



Marek ZENKER

Politechnika Szczecińska, Instytut Elektrotechniki

Modelowanie zjawisk relaksacyjnych w kanałach olejowych transformatorów mocy

Streszczenie. W artykule zaprezentowano pomiary zjawisk relaksacji w modelu kanałów olejowych transformatora. Pomiary wykonano w różnych temperaturach oraz dla różnego stopnia zawilgocenia oleju. Na podstawie analizy charakterystyk PDC i FDS stwierdzono występowanie dwóch różnych rodzajów zjawisk relaksacyjnych. Badania wykazały, iż ze wzrostem temperatury rośnie współczynnik strat dielektrycznych. Czas relaksacji powierzchni granicznych układu papier-olej zmienia się eksponencjalnie z temperaturą, a energia aktywacji tych zmian wynosi 0,18 eV.

Abstract. (Modelling of relaxation phenomena in oil gaps of power transformers). The paper presents measurements of relaxation phenomena in model of transformer oil gap. Measurements were conducted in various temperatures and for various moisture contents in oil. Basing on the analysis of PDC and FDS characteristics it was found, that there are two types of relaxation. Measurements showed, that value of dielectric losses coefficient increases with temperature increment. Relaxation time of paper-oil interface changes exponentially with temperature. Activation energy calculated for these changes is 0.18 eV.

Słowa kluczowe: PDC, FDS, model kanału olejowego, relaksacja

Keywords: PDC, FDS, oil gap model, relaxation

Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się znaczący rozwój metod diagnostycznych izolacji papierowo-olejowej transformatorów mocy opartych o dynamikę zmian relaksacyjnych. Należą do nich metody oparte o pomiar w dziedzinie czasu (PDC - Polarization Depolarization Current, RVM - Return Voltage Measurement) oraz częstotliwości (FDS - Frequency Domain Spectroscopy). Pozwalają one w dostatecznym stopniu oszacować zawilgocenie oraz określić poziom degradacji preszpanu. Znaczącym problemem jest dobór modelu odpowiadającego rzeczywistym układom warstw dielektrycznych występujących w transformatorach olejowych. Dobrym, a zarazem mocno uproszczonym, modelem układu izolacyjnego zalecanego przez CIGRE jest trzelementowy schemat blokowy (olej, preszpan, przekładki - rys.1a) oraz opowiadający mu zastępczy schemat elektryczny izolacji głównej transformatora (rys.1b) [1].

Rzeczywiste procesy zgromadzonego w oleju ładunku przestrzennego zależą od temperatury, wartości i częstotliwości napięcia polaryzacji, szerokości warstwy cieczy w polu elektrycznym, rodzajów jonów i polarnych molekuł oraz ich ruchliwości i koncentracji [2].

Dla założenia, że relaksacja oleju jest pomijalna otrzymuje się równoległy obwód elektryczny złożony z elementów skupionych R_D , C_D (rys. 1b), które można z dużym przybliżeniem wyznaczyć ze wzorów [3]:

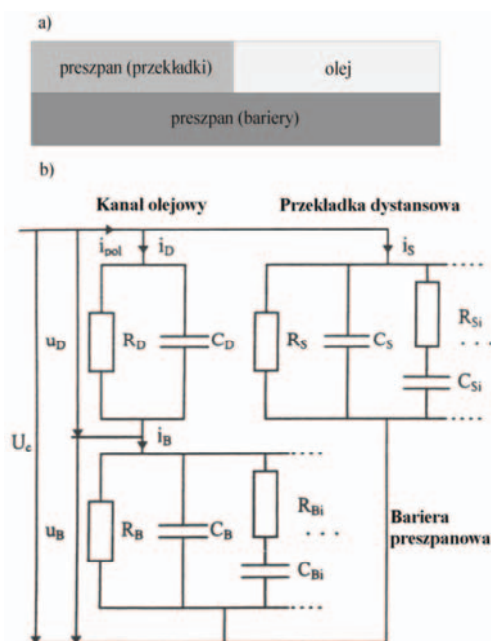
$$(1) \quad R_D \cong \frac{\varepsilon_0}{\sigma_r} \cdot C_{0D}, \quad C_D \cong \varepsilon_r \cdot C_{0D}$$

gdzie:

