diagnozowania stanu izolacji tych jednostek [2, 3]. Ponadto wysokie koszty remontów, zakupu nowych transformatorów oraz wydatków ponoszonych przez przedsiębiorstwa energetyczne z tytułu niedostarczonej energii, których przyczyną jest awaria transformatora, stymulowały ośrodki naukowo-badawcze nad rozwojem i doskonaleniem nowych metod diagnostycznych.

W chwili obecnej, jednymi z częściej stosowanych metod wykorzystywanych w diagnostyce izolacji papierowo-olejowej są metody oparte na analizie zjawisk polaryzacyjnych, przeprowadzane w dziedzinie czasu [4, 5]. Zalicza się do nich głównie metodę RVM (Recovery Voltage Method) wykorzystującą zjawisko napięcia powrotnego w dielektrykach oraz metodę PDC (Polarization and Depolarization Current) opartą przede wszystkim na analizie czasowych charakterystyk prądu depolaryzacji.

Izolacja papierowo-olejowa transformatorów energetycznych stanowi złożony układ w sensie geometrycznym, składający się z wielu elementów (izolacji zwojowej, przekładek, barier, kanałów olejowych, itd.). Przy analizie zjawisk relaksacyjnych oraz przewodnictwa, szczególnie przy porównywaniu parametrów dielektrycznych izolacji uzwojeń różnych transformatorów, niezbędna jest znajomość geometrii systemu oraz pojemności geometrycznej (C_0) układu izolacyjnego. Najczęściej, stałe czasowe określające poszczególne mechanizmy polaryzacji relaksacyjnych, symulowane są jako szeregowe połączenie elementów RC. Liczba szeregowych gałęzi RC przyłączonych do schematu zastępczego określa jednocześnie liczbę mechanizmów relaksacyjnych jakie występują w diagnozowanej izolacji [5]. Elektryczny schemat zastępczy typu X-Y symuluje układ kanałów olejowych oraz preszpanowych barier i przekładek, głównej izolacji transformatorów energetycznych średnich i dużych mocy [6]. W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania schematu X-Y do celów wstępnej selekcji parametrów napięcia powrotnego, pod kątem ich przydatności w diagnostyce stanu systemów izolacji papierowo-olejowej transformatorów energetycznych, bazującej na parametrycznej analizie charakterystyk napięcia powrotnego.

2. Schemat zastępczy X-Y

Schemat zastępczy X-Y powstał w oparciu o model systemu izolacji głównej transformatora, który zbudowany jest z trzech zasadniczych części, a mianowicie przedstawionych w postaci skumulowanej kanałów olejowych, barier oraz przekładek (rys. 1). Elementy te stanowią układ szeregowo-równoległy.



Rys. 1. Uproszczony model głównej izolacji olejowego transformatora energetycznego

Fig. 1. Simplified model of the oil power transformer main insulation

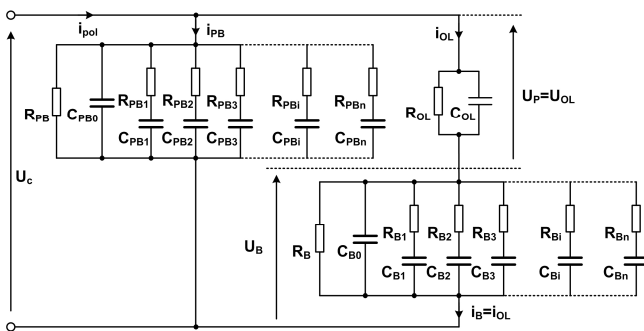
Jeżeli wysokość uzwojeń transformatora jest zdecydowanie większa od odległości między uzwojeniami DN i GN (najczęstszy przypadek), możliwe jest wówczas pominięcie w modelu geometrii układu izolacyjnego pomiędzy uzwojeniami DN a rdzeniem transformatora. Parametr X oraz Y opisują wzory:

$$X = \frac{G_B}{G_K}, \quad Y = \frac{S_P}{O_K}, \quad (1)$$

gdzie:

- G_B - grubość wszystkich barier,
- G_K - grubość kanału izolacyjnego,
- S_P - całkowita szerokość wszystkich przekładek,
- O_K - zewnętrzny obwód kanału izolacyjnego.

