

Odpowiedź dielektryczna papieru aramidowego impregnowanego estrem syntetycznym

Streszczenie. Niniejsza publikacja zawiera badania odpowiedzi dielektrycznej papieru aramidowego (Nomex) impregnowanego estrem syntetycznym (Midel 7131) w różnej temperaturze i zawilgoceniu. Procesy relaksacyjne badano metodami FDS (Frequency Domain Spectroscopy) oraz PDC (Polarization Depolarization Current). Do wykonania pomiarów użyto systemu DIRANA OMICRON oraz miernika Keithley 6517A. Do prezentacji i analizy wyników pomiarów wykorzystano program Origin v.8.0 oraz WinFit firmy Novocontrol. Do wyznaczenia podstawowych parametrów funkcji relaksacyjnych zastosowano uogólnione równanie Havriliaka-Negami oraz zależność Jonschera LFD.

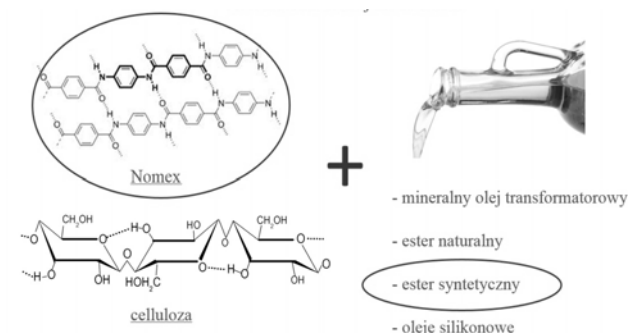
Abstract. This publication deals with the recognition of the influence of temperature and moisture on dielectric relaxation parameters of insulation based on aramid paper impregnated with synthetic ester (Midel 7131). Relaxation processes were investigated by FDS (Frequency Domain Spectroscopy) and PDC (Polarization Depolarization Current). DIRANA OMICRON and Keithley 6517A system was used for the measurements, while Origin v.8.0 and Novocontrol WinFit were used to analyze measurement results. The generalized Havriliak-Negami and Jonscher LFD equation was used to determine the relaxation functions. **(Dielectric response of aramid paper impregnated with synthetic ester).**

Słowa kluczowe: relaksacja dielektryczna, papier aramidowy, ester syntetyczny, FDS, PDC.

Keywords: dielectric relaxation, aramid paper, synthetic ester, FDS, PDC

Wstęp

W transformatorach izolację stało-ciekłą stosuje się od ponad wieku, gdyż połączenie papieru i oleju znacząco podnosi parametr wytrzymałości elektrycznej w porównaniu do materiałów składowych. Jednak znaczącym problemem staje się stosunkowo niska wytrzymałość termiczna izolacji celulozowej. Dlatego coraz częściej stosuje się nowoczesne konstrukcje kompozytowe (rys1.). Przykładem takiego tworzywa sztucznego jest Nomex impregnowany estrem syntetycznym. Nomex wprowadzony został do sprzedaży w 1967 roku przez koncern chemiczny DuPont. Materiał ten należy do rodziny tworzyw sztucznych zwanych poliamidami [1]. Natomiast oleje jako materiały izolacyjne stosowane są od początku rozwoju wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Spełniać mogą dwie funkcje: izolacji elektrycznej oraz chłodziwa. Dodatkowe wymagania dotyczące m.in. bezpieczeństwa pożarowego, wysokiej temperatury pracy urządzeń, wytrzymałości elektrycznej, a także ciągle zaostrzane normy środowiskowe sprawiły, że coraz większy procent wykorzystywanych płynów dielektrycznych to oleje syntetyczne. MIDELE 7131 jest syntetycznym olejem transformatorowym na bazie estru, przystosowany do większości typów i zastosowań transformatorów [2].

