

Odpowiedź dielektryczna Nomexu impregnowanego estrem syntetycznym na podstawie pomiarów metodą PDC

Streszczenie. Artykuł dotyczy badań właściwości dielektrycznych nowoczesnych wysokonapięciowych izolacji stało-ciekłych. W publikacji tej zaprezentowano pomiary metodą PDC (Polarization Depolarization Current) impregnowanego estrem syntetycznym Midel 7131 papieru aramidowego Nomex typ 410. Analizę jakościową procesów relaksacyjnych przeprowadzono za pomocą zależności Jonschera LFD. Na podstawie czasów charakterystycznych T_k oszacowano energię aktywacji niezbędną do inicjacji procesu relaksacji długoczasowej.

Abstract. The article concerns the research of dielectric properties of modern high voltage insulation paper-oil. This publication presents the method of measurement PDC (Polarization Depolarization Current) impregnated aramid paper with a synthetic ester. The identification of the relaxation processes were performed using Jonscher LFD model. On the basis of the characteristic time T_k estimated activation energy LFD process. (Dielectric response of Nomex impregnated with synthetic ester based on measurements using PDC).

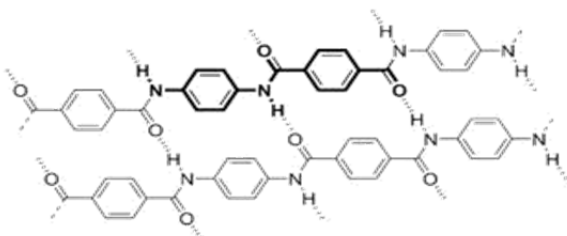
Słowa kluczowe: relaksacja dielektryczna, energia aktywacji, Nomex, ester, PDC.

Keywords: dielectric relaxation, activation energy, Nomex, ester, PDC.

Wstęp

W urządzeniach elektrycznych olej mineralny i papier celulozowy jako materiały izolacyjne, stosowane są od prawie stu lat. Powodem tego są bardzo dobre właściwości izolacyjne, w szczególności, gdy materiały te współpracują ze sobą. Wytrzymałość elektryczna papieru i oleju wynosi odpowiednio: 12 i 40 kV/mm, natomiast ten sam parametr dla układu papier-olej wynosi około 64 kV/mm. Izolacja papierowo-olejowa pomimo swoich zalet nie zawsze spełnia wymogi stawiane w dzisiejszych czasach układom izolacyjnym. W szczególnych przypadkach, m.in. z uwagi na niską wytrzymałość prespanu na narażenia termiczne, stosuje się konstrukcje kompozytowe, wykorzystujące tworzywa sztuczne o właściwościach elektrycznych zbliżonych do parametrów standardowej izolacji papierowej, ale o zwiększonej odporności cieplnej. Przykładem takiego tworzywa sztucznego jest Nomex.

Nomex wprowadzony został do sprzedaży w 1967 roku przez koncern chemiczny DuPont. Materiał ten należy do rodziny tworzyw sztucznych zwanych poliamidami. Włókna aramidów zwane są syntetycznym jedwabiem, a ich wytrzymałość, przy tej samej masie, przekracza pięciokrotnie wytrzymałość stali. Z uwagi na sztywną i pałeczkowatą budowę, makrocząsteczki aramidu łatwo ulegają krystalizacji, zarówno na etapie produkcji jak i obróbki [1]. Budowę chemiczną Nomexu przedstawiono na rysunku 1 [2].



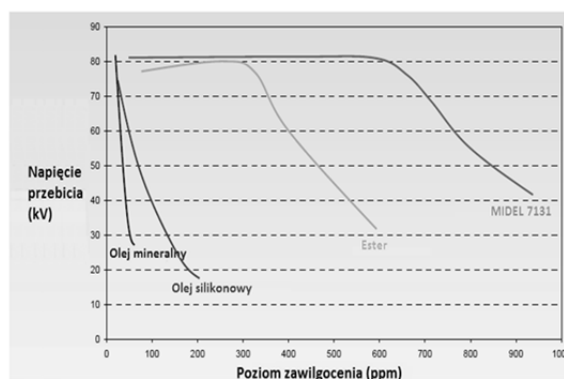
Rys.1. Wzór chemiczny materiału Nomex [2]