Wartości X i Y modelu powinny być wyznaczone na podstawie rysunków konstrukcyjnych transformatora. Zazwyczaj parametr X zmienia się w rzeczywistości w granicach od 0,2 do 0,5, natomiast parametr Y od 0,15 do 0,25 [2]. Dzięki uproszczeniu geometrii głównej izolacji papierowo-olejowej transformatora, elektryczny schemat zastępczy tej izolacji stanowią szeregowo-równoległe połączenia elementów RC, które reprezentują odpowiednio schematy elektryczne: kanału olejowego, barier oraz szeregowego połączenia przekładek i barier (rys. 2). W dalszych badaniach, liczbę szeregowych gałęzi RC symulujących kolejne stałe czasowe polaryzacji relaksacyjnych papierowo-olejowej izolacji ograniczono do trzech (odpowiednio dla krótkiego, średniego i długiego czasu relaksacji) [2, 7]. W tym samym schemacie zastępczym ujęto wpływ mechanizmów relaksacji występujących w oleju, przypowierzchniowej warstwie papier-olej oraz w głębi izolacji.



Rys. 2. Elektryczny schemat zastępczy X-Y izolacji głównej transformatora według modelu z rysunku 1

Fig. 2. Electric equivalent diagram X-Y of the transformer main insulation according to the model of Fig. 1

W diagnostyce stanu izolacji papierowo-olejowej metodami polaryzacyjnymi przyjmuje się, że relaksacja dielektryczna oleju izolacyjnego jest pomijalnie mała. Kanał olejowy jest wobec tego modelowany jedynie za pomocą elementów R_{OL} i C_{OL} (rys. 2), których wartości można wyznaczyć ze wzorów:

$$R_{OL} = \frac{\epsilon_0}{C_0 \gamma_{olej}} \left(\frac{1-X}{1-Y} \right), \quad (2)$$

$$C_{OL} = C_0 \epsilon_{r_olej} \frac{1-Y}{1-X}, \quad (3)$$

gdzie:

- ϵ_0 - przenikalność elektryczna próżni,
- C_0 - elektryczna pojemność geometryczna układu izolacyjnego,
- γ_{olej} - przewodność oleju,
- ϵ_{r_olej} - przenikalność względna oleju.

Pojemność geometryczną C_0 całego układu izolacyjnego, wyznaczyć można wykorzystując wzór na pojemność kondensatora cylindrycznego (4) lub z ilorazu zmierzonej pojemności badanej izolacji C_{iz} i rzeczywistej przenikalności elektrycznej układu ϵ_{iz} (5):

$$C_0 = \frac{2\pi \epsilon_0 h}{\log \frac{r_{GN}}{r_{DN}}}, \quad (4)$$

gdzie:

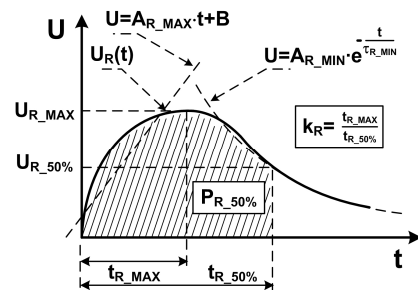
- h - wysokość uzwojeń,
- r_{GN} - zewnętrzny promień izolacji głównej,
- r_{DN} - wewnętrzny promień izolacji głównej,

$$C_0 = \frac{C_{iz}}{\epsilon_{iz}}, \quad \epsilon_{iz} = \frac{\epsilon_{preszpan} \epsilon_{olej}}{\epsilon_{preszpan} X + \epsilon_{olej} (1-X)}. \quad (5)$$

