



Eksploatacyjne pomiary PDC w izolacji transformatorów

Streszczenie. Charakterystyki PDC różnych transformatorów poddano analizie przy zastosowaniu dwóch modeli. Jeden uwzględniał uniwersalne prawo Jonschera, podstawą drugiego były uogólnione relaksacje dipolowe oraz zależność Curie-Schweindlera. Stwierdzono, że krzywe prądu depolaryzacji można z dużą dokładnością opisać za pomocą obu tych modeli. Wykazano, że istnieje korelacja między konduktywnością celulozy a wybranymi parametrami obu modeli. Parametry te mogą być podstawą oceny stanu izolacji papierowo-olejowej, w tym zawartości wilgoci.

Abstract. (Exploitation PDC measurements in power transformers insulation). The PDC characteristics of different power transformers were tested by application of two models. The first one included general dielectrics response law by Jonscher. The basis of the second one was the dipole relaxation law with Curie-Schweindler relationship. It showed, that the depolarization current characteristics can be described by those two models. The correlation between cellulose conductivity and some parameters of two models were obtained. This parameters then could be use as a basis for evaluation of moisture contents in paper-oil insulation.

Słowa kluczowe: PDC, izolacja papierowo-olejowa, wilgoć, diagnostyka
Keywords: PDC, paper-oil insulation, moisture, diagnosis

Wstęp

Do oceny stanu izolacji transformatorowej stosuje się – od wielu lat – pomiary rezystancji, wyznaczenie współczynnika absorpcji R_{60}/R_{15} oraz pomiary współczynnika strat dielektrycznych przy częstotliwości sieciowej (50 lub 60 Hz). Rzadziej wykonuje się pomiary pojemności między uzwojeniami z jednoczesnym wyznaczeniem ilorazu C_{2Hz}/C_{50Hz} . Przydatność tych pomiarów do diagnostyki izolacji została poddana ostatnio dużej krytyce. W zamian proponuje się szereg nowych metod, które generalnie polegają na pomiarze i analizie zjawisk relaksacyjnych w izolacji transformatorów w szerokim zakresie czasu lub częstotliwości. Pozwalają one m.in. w miarę dokładnie wyznaczyć ilość wody zgromadzonej w preszpanie czy też oszacować stopień jego degradacji. Ponieważ te dwa parametry praktycznie determinują czas życia transformatora, tym samym staje się możliwa predykcja rzeczywistego okresu jego eksploatacji.

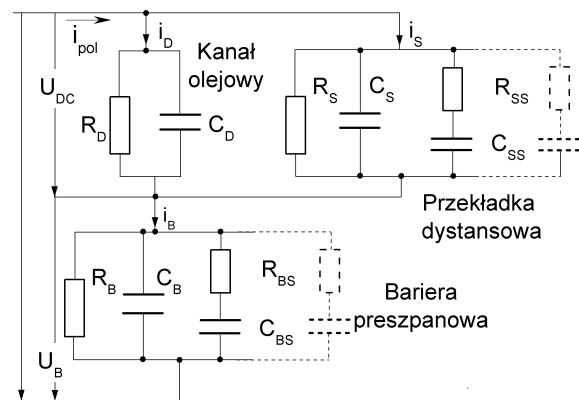
Metody diagnostyczne oparte na zmianach relaksacji w dziedzinie czasu wykorzystują pomiary napięcia powrotnego (metoda RVM) oraz prądów polaryzacji i depolaryzacji (metoda PDC), natomiast w dziedzinie częstotliwości wyznacza się wartości współczynnika strat $\tan \delta$ oraz pojemności układu w niskich częstotliwościach (metoda FDS).

W eksperckich systemach analizy zjawisk relaksacyjnych w izolacji transformatorowej, stosuje się zalecany przez CIGRE model, w którym upraszcza się rzeczywistą geometrię izolacji głównej i dzieli się ją na trzy części złożone ze skumulowanych kanałów olejowych, barier i przekładek [1]. Dzięki temu, izolację główną daje się przedstawić w postaci szeregowo-równoległych układów RC, które odpowiednio reprezentują schemat zastępczy kanału olejowego, przekładek oraz barier (rys.1).