Papiery i prespany z Nomexu stosowane są od ponad 35 lat w transformatorach (suchych i olejowych), silnikach, generatorach, dławikach, także będących pod wpływem promieniowania beta i gamma, potwierdzając swoje możliwości i niezawodność w ekstremalnych warunkach. Nomex jest dopuszczony do stosowania w maszynach elektrycznych w stałych temperaturach roboczych dochodzących do 220 °C, przy prawie nie zmienionych

właściwościami elektrycznymi. Jest przystosowany do współpracy ze wszystkimi rodzajami płynów transformatorowych, smarów, płynów chłodzących, lakierów i odporny na kwasy oraz alkalia.

Natomiast oleje jako materiały izolacyjne stosowane są od początku rozwoju wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Spełniać mogą dwie funkcje: izolacji elektrycznej oraz chłodziwa, odprowadzając ciepło z elementów urządzenia. Podstawowymi olejami stosowanymi w układach izolacyjnych są oleje mineralne. Dodatkowe wymagania dotyczące m.in. bezpieczeństwa pożarowego, wysokiej temperatury pracy urządzeń, wytrzymałości elektrycznej, a także ciągle zastrzane normy środowiskowe sprawiły, że coraz większy procent wykorzystywanych płynów dielektrycznych to oleje syntetyczne. MIDEL 7131 jest syntetycznym olejem transformatorowym na bazie estru, przystosowany jest do większości typów i zastosowań transformatorów [2].

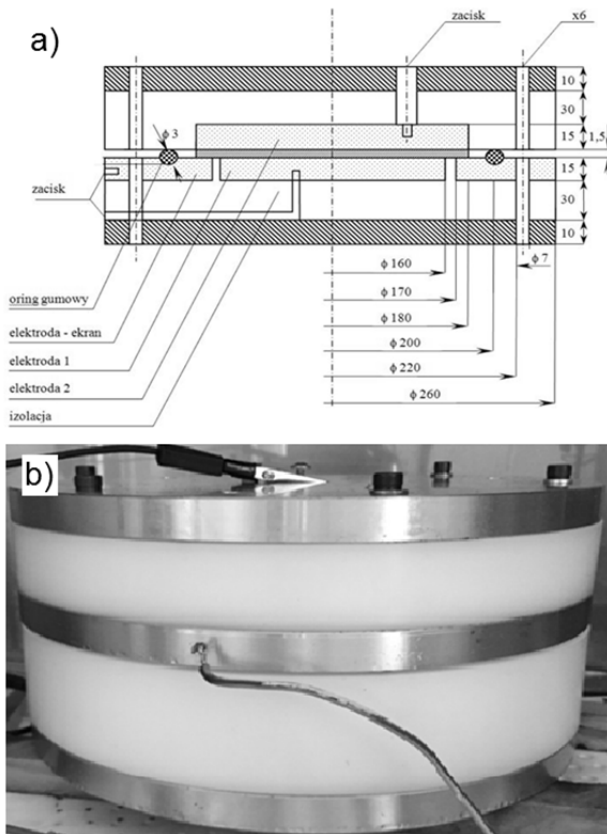
Kolejną ważną cechą oleju MIDEL 7131 jest stosunkowo wysoka rozpuszczalność wody. Oznacza to że może on wchłonąć większą ilość wody niż olej mineralny, czy silikonowy, bez pogorszenia właściwości dielektrycznych. Może on więc uwięzić więcej wody, co spowolni procesy starzeniowe w elementach papierowych izolacji, a także zmniejszy ryzyko skraplania się wody na jej powierzchni przy niskich temperaturach. Rysunek 2 przedstawia zależność napięcia przebicia od stopnia zawilgocenia dla różnych cieczy stosowanych jako płyny dielektryczne. Widać wyraźnie, że MIDEL 7131 wielokrotnie lepiej znosi zawilgocenie niż oleje mineralne i silikonowe [3].