Na wartości parametrów elektrycznych schematu zastępczego izolacji głównej papierowo-olejowej transformatora ma wpływ wiele czynników, w tym przede wszystkim: ilość wody zgromadzonej w izolacji, stopień zatarzenia celulozy, temperatura, zawartość produktów procesu starzeniowego, rodzaj zastosowanych materiałów (papieru i oleju). Reprezentowane są one na schemacie zastępczym przez wiele równoległe włączonych gałęzi RC, symulujących zachowanie się poszczególnych cząsteczek charakteryzujących się określoną orientacją elektryczną (moment dipolowy bądź jon swobodny). Funkcja odpowiedzi dielektrycznej barier oraz przekładek jest więc modelowana za pomocą gałęzi R_{Bi} , C_{Bi} dla barier oraz R_{PBi} , C_{PBi} dla układu szeregowego przekładka-bariera (rys. 2).

3. Parametry napięcia powrotnego

Proces narastania napięcia powrotnego w funkcji czasu opisują trzy parametry: wartość maksymalna napięcia powrotnego (U_{R_MAX}), czas osiągnięcia tej wartości (t_{R_MAX}) i współczynnik kierunkowy prostej aproksymującej odcinek charakterystyki od 0 do t_{R_MAX} (A_{R_MAX}). Parametry te zostały przedstawione na rysunku 3.



Rys. 3. Parametry opisujące proces narastania oraz zanikania napięcia powrotnego
Fig. 3. Parameters describing the process of increase and decay of the return voltage

Diagnostyka stanu izolacji papierowo-olejowej przeprowadzana jedynie w oparciu o analizę czasowej charakterystyki napięcia powrotnego uzyskanej z pojedynczego cyklu pomiarowego, wymaga rozszerzenia listy parametrów uwzględniających również proces zanikania rejestrowanego napięcia [8]. Tym samym, analiza zostaje niejako „uzupełniona” o badanie zachowania się cząstek wolnorelaksujących, szczególnie istotnych w przypadku prawidłowego szacowania stopnia zawilgocenia i zatarzenia celulozy. Poprawna interpretacja zmian w mechanizmach relaksacji wolnozmiennych jest także niezwykle ważna podczas wykonywania diagnostyki izolacji papierowo-olejowej o znacznym stopniu degradacji [9].

Rysunek 3 przedstawia także parametry napięcia powrotnego opisujące proces jego zanikania, tj. czas osiągnięcia połowy wartości maksymalnej napięcia ($U_{R_50\%}$) po przekroczeniu U_{R_MAX} ($t_{R_50\%}$), współczynnik kształtu (k_R), pole pod krzywą przebiegu napięcia $U_R(t)$ w przedziale od 0 do $t_{R_50\%}$ ($P_{R_50\%}$) oraz stałą czasową zaniku napięcia powrotnego (τ_{R_MIN}).

4. Wyniki badań

W tabeli 1 przedstawiono parametry pomiaru oraz geometrię symulowanego układu izolacji. Analizie poddano ocenę wpływu dwóch czynników na przebiegi czasowe napięcia powrotnego, a mianowicie: zmianę przewodnictwa oleju izolacyjnego oraz zmianę przewodnictwa preszpanu. Dokonano tym samym podziału badań symulacyjnych na dwa etapy, których parametry zebrano w tabeli 2.

Tab. 1. Wartości parametrów dla wszystkich etapów symulacji układu izolacji papierowo-olejowej z wykorzystaniem schematu X-Y

Tab. 1. Parameter values for all simulation steps of the paper-oil insulation system with use of the X-Y diagram

Parametr	Wartość	Parametr	Wartość
U_C [V]	1000	R_a [m]	1,5
t_C [s]	1...100; (60)*	R_b [m]	2
t_Z [s]	0,5· t_C ; (1)*	$\epsilon_{r,olej}$	2,2
H [m]	2	$\epsilon_{r,preszpan}$	4,5