C_{0D} – geometryczna pojemność kanału, ε_0 , ε_r – przenikalność elektryczna próżni i oleju, σ_r – konduktywność oleju

Elektryczny model transformatora jest oparty o wiele szeregowo-równoległych obwodów RC odpowiednio ze sobą skonfigurowanych (rys. 1b). Taka budowa ma na celu jak najlepsze oddanie oddziaływania dipoli i ładunku zgromadzonego w preszpanie z zewnętrznym polem elektrycznym. W warunkach laboratoryjnych, gdzie jest możliwość kontrolowania temperatury czy wilgotności powietrza, a układ daje się zamodelować prostym obwodem zastępczym, uzyskane wyniki zblizają się do zależności wzorcowych. Dla obiektu rzeczywistego trudne jest wyznaczenie geometrii całego układu izolacyjnego i odpowiadającej jej pojemności kondensatora próżniowego C_0 , a dodatkowych problemów nastręcza utrzymanie niezmiennych w czasie warunków pomiaru. Dlatego praktyczne wykorzystanie metod PDC oraz FDS wymaga znajomości wzorcowych charakterystyk zjawisk polaryzacyjnych i przewodnictwa zachodzących w kanałach olejowych oraz w elementach stałych. Dopiero na tej podstawie można z dużą dokładnością diagnozować stan izolacji.

Aby uniknąć skomplikowanego analizowania udziału poszczególnych elementów (R_C , C_C , R_B , C_B , ...) do modelowania otrzymanych charakterystyk stosuje się uniwersalne prawa fizyczne opisujące dane metody. Przykładowo, dla metody PDC takim modelem może być prawo Jonschera (2) oraz model trzech eksponentów (4), dla FDS trójelementowa zależność Havriliaka-Nagamiego



Rys. 1. Blokowy (a) i elektryczny (b) model izolacji transformatora

(3), bądź też model Debey'a z wieloma stałymi czasowymi [3]. W rzeczywistych układach izolacyjnych należy też uwzględniać wartości przewodnictwa. Szczegółowe uzasadnienie modeli fizycznych podano w [4].

$$(2) \quad i_{dep}(t) = \frac{J_0}{(t/T_0)^m + (t/T_0)^n}$$

gdzie:

t – czas, J_0 , T_0 , m , n – stałe relaksacji

$$(3) \quad \varepsilon(\omega) = \sum_{k=3}^3 \left(\frac{\Delta\varepsilon_k}{(1 + (j\omega\tau_k)^{\alpha_k})^{\beta_k}} + \varepsilon_{\infty k} \right)$$

gdzie:

$\Delta\varepsilon$ – polaryzowalność, ε_{∞} – przenikalność optyczna, τ – czas relaksacji, α , β – stałe H-N

$$(4) \quad i(t) = \sum_{k=1}^3 A_k \cdot \exp\left(\frac{-t}{T_k}\right) + B \cdot t^{-N}$$

gdzie:

B , N – parametry relaksacji wg Curie-von Schweindlera, A_k – stałe relaksacji, T_k – czasy relaksacji