Rys.2. Zależność napięcia przebicia od stopnia zawilgocenia dla oleju MIDEL 7131 [3]

Niniejsza publikacja dotyczy rozpoznania wpływu temperatury na parametry relaksacji dielektrycznej w stałym polu elektrycznym izolacji złożonej z Nomexu impregnowanego estrem syntetycznym. Zaprezentowano również prosty sposób szacowania energii aktywacji wolnozmennego procesu relaksacyjnego na podstawie wykresu Arrheniusa.

Obiekt

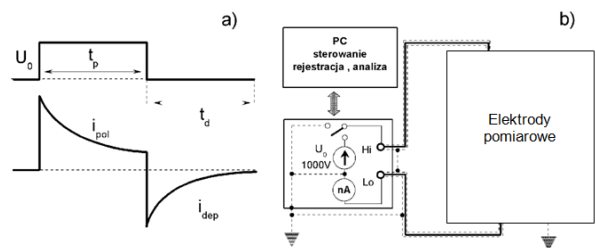


Rys.3. Elektrody pomiarowe: projekt (a), widok (b)

W celu przeprowadzenia badań wpływu temperatury na relaksację elektryczną impregnowanego estrem syntetycznym papieru aramidowego na podstawie pomiarów PDC (Polarization Depolarization Current) zbudowano stanowisko badawcze złożone z elektrod pomiarowych (rys.3), pomiędzy którymi włożono dwa arkusze kalandrowanego Nomexu typu 410 o grubości 0,76 mm. Żądane wartości zawilgocenia o wartości 3% uzyskiwano poprzez suszenie Nomexu w temperaturze 150 °C w komorze próżniowej a następnie poprzez zawilgacanie w komorze klimatycznej Feutron KPK 400, przy względnej wilgotności powietrza 90% w temperaturze 60 °C. Wartość zawilgocenia ustalano na podstawie pomiaru zmiany masy. Następnie papier aramidowy impregnowano estrem syntetycznym MIDEL 7131 o zawilgoceniu 40 ppm. Tak przygotowane próbki wkładano do trójelektrodowego układu pomiarowego i całość umieszczano w komorze termicznej. Pomiary wykonano w zakresie temperatury (0÷100) °C.

Metodyka

Zastosowana metoda pomiaru PDC polegała na podaniu do układu napięcia o wartości 1000V w czasie trwania pomiaru $t_p = 2h$ oraz pomiarze prądu polaryzacji i_{pol} i depolaryzacji i_{dep} . Pomiary prądu polaryzacji dokonywano przez okres t_p , po którym zwierano układ i następowała rejestracja prądu depolaryzacji przez okres $t_d = 2h$ (rys. 4).



Rys. 4. Zasada pomiaru (a) oraz schemat połączeń (b) w metodzie PDC

Do wykonania pomiarów użyto elektrometru Keithley 6517A z wbudowanym źródłem napięcia (0÷1000V). Do wyznaczenia podstawowych parametrów funkcji relaksacyjnych z prądów polaryzacji zastosowano równanie Jonschera LFD w postaci [4]:

$$(1) \quad i(t) \propto A_1 \cdot t^{-n_1} + A_2 \cdot t^{-n_2}$$

gdzie: t – czas, A_1, A_2, n_1, n_2 – parametry relaksacji

Do modelowania prądów depolaryzacji wykorzystano sumaryczne równanie zawierające model Debye'a i Jonschera w postaci [4]:

$$(2) \quad i(t) = A \cdot \exp\left(\frac{-t}{T_0}\right) + \frac{J_0}{\left(\frac{t}{T_k}\right)^m + \left(\frac{t}{T_k}\right)^n}$$