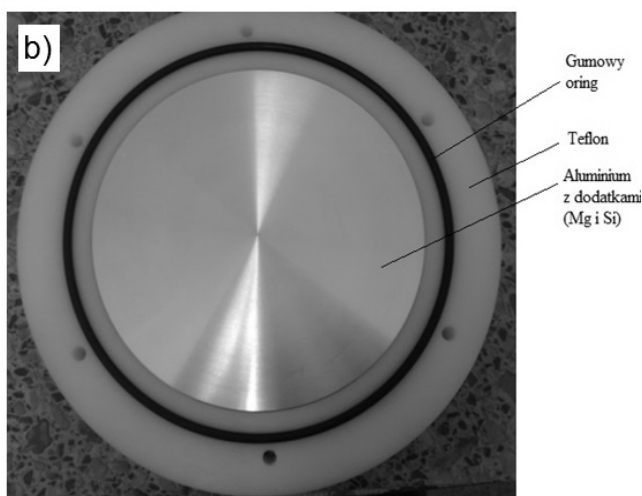
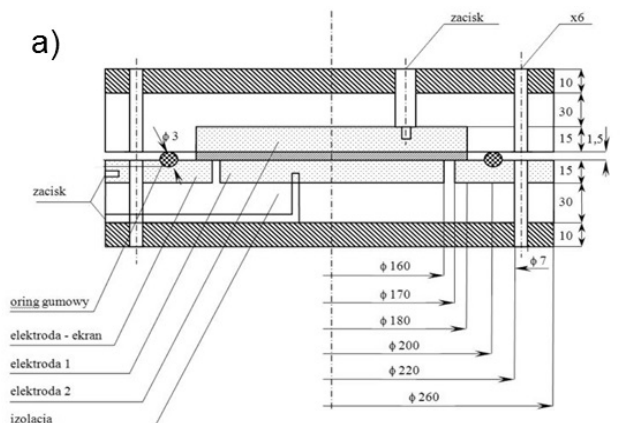


Rys.1. Przykładowe kompozyty izolacji stało-ciekłych

Niniejsza publikacja dotyczy wpływu temperatury i zawilgocenia na parametry relaksacyjne izolacji stało – ciekłej złożonej z Nomexu impregnowanego estrem syntetycznym na podstawie pomiarów metodą FDS (Frequency Domain Spectroscopy) oraz PDC (Polarization Depolarization Current).

Obiekt i metodyka

W celu przeprowadzenia badań wpływu temperatury i zawilgocenia impregnowanego estrem syntetycznym papieru aramidowego na podstawie pomiarów metodą spektroskopii dielektrycznej (FDS) oraz pomiaru prądów polaryzacji i depolaryzacji (PDC) zbudowano zespół elektrod pomiarowych (rys.2). Pomiędzy elektrodami umieszczano dwa arkusze Nomexu typu 410 o grubości 0,76 mm.



Rys.2. Elektrody pomiarowe: projekt (a), widok (b)

Żądaną wartość zawilgocenia (0÷5 %) uzyskiwano poprzez suszenie Nomexu w temperaturze 150 °C w laboratoryjnej 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 zespół elektrod umieszczano w komorze klimatycznej w celu wykonania pomiarów metodą spektroskopii dielektrycznej oraz pomiaru prądu polaryzacji i depolaryzacji w zakresie temperatury (0÷100) °C. Zakres częstotliwości pomiarowej w metodzie FDS wynosił 10^{-4} ÷ $5 \cdot 10^3$ Hz, natomiast w metodzie PDC zastosowano cykl 2 godzin ładowania i rozładowania izolacji.

Do prezentacji i analizy wyników pomiarów wykorzystano program Origin v.8.0 oraz WinFit firmy Novocontrol. Do wyznaczenia podstawowych parametrów funkcji relaksacyjnych w dziedzinie częstotliwości zastosowano uogólnione równanie H-N (Havriliaka-Negamiego) w postaci [3]:

$$(1) \quad \varepsilon(\omega) = -j \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} \right)^N + \sum_{k=1}^3 \left(\frac{\Delta \varepsilon_k}{(1 + (j\omega\tau_k)^{\alpha_k})^{\beta_k}} + \varepsilon_{\infty k} \right)$$

gdzie: $\Delta \varepsilon$ – polaryzowalność, τ – czas relaksacji, ε_{∞} – przenikalność optyczna, α, β – stałe H-N, σ_0 – parametr konduktywności zmiennoprądowej

Do wyznaczenia podstawowych parametrów funkcji relaksacyjnych z pomiarów metodą PDC zastosowano równanie Jonschera LFD w postaci [4]:

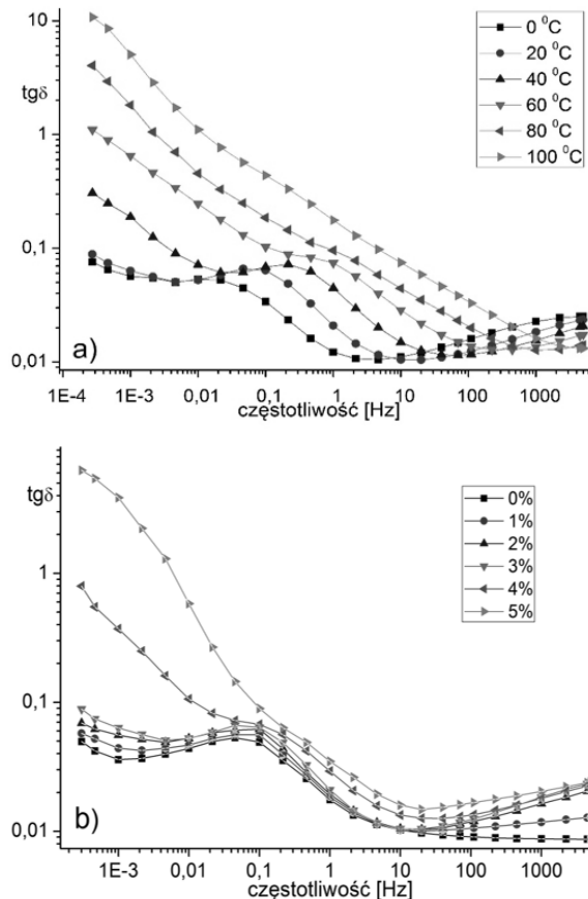
$$(2) \quad i(t) \propto A_1 \cdot t^{-n_1} + A_2 \cdot t^{-n_2}$$

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

Wyniki

Z pomiarów otrzymano szereg charakterystyk FDS Nomexu impregnowanego estrem syntetycznym dla różnej temperatury i zawilgocenia. Przykładowe wyniki pomiarów zaprezentowano na rysunku 3. Wynika z nich, że zwiększanie temperatury dla próbki o zawilgoceniu 3% powoduje wzrost wartości współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ w zakresie LF (niskiej częstotliwości) jednocześnie przesuując te charakterystyki w kierunku wyższych częstotliwości (rys. 3a). Jest to typowe zachowanie dla stała - ciekłego układu dielektrycznego, które można opisać prawem Arrheniusa. Natomiast zmiany $tg\delta$ dla zawilgocenia 0÷3% w temperaturze 20 °C są relatywnie niewielkie w porównaniu do zmian strat dielektrycznych dla zawilgocenia 4 i 5 % (rys. 3b). Obserwowany efekt jest prawdopodobnie związany z przekroczeniem progu perkolacji cząsteczek wody pomiędzy włóknami papieru aramidowego. Zmiany współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ dowodzą istnienia trzech procesów relaksacyjnych w badanym spektrum częstotliwości. Pierwszy proces H-N1 występuje w zakresie LF (poniżej 0,01Hz) i jest znacząco przysłonięty gwałtownymi zmianami przewodnictwa dla najbardziej zawilgoconych próbek, dodatkowo zwiększanie temperatury intensyfikuje dominację wartości przewodnictwa nad samym procesem relaksacyjnym. Najprawdopodobniej jest on najbardziej czuły na zmiany zawilgocenia, gdyż wartość $tg\delta$ zmienia się w tym zakresie o blisko trzy rzędy wielkości. Kolejny i zarazem główny proces elektryczny H-N2 występuje w zakresie około 0,1 Hz i jest charakteryzowany przez lokalne maksimum lub punkt przegięcia na charakterystyce $tg\delta$. Najprawdopodobniej również jest on związany z zawartymi pomiędzy włóknami papieru aramidowego a aglomeratami nanokropel wody połączonych za pomocą siłami van der Waalsa. Ponadto w

zakresie HF (wysokiej częstotliwości) zaobserwowano istnienie trzeciego procesu relaksacyjnego H-N3 charakteryzowanego przez lokalne maksima na charakterystykach $tg\delta$. Jest on najlepiej widoczny dla niskich temperatur, gdyż zaczyna się od częstotliwości około 10^3 Hz dla zawilgocenia $X=3\%$. Stała czasowa tego procesu rośnie wraz ze wzrostem temperatury i nie jest w pełni obserwowalna ze względu na ograniczony zakres pomiarowy systemu Dirana.