Obiekt i metodyka badań

W celu przeprowadzenia badań wpływu temperatury i stopnia zawilgocenia oleju na relaksację dielektryczną olejowego kanału transformatora, wykonano jego model, który składał się z ośmiu elektrod pomiarowych wykonanych z płyty laminatu epoksydowego z naniesioną warstwą miedzi o wymiarach 270mm x 280mm, przedzielonych warstwą oleju o grubości 8 mm. Na płytkach wytrawiono ekran, który miał za zadanie uniknąć zjawisk krawędziowych oraz prądów pasożytniczych. Na elektrody naniesiono papier transformatorowy o grubości 50 μm tak, aby odpowiadał nawiniętej izolacji zwojowej. Oszacowane zawilgocenie papieru w czasie pomiaru wynosiło około $w \approx 3\%$. Pomiędzy elektrodami umieszczono przekładki. Elektrody wraz z przekładkami zostały skręcone za pomocą izolacyjnych jarzm. Następnie cały model włożono do specjalnie przygotowanej kuwety, która była wypełniona olejem transformatorowym (rys. 2). Do badań wykorzystano nowy olej transformatorowy o zawilgoceniu < 5 ppm, a następnie zwiększano stopień jego zawilgocenia do poziomu 20 ppm oraz 35 ppm. Olej zawilgocono z użyciem wody destylowanej przy zastosowaniu wibratora ultradźwiękowego. Badany model izolacji transformatora umieszczony był w komorze klimatycznej. Dzięki temu można było uzyskać stabilną temperaturę modelu, odpowiednio 24°C, 35°C i 44°C, przy wilgotności względnej powietrza atmosferycznego mniejszej od 30%.

Pomiary FDS przeprowadzono w częstotliwościach $4 \cdot 10^{-4} \div 10^5$ Hz przy wartości maksymalnej napięcia równej 20 V. Istotnym problemem przy pomiarach PDC jest określenie wartości napięcia polaryzacji i czasu trwania procesu ładowania i rozładowania układu. Duże natężenia pola elektrycznego mogą powodować nieliniowe zjawiska relaksacyjne, które będą wprowadzać błąd w ocenie. Jednak zastosowanie ich w pomiarach eksploatacyjnych umożliwia dokładną rejestrację prądów i ogranicza wpływ zakłóceń zewnętrznych lub zakłóceń pochodzących od ewentualnych ładunków elektrostatycznych zgromadzonych w izolacji, czy też tzw. *efektu pamięci* w przypadku modelu kanału olejowego transformatora. W pomiarach zastosowano napięcie w postaci impulsu prostokątnego o czasie trwania 2h i wartości 20V. Do analizy przebiegów

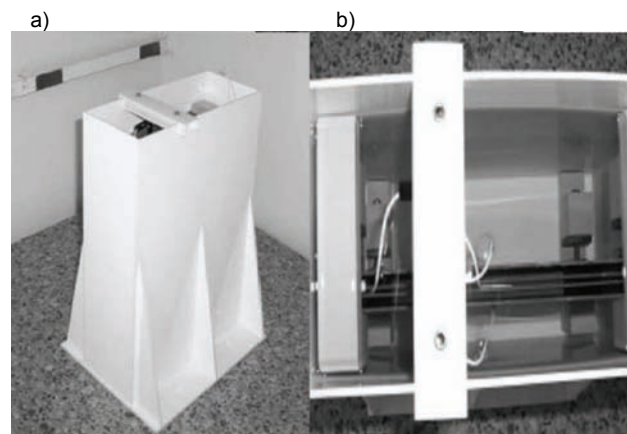
wykorzystano program Origin v.7.5 oraz Winfit firmy Novocontrol. Do analizy zastosowano funkcje opisane wzorami od (2) do (4).

Układ do pomiarów FDS składał się z:

- mostka Hewlett Packard RLC 4284 A,
- systemu typu "ULFAS"

Układ do pomiarów prądu polaryzacji i depolaryzacji składał się z:

- zasilacza ZWN-41,
- pikoamperomierza analogowego PA-11,
- rejestratora R16-4K.