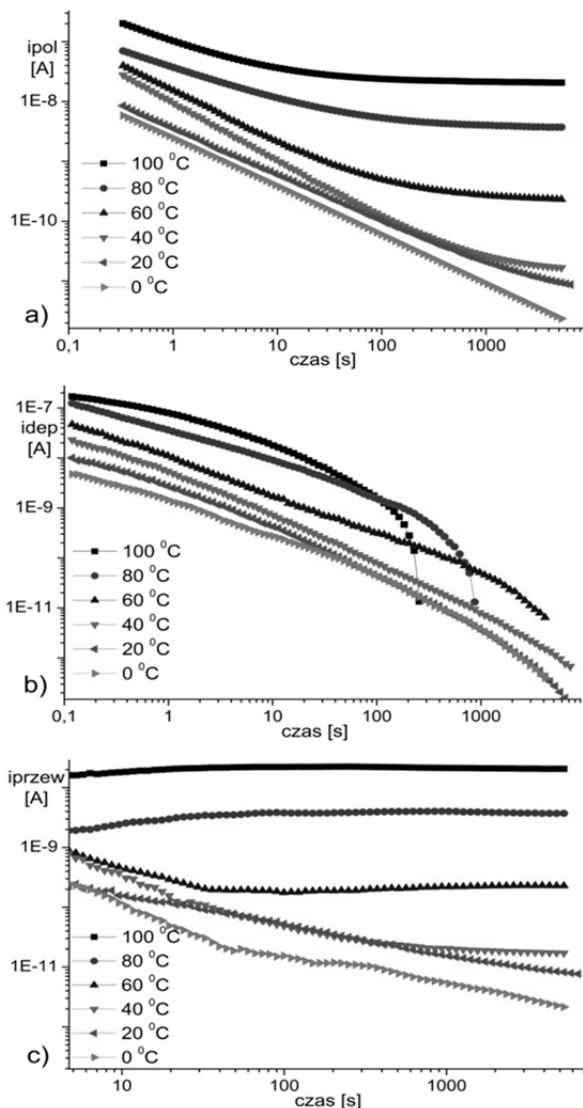
gdzie: A – stała z modelu Debye'a, T_1 – stała czasowa, J_0, m, n – parametry relaksacji z modelu Jonschera, T_k – czas charakterystyczny

Wyniki

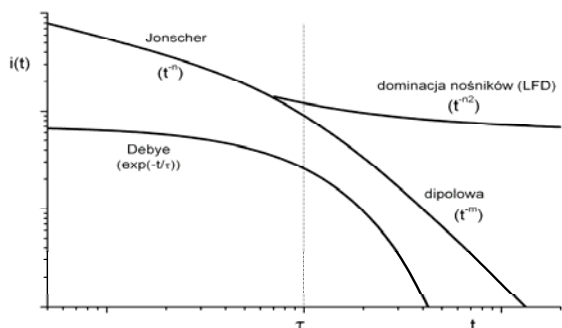
Z pomiarów otrzymano szereg charakterystyk PDC Nomexu typ 410 impregnowanego estrem syntetycznym Midel 7131 (rys.5). Wynika z nich, że wzrost temperatury powoduje wzrost wartości prądu polaryzacji i przewodnictwa w całym zakresie rejestrowanego czasu (rys.5a,c). Podobny efekt występuje dla prądów depolaryzacji z wyjątkiem temperatury 80 °C i 100 °C, gdzie odpowiednio po czasie około 500s i 100s prąd ten gwałtownie zanika (rys.5b). Najprawdopodobniej jest to związane ze zmianą lepkości cieczy i wzrostem ruchliwości jonów przy najwyższych rejestrowanych temperaturach. W takich warunkach ładunek zgromadzony w próbkach impregnowanego Nomexu stosunkowo szybko się rozładowuje.

Na rysunku 5c przedstawiono różnicę prądu polaryzacji i depolaryzacji interpretowaną jako prąd przewodnictwa. Kształt charakterystyk prądu przewodnictwa wskazuje, że tylko w najwyższych badanych temperaturach przewodnictwo badanej izolacji jest względnie stałe lub stosunkowo szybko ustala się na niezmiennym poziomie. Natomiast dla temperatury 40 °C i poniżej prąd przewodnictwa cały czas maleje, a jego wartości zmieniają się nawet o jeden rząd wielkości. Autor przyjmuje, że efekty te mają miejsce w badanym układzie izolacyjnym, gdyż następuje zmiana mechanizmu relaksacji wynikająca prawdopodobnie z narastającym w wyższej temperaturze procesem stałoprądowej dyspersji zgromadzonej w Nomexie wody. Natomiast w pracy [4] te same procesy zostały przypisane zmianie charakteru relaksacji z typu dipolowego na dominację nośników LFD (rys. 6). Szerzej podobne zagadnienie omawia m.in. Szrot w rozprawie doktorskiej [5], gdzie taki mechanizm przewodnictwa prądowego jest powiązany z transportem masy jonowej na