Charakteryzując właściwości izolacji papierowo-olejowej na ogół przyjmuje się, że relaksacja dielektryczna oleju transformatorowego jest pomijalnie mała. Stąd, kanał olejowy modeluje się za pomocą skupionych elementów R_D i C_D , które można wyznaczyć ze wzorów:

$$(1) \quad R_D = \frac{\varepsilon_0}{\sigma_{olej} \cdot C_{0D}} \quad \text{oraz} \quad C_D = \varepsilon_{rolej} \cdot C_{0D}$$

gdzie: C_{0D} – geometryczna pojemność kanału, $\varepsilon_0, \varepsilon_{rolej}$ – przenikalność elektryczna próżni i oleju ($\varepsilon_{rolej} \approx 2,2$), σ_{olej} – konduktywność oleju.



Rys.1. Model elektryczny izolacji głównej transformatora

Schemat zastępczy impregnowanego olejem preszpanu jest bardziej złożony, a na jego parametry dielektryczne, oprócz temperatury, rodzaju celulozy czy też zawartości produktów procesu starzeniowego decydujący wpływ ma ilość zgromadzonej wilgoci oraz stopień degradacji celulozy. Procesy polaryzacyjne są w nim reprezentowane przez wiele równolegle połączonych gałęzi $R_{BS}C_{BS}$ oraz $R_{SS}C_{SS}$, które symulują zachowanie się poszczególnych drobin obdarzonych momentem dipolowym lub ładunkiem elektrycznym. W rezultacie prąd polaryzacji lub depolaryzacji można przedstawić w postaci „uniwersalnego” prawa dielektrycznej odpowiedzi Jonschera dotyczącego relaksacji dipolowej o szerokim rozkładzie stałych czasowych [1,2,3]. Uwzględniając udział ładunku przestrzennego zgromadzonego w kanałach olejowych na granicy olej-preszpan, zmiany prądu depolaryzacji izolacji transformatora w czasie daje się wyrazić w postaci:

$$(2) \quad i_{dep}(t) = A_1 \cdot \exp(-t/T_1) + \frac{J_0}{(t/T_0)^m + (t/T_0)^n}$$

gdzie: A_1, T_1 – parametry relaksacji ładunku przestrzennego, J_0, T_0, m, n – parametry relaksacji elementów stałych izolacji.

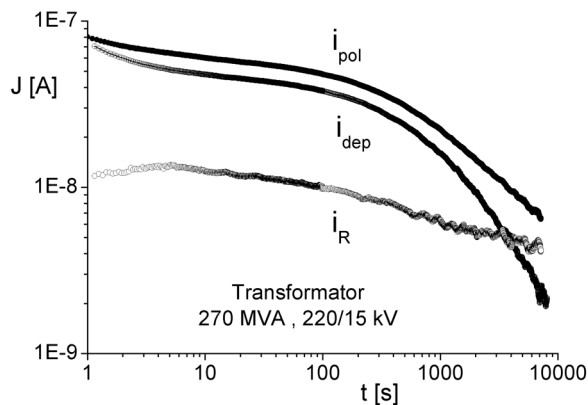
Prąd depolaryzacji można także modelować funkcją, która opisuje trzy dominujące relaksacje dipolowe w zakresie krótkiego, średniego i długiego czasu oraz proces rozładowania izolacji charakteryzujący się ciągłym rozkładem stałych czasowych [3]:

$$(3) \quad i_{dep}(t) = A \cdot t^{-N} + \sum_{k=1}^3 B_k \cdot \exp(-t/T_k)$$

gdzie: A , N – parametry prądu zaniku ciągłego, B_k , T_k – parametry relaksacji dipolowych

Obiekt i metodyka badań

Analizie poddano wykonane w warunkach polowych pomiary PDC w izolacji transformatorów o różnej mocy od 10 MVA do 270 MVA i napięciu od 110 kV do 400 kV oraz o różnym okresie eksploatacji od 5 do 32 lat. Także temperatura izolacji w momencie wyznaczania charakterystyk PDC była różna i wahała się w przedziale 17÷34 °C. W sumie analizowano dane z siedmiu jednostek, przy czym w trzech przypadkach PDC wyznaczono dwukrotnie w rocznym odstępie czasu.