* wartości podane w nawiasach przyjęto podczas wyznaczania czasowych charakterystyk napięcia powrotnego $U_R(t)$
 U_C - napięcie ładowania, t_C - czas ładowania, t_Z - czas zwarcia, H - wysokość izolacji, R_a - promień zewnętrzny uzwojenia DN, R_b - promień wewnętrzny uzwojenia GN, $\epsilon_{r,olej}$ - przenikalność elektryczna względna oleju, $\epsilon_{r,preszpan}$ - przenikalność elektryczna względna preszpanu

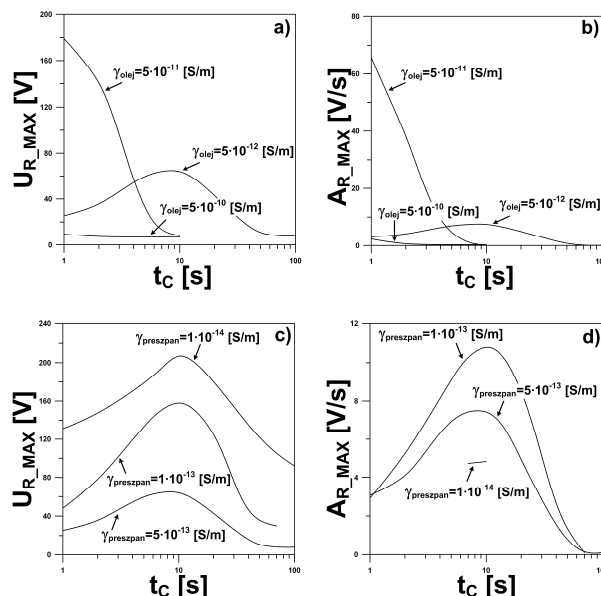
Rysunek 4 przedstawia wpływ przewodnictwa oleju (rys. 4a i b) oraz przewodnictwa preszpanu (rys. 4c i d) na kształt charakterystyk $U_{R_MAX}(t_C)$ i $A_{R_MAX}(t_C)$ w symulowanym układzie izolacyjnym. Wzrost przewodnictwa oleju wywołuje znaczne zmiany w przebiegach obu charakterystyk, istotnie przesuwając maksimum w stronę krótszych czasów ($t_{C_MAX} < 1$ s). Dominujący wpływ oleju w symulowanym systemie izolacji objawia się dla $\gamma_{olej} = 5 \cdot 10^{-11}$ S/m, natomiast dalszy wzrost jego przewodności powoduje wyraźne zmniejszenie zjawiska napięcia powrotnego, skutkiem szybszego zaniku składowej polaryzacji w skumulowanych przekładkach. Również zmiany przewodności preszpanu istotnie wpływają na kształt omawianych charakterystyk (rys. 4c i d). Tym razem jednak, wartość czasu ładowania wystąpienia maksimum nie zmienia się (t_{C_MAX}), natomiast wpływ przewodnictwa preszpanu objawia się zmianami maksymalnych wartości parametrów U_{R_MAX} i A_{R_MAX} . Należy zauważyć, że maksima omawianych charakterystyk mają odpowiednio wartości największe dla $U_{R_MAX}(t_C)$ i najmniejsze - dla $A_{R_MAX}(t_C)$, gdy wartość przewodności preszpanu jest najmniejsza ($\gamma_{preszpan} = 1 \cdot 10^{-14}$ S/m). Brak znacznej części charakterystyki $A_{R_MAX}(t_C)$ (rys. 4d, $\gamma_{preszpan} = 1 \cdot 10^{-14}$ S/m), wynikał z trudności ustalenia dla kilku czasów ładowania t_C dokładnej wartości parametru t_{R_MAX} .