odległości makroskopowe, który powoduje rozdzielanie ładunku w objętości dielektryka i zgromadzenie go w określonych miejscach. Jedną z konsekwencji tego procesu jest powstanie nieskompensowanego ładunku przestrzennego w pobliżu elektrod pomiarowych. Podobny efekt omówiono w pracy [6].



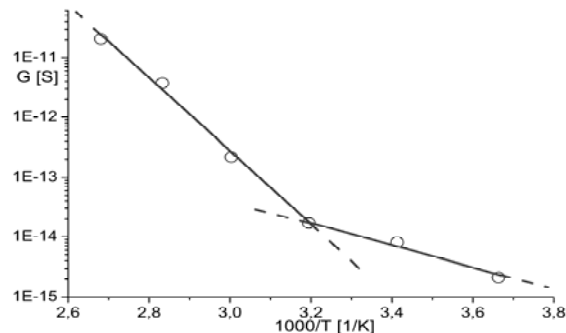
Rys.5. Charakterystyki PDC dla różnej temperatury. Prąd polaryzacji (a), prąd depolaryzacji (b), prąd przewodnictwa (c)



Rys.6. Modele relaksacji w dziedzinie czasu [4]

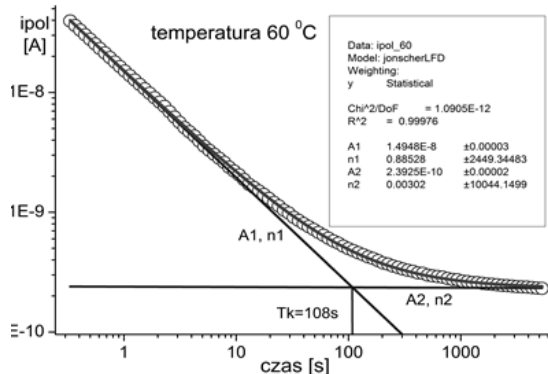
Na rysunku 7 pokazano zmiany konduktywności od odwrotności temperatury impregnowanego Nomexu. W badanym przedziale temperatury jej zmiany były stosunkowo wysokie – wynosiły aż cztery rzędy wielkości. Charakter tych zmian wskazuje na istnienie dwóch różnych

procesów elektrycznych związanych z przewodnictwem badanego układu dielektrycznego, obrazowo przedstawionych na rysunku 7, jako dwie proste przecinające się w temperaturze około 40 °C. Pierwsza z nich (powyżej 40 °C) najprawdopodobniej jest związana z procesem odpowiedzialnym za transport masy jonowej na odległości makroskopowe. Jednak rozpoznanie tych zjawisk wymaga dalszych badań w znacznie szerszym spektrum temperatury.



Rys.7. Wpływ temperatury na konduktancję próbek impregnowanego estrem syntetycznym Nomexu

Analizę jakościową odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie czasu impregnowanego estrem syntetycznym Nomexu o zawilgoceniu 3% w różnej temperaturze dla prądów polaryzacji przeprowadzono przy zastosowaniu zależności Jonschera LFD (1). Przykładową analizę dla impregnowanej próbki Nomexu pokazano na rysunku 8.