Rys.2. Charakterystyki PDC dla transformatora 270 MVA, 220 kV

Szczególną cechą charakterystyk PDC jest to, że poszczególne jej fragmenty zdeterminowane są przez zjawiska relaksacyjne zachodzące w określonych elementach układu izolacyjnego. W ten sposób jest możliwe odróżnienie wpływu jakości oleju na krzywe PDC od wpływu wilgoci zgromadzonej w preszpanie. Na ogół przyjmuje się, że w pierwszych 100 sekundach o wartości prądu PD decyduje przede wszystkim przewodnictwo oleju izolacyjnego, na które wpływa zawartość wody, kwasowość, temperatura czy też stopień jego zanieczyszczenia. Stan elementów stałych układu izolacyjnego (bariery, przekładki) wpływa na kształt charakterystyki PDC dla czasu dłuższego od 1000 sekund. Zwiększony stopień degradacji preszpanu lub duża zawartość wody skutkuje wzrostem prądu polaryzacji w tym zakresie, przy czym konduktywność celulozy można obliczyć wprost z zależności [4]:

$$\sigma \cong \frac{\epsilon_0}{U_{pol} \cdot C_0} [i_{pol}(t_m) + i_{dep}(t_m)] \quad (4)$$

gdzie: U_{pol} – napięcie polaryzacji, C_0 – pojemność geometryczna uzwojeń, t_m – duże wartości czasu, dla których dokonano pomiaru prądu.

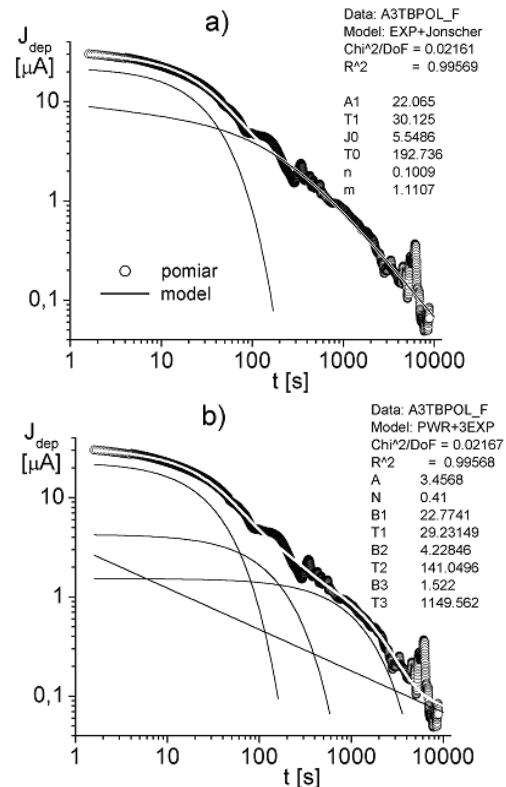
Przykładowy sposób wyznaczenia konduktywności celulozy w transformatorze 270 MVA, 220/15 kV pokazano na rysunku 2, gdzie prąd przewodnościowy po około 8000 s polaryzacji wynosił $I_R \approx 4,4$ nA. Po uwzględnieniu pozostałych czynników (U_{pol} , C_0 , ϵ_0), konduktywność celulozy oszacowano na $\sigma \approx 0,016$ pS/m.

Możliwość wyliczenia przewodnictwa preszpanu z krzywych PDC stwarza warunki do oceny jego wpływu na kinetykę procesów relaksacyjnych w rzeczywistej izolacji transformatorowej. Pod względem jakościowym procesy te opisuje zespół współczynników wyznaczonych z równania (2) lub (3). Przy ogólnym założeniu, że przewodnictwo celulozy jest funkcją stopnia jej zawilgocenia i degradacji,

wyznaczenie tego wpływu powinno stanowić pewną weryfikację badań modelowych i rozważań teoretycznych dotyczących oceny stanu izolacji transformatorowej.

Charakterystyki PDS w izolacji transformatorów

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wyniki analizy krzywej prądu depolaryzacji w izolacji transformatora 270 MVA, 400/15 kV wykonanej z zastosowaniem „uniwersalnego” prawa Jonschera (rys.3.a) oraz modelu z „uogólnionymi” relaksacjami dipolowymi (rys.3.b).