Tab. 2. Wartości parametrów zmienianych dla kolejnych etapów symulacji układu izolacji papierowo-olejowej z wykorzystaniem schematu X-Y

Tab. 2. Parameter values changed for the successive simulation steps of the paper-oil insulation system with use of the X-Y diagram

Etap badań	γ_{olej} [S/m]	$\gamma_{preszpan}$ [S/m]	τ_1 [s]	τ_2 [s]	τ_3 [s]	X [-]	Y [-]
I	$5 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-13}$	1	10	100	0,3	0,2
	$5 \cdot 10^{-11}$						
	$5 \cdot 10^{-10}$						
II	$5 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-14}$	1	10	100	0,3	0,2
		$1 \cdot 10^{-13}$					
		$5 \cdot 10^{-13}$					

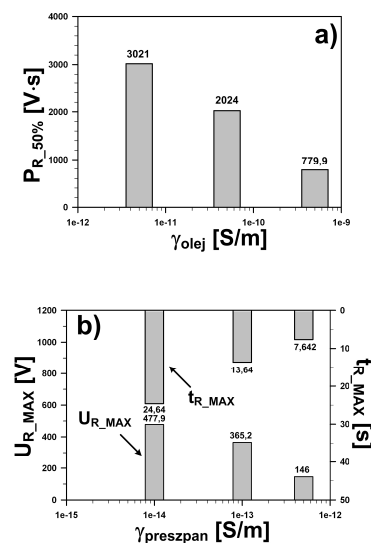
τ_1, τ_2, τ_3 - stałe czasowe odpowiednio dla krótkiego, średniego i długiego czasu relaksacji



Rys. 4. Wpływ przewodności oleju (a, b) i preszpanu (c, d) na kształt charakterystyk $U_{R_MAX}(t_C)$ i $A_{R_MAX}(t_C)$ uzyskanych w wyniku badań symulacyjnych z wykorzystaniem schematu zastępczego X-Y

Fig. 4. Influence of oil (a, b) and transformer board (c, d) conductivity on the shapes of characteristics $U_{R_MAX}(t_C)$ and $A_{R_MAX}(t_C)$ obtained from simulation investigations using the equivalent diagram X-Y

Ustalając czas ładowania $t_C = 60$ s oraz czas zwarcia $t_Z = 1$ s, postanowiono następnie dokonać analizy wpływu przewodnictwa oleju izolacyjnego oraz przewodnictwa preszpanu na parametry wyznaczone z charakterystyki czasowej $U_R(t)$. Rysunek 5 przedstawia wpływ przewodnictwa oleju oraz preszpanu na wybrane parametry napięcia powrotnego, które zmieniały się w sposób istotny oraz jednoznaczny.



Rys. 5. Wpływ przewodności oleju (a) i preszpanu (b) na wybrane parametry napięcia powrotnego uzyskane w wyniku badań symulacyjnych z wykorzystaniem schematu zastępczego X-Y

Fig. 5. Influence of oil (a) and transformer board (b) conductivity on the return voltage selected parameters obtained from simulation investigations using the equivalent diagram X-Y

W przypadku rosnącego przewodnictwa oleju izolacyjnego (rys. 5a), jedynie parametr $P_{R_50\%}$ wykazał stałą i istotną tendencję do zmiany, tzn. jego wartość malała. Wzrost przewodnictwa impregnowanego olejem preszpanu, wywołał natomiast stały spadek wartości już dwóch parametrów, a mianowicie U_{R_MAX} oraz t_{R_MAX} (rys. 5b).

5. Wnioski końcowe

Wyniki badań symulacyjnych dowodzą, że w analizie wyników diagnostyki stanu izolacji olejowych transformatorów energetycznych wykonywanej metodą napięcia powrotnego (RVM) należy uwzględniać również jakość oleju izolacyjnego. Zmiany przewodnictwa elektrycznego eksploatowanego oleju, powodowane wzrostem stopnia jego zawilgocenia, czy też wpływem produktów starzenia, wpływają bowiem na kształt charakterystyk zalecanych w diagnostyce RVM (przesuwanie maksimum ku krótszym czasom ładowania t_C wraz z rosnącym przewodnictwem oleju może sugerować np. wzrost stopnia zawilgocenia całego układu izolacyjnego). W przypadku parametrycznej metody analizy napięcia powrotnego [8] odnotowano, że wzrost przewodnictwa oleju wpływa w sposób jednoznaczny oraz niezwykle silny jedynie na parametr $P_{R,50\%}$ (rys. 5a).