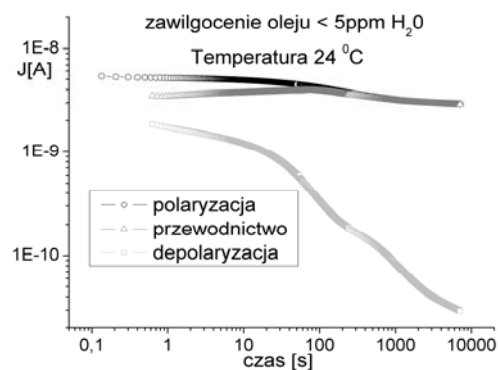


Rys. 2. Model kanału olejowego, (a) widok z boku, (b) widok z góry

Wyniki

Z pomiarów otrzymano szereg charakterystyk FDS i PDC modelu dla trzech różnych temperatur, odpowiednio 24°C, 35°C i 44°C i trzech różnych wartości zawilgocenia oleju (<5ppm, 20ppm, 30ppm) oraz wyliczono przewodnictwo oleju transformatorowego.

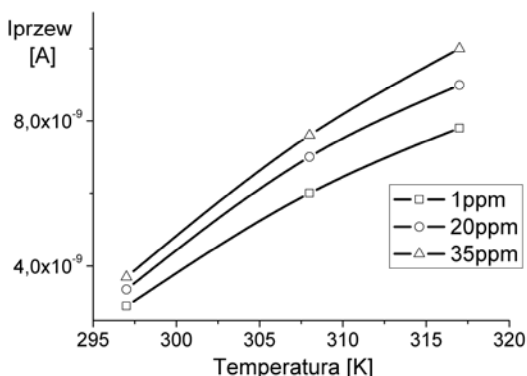
Przykładowy przebieg prądu polaryzacji, depolaryzacji oraz przewodnictwa został przedstawiony na rysunku 3. Wyznaczona wartość prądu przewodnictwa po około 8000 sekund polaryzacji dla temperatury 24 °C i zawilgocenia oleju <5 ppm wynosiła $i_R \approx 2,9$ nA.



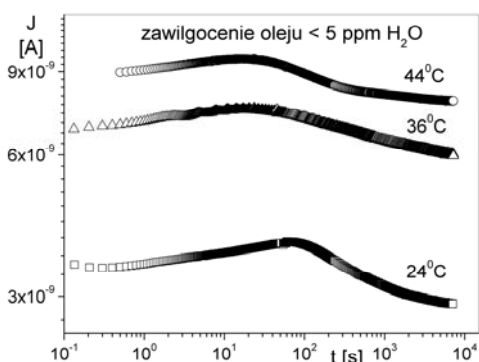
Rys. 3. Krzywe PDC

Zależności prądu przewodnictwa od temperatury dla różnego zawilgocenia oleju (rys. 4) wskazują, że był on spowodowany głównie przez wzrost ruchliwości nośników, co jest typowym zjawiskiem dla cieczy izolacyjnych. Pomiary prądu przewodzenia wykazały, że zmienia się on w czasie, przy czym występuje lokalne maksimum (rys. 5). Taki efekt nasuwa przypuszczenie, że istnieje obszar skumulowanego ładunku przestrzennego mogącego relaksować zarówno pod wpływem przyłożonego elektrycznego pola zewnętrznego, jak i lokalnego pola wewnętrznego. Aby ustalić charakter i zasięg występowania tego zjawiska oraz przyporządkować czasy, dla których

prąd osiąga wartości maksymalne do modeli procesów fizycznych odwołano się do praw związanych z ruchliwością jonów biorących udział w procesach relaksacyjnych.



Rys. 4. Prąd przewodzenia w funkcji temperatury dla różnych wartości zawilgocenia oleju



Rys. 5. Prąd przewodzenia dla oleju o zawilgoceniu papieru <5ppm w funkcji czasu dla różnych temperatur

Czas transportu (przejścia) nośników ładunku w cieczach izolacyjnych jest tożsamy z czasem, dla którego prąd przewodzenia osiąga maksimum lub z czasem relaksacji. Solwatacja tych nośników (jony małych rozmiarów) z molekułami oleju powoduje, że ruchliwość jest niezależna od ich fizycznej natury i polarności, te założenia prowadzą do wzoru (5) określającego głębokość wnikania jonów pod wpływem pola elektrycznego, bądź zasięg ich relaksacji [5]:

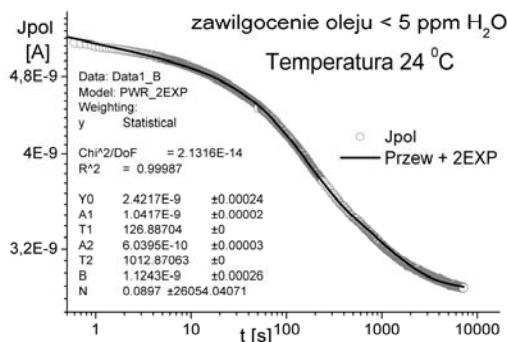
$$(5) \quad d = \sqrt{\frac{q}{6\pi\eta a} \cdot U \cdot \tau}$$

gdzie:

d – głębokość wnikania jonów lub zasięg relaksacji, q – ładunek, η – lepkość, a – promień jonu, U – napięcie, τ – czas relaksacji lub czas po którym $J=J_{max}$.

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe wyniki analizy krzywej prądu polaryzacji modelu kanału olejowego, której funkcje aproksymujące były dane zależnością (4). Podczas pomiaru stwierdzono, że w odpowiedzi prądowej występują dwie relaksacje: oleju oraz granicy faz papier-olej. Natomiast ładunki relaksacji przyelektrodowej były pomijalnie małe. W wyniku aproksymacji otrzymano dwie główne stałe czasowe. Dla temperatury 24 °C i zawilgocenia <5 ppm otrzymano stałe czasowe $\tau_1 = 126$ s oraz $\tau_2 = 1012$ s (rys.6). Podstawiając typowe wartości dla olejów transformatorowych, dla stałej czasowej $\tau_1 = 126$ s zasięg relaksacji wynosi $d_1 \approx 1,6$ mm oraz dla $\tau_2 = 1012$ s, $d_2 \approx 4,5$ mm. Zatem, wydaje się że ładunek przestrzenny ze

stałą czasową τ_1 dotyczy relaksacji granicy faz papier-olej, ponieważ zasięg dryftu jonowego dającego tą odpowiedź dielektryczną ograniczony jest do przypowierzchniowej strefy papieru. Wynik ten potwierdzają doświadczenia z modelowania charakterystyk PDC transformatorów, gdzie relaksacje o krótkich stałych czasowych zazwyczaj są związane z granicą faz papier-olej. Wartość d_2 dla stałej czasowej τ_2 określa charakter relaksacji oleju. Otrzymana wartość zasięgu około 4,5 mm jest rozsądna przyjmując, iż szerokość kanału olejowego wynosiła 8 mm.

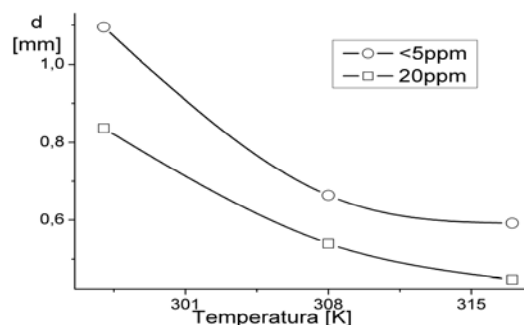


Rys. 6. Analiza prądu polaryzacji kanału olejowego

Relaksacje zachodzące w czasie depolaryzacji dotyczą tych samych zjawisk fizycznych, co w przypadku polaryzacji. Najistotniejszą różnicą jest wartość natężenia pola elektrycznego. W przypadku polaryzacji czynnikiem wymuszającym dryft ładunku jest zewnętrzne źródło, a podczas depolaryzacji głębokość wnikania ładunku jest określana przez znacznie słabsze i zanikające lokalne pole wewnętrzne. Badanie prądu depolaryzacji w taki sam sposób co badanie prądu polaryzacji daje te same wyniki, określające rodzaje relaksacji przy spodziewanym skróceniu czasów relaksacji.