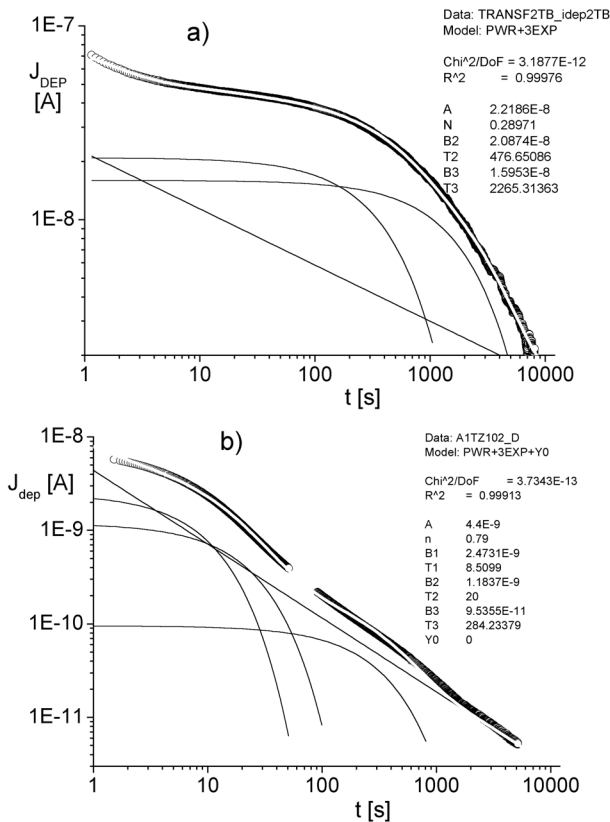
Rys.3. Analiza prądu depolaryzacji w izolacji transformatora 270 MVA 400/15 kV

Pokazują one, że za pomocą modeli zapisanych równaniami (2) i (3) z dużą dokładnością można odwzorować prąd depolaryzacji. Wspólnym ich elementem jest dipolowa relaksacja o stałej czasowej T_1 . W przypadku analizowanej na rysunku 3 izolacji wynosi ona $T_1 = 29 \div 30$ s. Porównawcze badania izolacji różnych transformatorów wykazały ponadto, że wartości T_1 są tożsame z wartościami „głównych stałych czasowych” otrzymanych z pomiarów RVM, oraz czasami relaksacji określonymi przez ekstremum $\tan \delta$ w metodzie FDS [5]. Można zatem przyjąć, że krzywe eksponencjalne o parametrach A , T_1 obrazują zanik ładunku przestrzennego zgromadzonego na granicy faz olej-preszpan [6,7]. Stąd, pozostałe parametry modeli charakteryzują dielektryczną odpowiedź elementów stałych układu izolacyjnego, tzn. w głównej mierze właściwości preszpanu.

Niektórzy autorzy analizując procesy relaksacyjne w izolacji papierowo-olejowej podają, że z początkowej wartości prądu polaryzacji lub depolaryzacji można oszacować rzeczywiste przewodnictwo oleju [2,4,8,9,10]. Szacowanie odbywa się poprzez wykorzystanie zależności (1) przy uwzględnieniu napięcia polaryzacji. Jednak, zdaniem autora, jest to możliwe tylko w przypadku, gdy spełnione są dwa warunki:

- konduktywność oleju nie jest zbyt mała (np. olej suchy i świeży),
- konduktywność celulozy nie jest nadmierna.

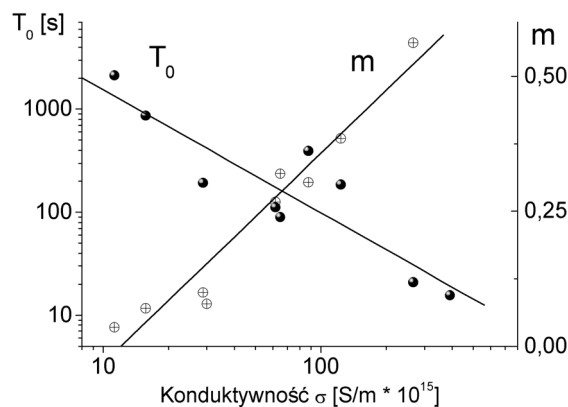
Oba te warunki sprowadzają się do zasady, że relaksacja ładunku na granicy faz powinna być dominującą polaryzacją szybkozmienną. W przypadku, gdy jak to pokazują analizy na rysunku 4, praktycznie całe spektrum polaryzacji określane jest przez właściwości barier i przekładek, wyznaczenie kondukcyjności oleju z pomiarów PDC wydaje się dyskusyjne.