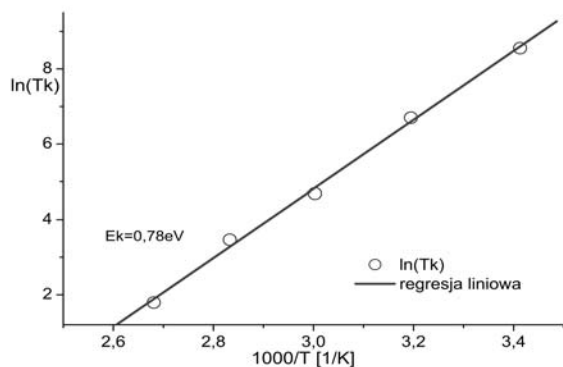
Rys.8. Analiza procesu relaksacji w dziedzinie czasu Nomexu impregnowanego estrem syntetycznym na podstawie prądu polaryzacji

Przeprowadzona analiza pozwoliła wyznaczyć parametr τ_k dla różnej temperatury badanego kompozytu. Interpretacja fizyczna parametru τ_k podana w literaturze [4] utożsamia go z czasem charakterystycznym po którym następuje zmiana charakteru procesu relaksacyjnego. W zakresie badanej temperatury parametr ten zmienia swoją wartość o kilka rzędów, z kilku tysięcy sekund dla temperatury 20 °C do zaledwie 6 sek. przy temperaturze 100 °C. Autor zaprezentował te zmiany w układzie Arrheniusa (rys.9), a dzięki ich liniowemu charakterowi w prosty sposób oszacował energię aktywacji ze wzoru:

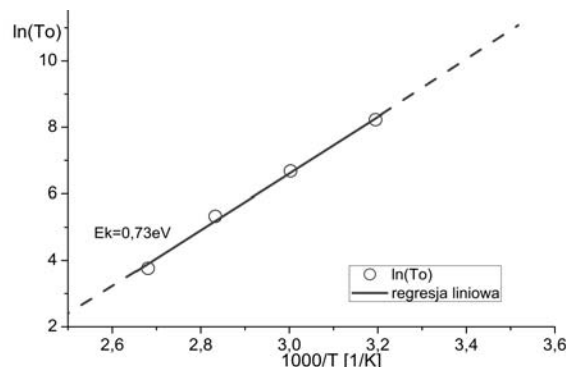
$$(3) \quad E_k = 1000 \cdot \alpha \cdot k$$

gdzie: α - współczynnik kierunkowy prostej, k – stała Boltzmann

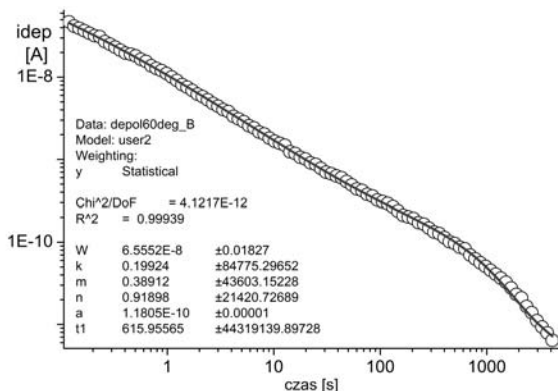
Wartość tak obliczonej energii aktywacji wynosi $E_a = 0,78 \text{ eV}$. Jest to minimalna porcja energii pola elektrycznego aby zainicjować długoczasowy proces relaksacyjny.



Rys.9. Wykres Arrheniusa dla czasu charakterystycznego T_k wyznaczonego z prądu polaryzacji



Rys.11. Wykres Arrheniusa dla czasu charakterystycznego T_o wyznaczonego z prądu depolaryzacji



Rys.10. Analiza procesu relaksacji w dziedzinie czasu Nomexu impregnowanego estrem syntetycznym na podstawie prądu depolaryzacji

Analiza prądów depolaryzacji została przeprowadzona za pomocą równania (2). W praktyce diagnostycznej izolacji „stało-ciekłej” prąd depolaryzacji można analizować sumą równań odpowiadających za poszczególne relaksacje. W pracach [7, 8] podano modele o szerokim rozkładzie stałych czasowych łączące ze sobą teorię Debye’a (rys.6) z empirycznymi zależnościami Jonschera (1). Autor zdecydował się na uwzględnienie klasycznego modelu Debye’a ze względu na kształt charakterystyk prądu depolaryzacji w najwyższych temperaturach. Na rysunku 10 przedstawiono przykładową analizę prądu depolaryzacji dla temperatury 60 °C równaniem (2). Jednak dla temperatury poniżej 40 °C najprawdopodobniej stała czasowa procesu Debye’a znacząco się wydłuża i znacznie przekracza czas rejestrowanego prądu wynoszącego 7200 s. Wyniki analizy prądu depolaryzacji pokazano w układzie Arrheniusa (rys.11). Oszacowano energię aktywacji wolnozmiennego procesu relaksacyjnego na podstawie zależności (3), która wyniosła $E_k = 0,73$ eV.