Prezentowane charakterystyki PDC otrzymano za pomocą makroskopowego pomiaru prądowego w dziedzinie czasu. Efekty relaksacyjne w szerokim zakresie czasu nakładały się na wspólne przebiegi prądów polaryzacji i depolaryzacji. Efekt ten wymagał aproksymacji przebiegów PDC funkcjami sumarycznymi zawierającymi odpowiednie parametry relaksacji.

Na rysunku 7 przedstawiono zależność głębokości wnikania jonów od temperatury dla różnych wilgotności oleju, którą wyliczono z czasu występowania lokalnego maksimum prądu przewodzenia.

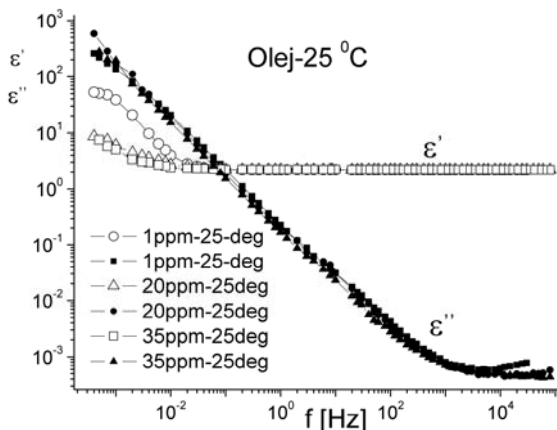


Rys. 7. Zakres relaksacji wyliczony z maksimum prądu przewodzenia dla różnych wartości zawilgocenia papieru

Na tej podstawie stwierdzono, że w zależności od zawartości wilgoci i temperatury obszar ładunku przestrzennego ograniczający prąd przewodnictwa jest skumulowany w bliskiej odległości od papieru (0,4÷1,1 mm). Zaobserwowano przy tym, że zasięg relaksacji dla oleju o większej wilgotności jest znacznie mniejszy. Dane te

prowadzą do wniosku, że ładunek skumulowany jest w bliskiej odległości od granicy faz olej-preszpan. Sposób bezpośredniego odczytu czasu, dla którego występuje maksimum prądu jest najdokładniejszą metodą określania rodzaju relaksacji na podstawie obliczeń zakresu relaksacji, dodatkowo potwierdzając słuszność stosowania poprzednich metod szacunkowych opartych o aproksymacje funkcjami relaksacyjnymi.

Badania FDS modelu kanału olejowego dostarczają wiele istotnych informacji. Można na ich podstawie określić wpływ temperatury na proces relaksacji powierzchni granicznej układu papier-olej, który powinien objawiać się między innymi zmianą pojemności. Z pomiarów tą metodą wynika też, że wraz ze wzrostem stopnia zawilgocenia oleju maleją zmiany rzeczywistej części przenikalności elektrycznej układu w zakresie niskich częstotliwości, natomiast nie obserwuje się większych zmian strat dielektrycznych (rys.8).



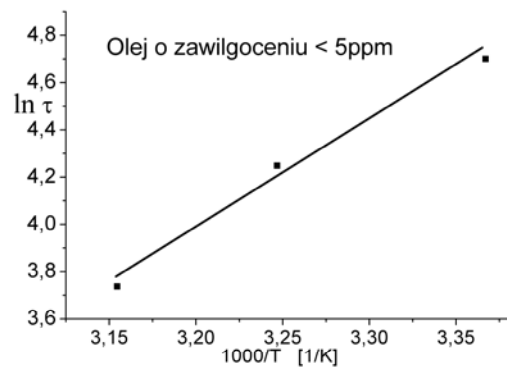
Rys. 8. Zależności rzeczywistej (ϵ') i urojonej (ϵ'') części przenikalności elektrycznej od częstotliwości dla różnych wartości zawilgocenia oleju