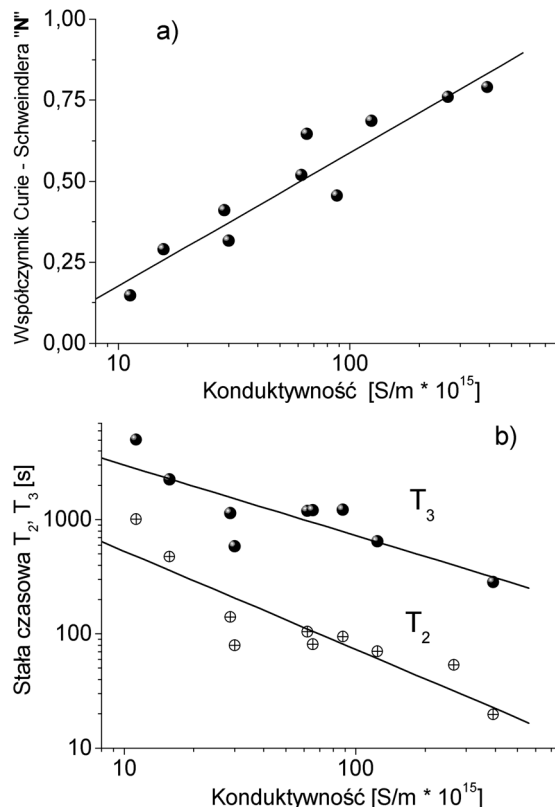
Rys.4. Analiza relaksacji dielektrycznej w izolacji transformatora o zawilgoceniu oleju ok. 5 ppm (a), oraz o kondukcyjności celulozy ok. 0,39 pS/m (b)

Z punktu widzenia diagnostyki izolacji ważnym zagadnieniem jest wpływ właściwości celulozy na pozostałe parametry procesów polaryzacyjnych. Problem ten jest bowiem niewątpliwie momentem oceny stanu izolacji za pomocą metod opartych na zjawiskach relaksacyjnych. Na rysunku 5 podano wpływ kondukcyjności celulozy zawartej w izolacji transformatorów na wartości parametrów T_0 oraz m obliczonych z równania (2), przy czym kondukcyjność tę, dla poszczególnych jednostek, wyznaczono zgodnie z wcześniej podaną procedurą. Wynika z niego, że w miarę wzrostu kondukcyjności maleje parametr T_0 , natomiast rośnie współczynnik m . Parametr T_0 interpretowany jest jako czas, po którym następuje zmiana mechanizmu polaryzacji lub depolaryzacji, zatem mniejsze jego wartości są rezultatem szybszych procesów relaksacji dipolowej w zakresie średnich czasów. Z kolei większe wartości m oznaczają, że układ izolacyjny nabiera cech charakterystycznych dla odpowiedzi dielektryka według prawa ułamkowej potęgi Curie–von Schweidlera, gdzie prąd depolaryzacji $I_{dep} \propto t^{-N}$. Potwierdzeniem tych spostrzeżeń jest kształt prądu depolaryzacji pokazany na rysunku 4b oraz zamieszczone na rysunku 6a zmiany wykładnika potęgowego N otrzymanego z analizy prądów depolaryzacji według równania (3). Warto przy tym zaznaczyć, że wartość $N=1$ w równaniu Curie–von Schweidlera dotyczy dielektryka, w którym w zasadzie nie występuje polaryzacja dipolowa, a procesy relaksacyjne związane są z mechanizmem transportu. Zjawisku temu towarzyszy przyspie-

szanie średnio i wolnozmiennych polaryzacji dipolowych (rys.6.b) oraz zmniejszanie się ich ładunku, który można obliczyć jako $Q_k = B_k \cdot T_k$. Warto przy tym zauważyć, że zależności pokazane na rysunkach 5 i 6 dowodzą, że dla większych wartości kondukcyjności celulozy istniejące w niej polaryzacje średniozmiennne mogą praktycznie relaksować się w tym samym czasie co ładunek na granicy faz. Sytuacja taka będzie miała miejsce zwłaszcza w przypadku, kiedy stopień zawilgocenia oleju nie jest nadmierny. Z drugiej strony, w przypadku, gdy olej ma bardzo dobre właściwości (tzw. olej suchy), brak wyraźnej relaksacji granicznej może powodować, że polaryzacja celulozy w zakresie średniego czasu będzie mylnie identyfikowana jako proces zaniku ładunku przestrzennego. Wydaje się, że te właśnie zjawiska mogą być jednym z źródeł niejednoznacznych interpretacji pomiarów RVM czy też metody FDS.