Zmiany przewodnictwa preszpanu elektrotechnicznego (przy zachowaniu stałych wartości czasów relaksacji) wpływają jedynie na wartość maksimum charakterystyk zalecanych w diagnostyce RVM (nie ulegają zmianie odpowiadające im czasy ładowania t_C). W przypadku parametrycznej metody analizy napięcia powrotnego, wzrost przewodnictwa preszpanu wpływa w sposób jednoznaczny na dwa parametry: $U_{R,MAX}$ oraz $t_{R,MAX}$. Można zatem stwierdzić, że proces narastania napięcia powrotnego w znacznej mierze kształtuje wartość przewodnictwa zastosowanego w układzie preszpanu.

6. Literatura

- [1] Morais R. M., Engelstein E.: Thermal Ageing of Oil-Paper Insulation, IEEE 10th International Conference Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, Grenoble, France, 10-14 September 1990, p. 495-499.
- [2] Subocz J.(red.): Transformatory w eksploatacji, Wydawnictwo Energo-Complex, kwiecień 2007.
- [3] Saha T. K., Purkait P.: Understanding the Impacts of Moisture and Thermal Ageing on Transformer's Insulation by Dielectric Response and Molecular Weight Measurements, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 2, April 2008, p. 568-582.
- [4] Alff J., Houhanessian V., Zaengl W. S., Kachler A. J.: A Novel Compact Instrument for the Measurement and Evaluation of Relaxation Currents Conceived for On-Site Diagnosis of Electric Power Apparatus, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, USA, 2-5 April 2000, p. 161-167.
- [5] Csépes G., Hamos I., Brooks R., Karius V.: Practical Foundations of the RVM (Recovery Voltage Methods for Oil/Paper Insulation Diagnosis), IEEE Conference Electrical Insulation Dielectric Phenomena, vol. 2, 1998, p. 345-355.
- [6] Gafvert U., Frimpong G., Fuhr J.: Modeling of Dielectric Measurements on Power Transformers, International Conference on Large HV Electric Systems, CIGRE, Paris, France, no. 15-104, 1998.
- [7] Subocz J.: Eksploatacyjne pomiary PDC w izolacji transformatorów, Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje, v. 3, 1/2005, s. 261-264.
- [8] Wolny S., Zmarły D.: Wpływ temperatury i wilgotności na wybrane parametry napięcia powrotnego izolacji papierowo-olejowej, Energetyka, Zeszyt Tematyczny nr VI, kwiecień 2005, s. 59-61.
- [9] Wolny S.: Parameter changes of the return potential phenomenon in paper-oil insulation, II International Conference APTADM'2004, Wrocław, Poland, 15-17 September 2004, p. 252-256.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Studia Podyplomowe

Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej w Gliwicach, Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki ogłasza nabór na Dwusemestralne Zaoczne Studia Podyplomowe

Organizacja i Akredytacja Laboratoriów

Studia prowadzone są na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach, w systemie zaocznym w każdą sobotę lub w co drugi weekend (do wyboru) przez dwa semestry. Zajęcia prowadzone są przez nauczycieli akademickich ze stopniem co najmniej doktora oraz przez zaproszonych Gości o uznanym dorobku i autorytecie. Studia obejmują 200 godzin dydaktycznych. Rozpoczęcie Studiów nastąpi po skompletowaniu odpowiedniej liczby kandydatów na dany rodzaj studiów.

Organizator studiów:

Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, tel. 032 237 12 41, fax: 032 237 20 34, e-mail: re2@polsl.pl lub agnieszka.skorkowska@polsl.pl, <http://imeia.elekt.polsl.pl>

Kierownik studiów:

Prof. dr hab. inż. Tadeusz SKUBIS