Różnice w obliczonej wartości energii aktywacji z prądów polaryzacji i depolaryzacji najprawdopodobniej wynikają z faktu, że przy depolaryzacji istnieje jedynie wewnętrzne pole elektryczne pochodzące od uporządkowanego ładunku o charakterze dipolowym związanym najprawdopodobniej z cząsteczkami wody. Obliczone wartości energii aktywacji są stosunkowo wysokie w porównaniu do klasycznej izolacji papierowo – olejowej, gdzie wartość ta wynosi $0,3 \div 0,45$ eV [9,10]. Świadczy to o zupełnie innym mechanizmie gromadzenia wody w Nomexie niż w przypadku izolacji celulozowo – olejowej, gdzie woda występuje w postaci nanokropel związanych z celulozą wiązaniami Van der Waalsa, a przewodnictwo związane jest z „hoopingiem” jonów pomiędzy tymi kroplami.

Wnioski

Badania PDC wykazały istnienie kilku procesów dielektrycznych w badanej izolacji. Najprawdopodobniej są one związane z obecnością cząsteczek wody pomiędzy włóknami papieru aramidowego.

W wyniku ładowania izolacji, po przekroczeniu czasu charakterystycznego dochodzi do dominacji nośników LFD i transportu masy jonowej na odległości makroskopowe w badanej izolacji, najprawdopodobniej powoduje to powstanie nieskompensowanego ładunku przestrzennego relaksującego pod wpływem pola elektrycznego.

Analiza prądów depolaryzacji wykazała istnienie wolnozmiennego relaksacji, którą można aproksymować modelem Debye’a. Stała czasowa tego procesu znacząco się wydłuża podczas zmniejszania temperatury.

Przeprowadzona analiza za pomocą modeli (1) i (2) charakterystyk PDC pozwoliła w stosunkowo łatwy sposób oszacować energię aktywacji wolnozmiennych procesów relaksacyjnych na podstawie równania (3). Było to możliwe dzięki liniowemu charakterowi tych zmian w układzie Arrheniusa.

Autor: dr inż. Marek Zenker, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: marek.zenker@zut.edu.pl

LITERATURA

- [1] <http://www2.dupont.com>, stan na dzień 10 maja 2016
- [2] Jain A., Vijayan K., Effect of penetrants on the aramid Nomex, Bulletin of Materials Science, 23 (2000), No. 3, 211–214
- [3] <http://www.midel.com> stan na dzień 5 maja 2016
- [4] Jonscher A., The Universal Dielectric Response and Its Physical Significance, IEEE Trans. El. Insulation, 27 (1992), No 3, 407-423
- [5] Szrot M., Ocena zawilgocenia transformatorów energetycznych z niejednorodną lub zestarzoną izolacją papierowo-olejową, rozprawa doktorska, Szczecin 2010
- [6] Subocz J., Zenker M., Wpływ zawilgocenia na relaksację dielektryczną impregnowanego olejem mineralnym Nomexu na podstawie pomiarów PDC, Pomiary Automatyka Kontrola, 2 (2013), Vol. 59, 133-136
- [7] Saha T., Review of Time-Domain Polarization Measurements for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers, IEEE Trans. Power Delivery, 4 (2003), Vol. 18, 1293-1301
- [8] Subocz J., Eksploatacyjne pomiary PDC w izolacji transformatorów, Przegląd Elektrotechniczny, 1(2005), 261-264
- [9] Zenker M., Analiza relaksacji modelu kanału olejowego transformatora na podstawie pomiarów PDC, Energetyka, 11 (2007), 9-13
- [10] Zenker M., Zasięg relaksacji w modelu kanałów olejowych transformatorów energetycznych na podstawie pomiarów FDS, Przegląd Elektrotechniczny, 11b (2010), 300-303