Rys.5. Wpływ kondukcyjności celulozy na parametry T_0 oraz m w modelu relaksacji izolacji transformatora według (2).

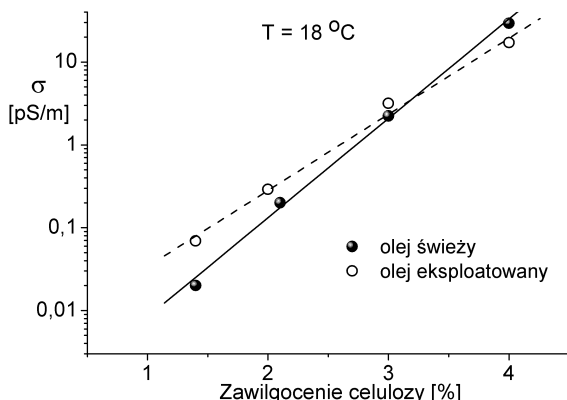


Rys.6. Wpływ kondukcyjności celulozy na parametr N (a) oraz stałe czasowe T_2, T_3 (b) w modelu relaksacji izolacji transformatora według zależności (3)

Przewodnictwo zawilgoconego preszpanu

W poprzednim rozdziale parametry relaksacji układu izolacyjnego transformatorów odniesiono wprost do przewodnictwa celulozy niezależnie od stopnia jej zawilgożenia czy też temperatury. Dlatego w oczywisty sposób staje konieczność określenia wartości przewodnictwa oraz stałych czasowych prądu depolaryzacji w celulozie o różnym stopniu zawilgożenia. Należy przy tym mieć na uwadze to, iż wartości te w impregnowanej olejem warstwie preszpanu powinny zależeć również od takich czynników jak temperatura, właściwości oleju, czy też stopień degradacji celulozy. Wydaje się jednak, że wpływ stopnia depolimeryzacji celulozy jest w tym przypadku stosunkowo mały, gdyż wyraża się głównie poprzez zwiększoną zawartość wody, która jest produktem starzenia. Większe oddziaływanie powinno być związane z temperaturą i przewodnictwem oleju, którym nasiąknięty jest preszpan. Ten ostatni czynnik jest o tyle ważny, iż fizyko-chemiczne parametry oleju pobranego z kadzi transformatora nie zawsze będą takie same jak oleju zawartego we wnętrzu preszpanu. Przeciwnie, należy oczekiwać, że są one z reguły inne, w tym również przewodnictwo.

Z tych powodów wykonano pomiary PDC w impregnowanym preszpanie o różnej zawartości wody. Do tego celu użyto płyt preszpanowych produkcji Weidmann o grubości 1,5-2,5 mm, które nasycono odpowiednią ilością wilgoci z powietrza oraz impregnowano dwoma rodzajami oleju. Pierwszym był świeży olej firmy Nynas o zawartości wilgoci 22 ppm, zaś drugim był eksploatowany olej, który po wirowaniu zawierał 17 ppm wody. Zmierzona w temperaturze 20 °C konduktywność obu olejów wynosiła odpowiednio 0,9 pS/m oraz 48 pS/m.



Rys.7. Wpływ zawilgożenia na przewodnictwo preszpanu impregnowanego olejem świeżym i eksploatowanym

Pokazane na rysunku 7 wyniki pomiarów dowodzą, że w tym przypadku przewodnictwo próbek preszpanowych zdeterminowane jest przede wszystkim przez stopień ich zawilgożenia. Natomiast wpływ rodzaju oleju jest widoczny dla preszpanu o małej zawartości wody.