Z aproksymacji przebiegów FDS równaniem (3) wyznaczono wartości stałych czasowych w zależności od temperatury i zawilgocenia. Na tej podstawie stwierdzono, że czas relaksacji powierzchni granicznych układu papier-olej zmienia się eksponencjalnie z temperaturą. Temperaturowe zmiany stałej czasowej w układzie $\ln(\tau) = f(1000/T)$ (rys.9) można aproksymować funkcją liniową, a z parametrów prostej wyliczyć energię aktywacji korzystając ze wzoru [4]:

$$(6) \quad E = 1000 \cdot a \cdot k$$

gdzie: a - współczynnik nachylenia prostej, k - stała Boltzmanna

Tak wyliczona energia aktywacji dla oleju o zawartości wilgoci < 5ppm wynosiła 0,18 eV. Jest to wartość zbliżona do energii aktywacji ładunku przestrzennego w rzeczywistych transformatorach. Dane literaturowe [6] opisujące badania FDS transformatora 110/15 kV, 10MVA wyprodukowanego w 1971 roku określają temperaturową energię aktywacji relaksacji granicy faz na poziomie 0,22 eV. Zatem, można stwierdzić, że w tym względzie osiągnięto dużą zgodność badań modelowych z pomiarami eksploatacyjnymi transformatorów mocy.



Rys. 9. Zależność stałej czasowej relaksacji granicy faz olej-preszpan od odwrotności temperatury

Wnioski

Sposób przyporządkowania relaksacyjnych zjawisk fizycznych za pomocą obliczania zasięgu relaksacji na podstawie czasów relaksacji, choć jest metodą szacunkową staje się miarodajnym narzędziem analizy PDC.

Pomiary wykazały, że stosowany obecnie model elektryczny kanału olejowego zawierający jedno równoległe połączenie RC jest niewystarczający, gdyż występują dwie relaksacje: oleju i granicy faz papier-olej. Zamodelowanie ich przy pomocy jednej gałęzi RC jest fizycznie niemożliwe.

Zrealizowany model kanału olejowego w wystarczającej mierze odzwierciedla zjawiska relaksacyjne zachodzące w tej części transformatora.

Czas relaksacji powierzchni granicznych układu papier-olej zmienia się eksponencjalnie z temperaturą, co pozwala w prosty sposób oszacować energię aktywacji.

Otrzymane dane skłaniają ku przypuszczeniu, że w zależności od temperatury pomiaru i stopnia zawilgocenia oleju w obiekcie rzeczywistym (transformatorze) relaksacja kanałów olejowych może współwystępować z relaksacją granicy faz papier-olej, bądź też z relaksacją celulozy. W szczególnych przypadkach może wpływać to na ocenę stopnia zawilgocenia celulozy wyznaczonego metodami PDC, FDS, RVM.

LITERATURA

- [1] Leibfried T., Kachler A.J., Zaengl W.S., Der Houhanessian V., Kuchler A., Breitenbach B., Ageing and moisture analysis of power transformer insulation system, *CIGRE 39th Session*, 6 (2002), 12-101
- [2] Shayegani Akmal A., Borsi H., Gockenbach E., Wasserberg V., Mohseni H., Dielectric behavior of insulating liquids at very low frequency, *IEEE Trans. on Dielect. and Electr. Insul.*, 13 (2006), no.3, 532-537
- [3] Subocz J., Analiza charakterystyk PDC w izolacji transformatorów, *Energetyka*, 6 (2005), 32-35
- [4] Subocz J., Wybrane zagadnienia przewodnictwa i relaksacji dielektrycznej w aspekcie diagnostyki kompozytowej, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2003
- [5] Zenker M., Analiza relaksacji modelu kanału olejowego transformatora na podstawie pomiarów PDC, *Energetyka*, 11 (2007), 9-13
- [6] Subocz J., Wpływ temperatury na zjawiska relaksacyjne w izolacji transformatorów, *Energetyka*, 6 (2005), 35-38

Autor: mgr inż. Marek Zenker, Politechnika Szczecińska, Instytut Elektrotechniki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: zenekm@wp.pl;