Wnioski

1. Przedstawione metody analizy krzywych PDC pozwalają z dużą dokładnością odwzorować zjawiska polaryzacyjne w izolacji transformatorów. Otrzymane zależności potwierdzają wyniki badań próbek preszpanu dotyczące wpływu konduktywności na charakter procesów relaksacyjnych, zwłaszcza w odniesieniu do skracania czasu ich trwania w miarę wzrostu przewodnictwa. Wydaje się natomiast, że zaletą prezentowanych analiz PDC jest możliwość uzyskania pełniejszego obrazu zjawisk polaryzacyjnych

2. Wydaje się, że najbardziej przydatnymi parametrami do oceny stanu izolacji są współczynniki T_0 oraz m w modelu stosującym uniwersalne prawo odpowiedzi oraz N i T_2 w modelu z uogólnionymi relaksacjami dipolowymi. Ponieważ są to współczynniki jakościowe, stąd należy oczekiwać mniejszego wpływu geometrii uzwojeń na ich wartości.
3. Porównanie zawartych w pracy [4] wyników analizy PDC w zawilgożonych próbkach preszpanu z danymi uzyskanymi z eksploatacyjnych pomiarów izolacji transformatorowej prowadzi do wniosku, że natura procesów relaksacyjnych w rzeczywistej izolacji różni się nieco od zachowań w badaniach modelowych. W próbkach zawilgoconego preszpanu otrzymano bowiem bardziej zdecydowane zachowania dipolowe wyrażające się mniejszymi wartościami współczynnika m i większymi wartościami n przy zastosowaniu modelu z prawem uniwersalnym. Należy przypuszczać, że bardziej „rozmyte” relaksacje w rzeczywistej izolacji spowodowane są m.in. efektem pamięci, który wzmacnia zachowania typowe dla układów z rozłożonymi stałymi czasowymi oraz większym udziałem transportu ładunku w procesach relaksacyjnych. Możliwy jest również wpływ zgromadzonego w izolacji ładunku elektrostatycznego zarówno na sam proces depolaryzacji jak i na wartość mierzzonego prądu.
4. Otrzymano korelację między przewodnictwem impregnowanego preszpanu a ilością zgromadzonej w nim wody. Stwierdzono przy tym, że wpływ parametrów oleju użytego do impregnacji jest bardziej widoczny w próbkach słabo zawilgożonych.

LITERATURA

- [1] Gäfvert U., Frimpong G., Fuhr J., Modelling of Dielectric Measurements on Power Transformers, *CIGRE Session Paris 1998*, pp.15-103
- [2] Saha T.K., Review of Time-Domain Polarization Measurements for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.18, No 4, (2003), pp. 1293-1301
- [3] Subocz J.: Wybrane zagadnienia przewodnictwa i relaksacji dielektrycznej w aspekcie diagnostyki izolacji kompozytowej, *Prace Naukowe P.S.*, Monografia nr 580, Szczecin, (2003)
- [4] Yao Z.T., Saha T.K.: Analysis and Modeling of Dielectric Responses of Power Transformer Insulation, *PES Summer*, (2002)
- [5] Subocz J., Gielniak J., Ossowski M., Walczak K., Dielectric Response of Paper-Oil Insulation of Power Transformers, *Proc. Int. Conf. APTADM'04*, Wrocław, 2004
- [6] Koch M., Feser K., Reliability and influences on dielectric diagnostic methods to evaluate the ageing state of oil-paper insulations, *Proc. Int. Conf. APTADM'04*, Wrocław, 2004
- [7] Der Houhanessian V., Zaengl W.S., On-site diagnosis of power transformers by means of relaxation current measurement, *IEEE Symposium on Electrical Insulation*, Arlington, USA, (1998), pp.28-34
- [8] Hässig M., Bräunlich R., Gysi R., Alff J.J., Der Houhanessian V., Zaengl W.S., On-site Applications of Advanced Diagnosis Methods for Quality Assessment of Insulation of Power Transformers, *Proc. Int. Conf. CEIDP-2001*
- [9] Der Houhanessian V., Zaengl W.S., Time Domain Measurements of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems, *IEEE Symposium on Electrical Insulation*, Montreal, Canada, (1996), pp.47-51
- [10] Zaengl W.S., Applications of Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, *IEEE Electrical Insul. Magazine*, Vol.19, No 6, (2003), pp.9-22

Autor: dr hab. inż. Jan Subocz, Politechnika Szczecińska, Instytut Elektrotechniki, ul Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: jan.subocz@ps.pl