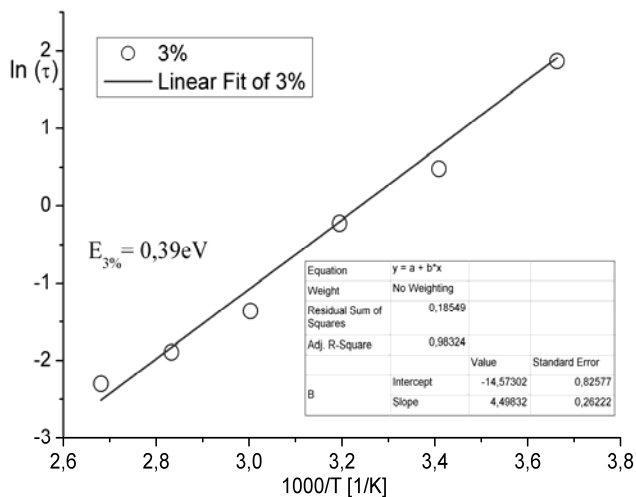
Rys.3. Zmiany współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ od częstotliwości impregnowanego estrem syntetycznym Nomexu (a) dla różnej temperatury przy zawilgoceniu 3% oraz (b) dla różnego zawilgocenia w temperaturze 20 °C

Na rysunku 3 zaprezentowano przykładowe pomiary odpowiedzi dielektrycznej uzyskane za pomocą metody FDS dla impregnowanego estrem syntetycznym Nomexu. Analiza powyższych danych z uwzględnieniem zmian pojemności po przeliczeniu na rzeczywistą ε' oraz urojonej ε'' część przenikalności elektrycznej dla różnej częstotliwości została przeprowadzona w programie WinFit za pomocą równania Havriliaka-Negamiego (1). W ten sposób ilościowo oszacowano podstawowe parametry występujących relaksacji dielektrycznych badanej izolacji Nomex - ester syntetyczny. Najbardziej czułe z nich na zmiany temperatury i zawilgocenia podano na rysunkach od 4 do 6.

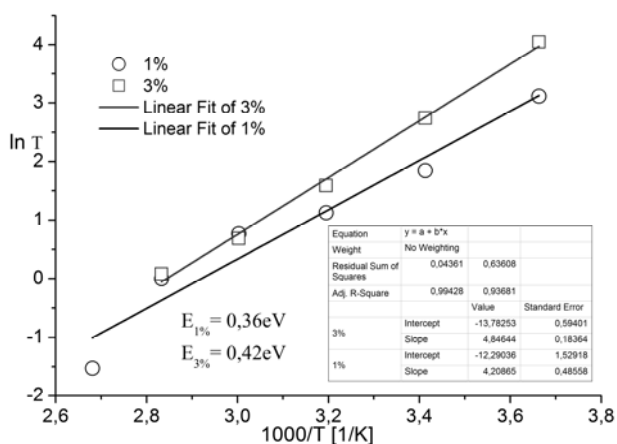
Ponieważ zmiany stałej czasowej głównego procesu relaksacyjnego H-N2 od temperatury przedstawione na wykresie Arrheniusa posiadają liniowy charakter, można w prosty sposób obliczyć jego energię aktywacji (rys.4).

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

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



Rys. 4. Wykres Arrheniusa zmian stałych czasowych głównego procesu relaksacyjnego H-N2 dla zawilgocenia Nomexu 3%



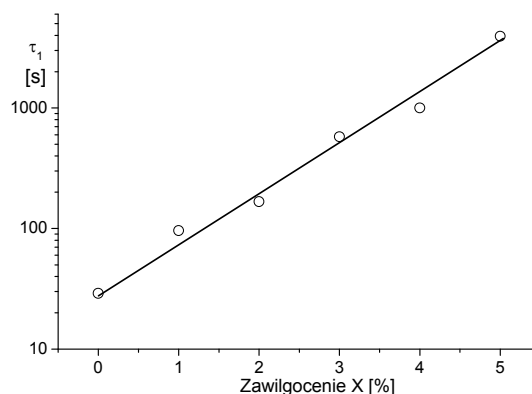
Rys. 5. Wykres Arrheniusa otrzymany na podstawie okresu lokalnych maksimum lub punktów przegięcia charakterystyk współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ od częstotliwości dla zawilgocenia Nomexu 1% i 3%

Energia aktywacji dla zawilgocenia 3% papieru aramidowego wyliczona z parametrów równania H-N (1) wynosi $E_{3\%}=0,39\text{eV}$ (rys.4). Obliczone wartości energii aktywacji są porównywalne do klasycznej izolacji stałociekłej złożonej z celulozy i mineralnego oleju, gdzie wartość ta mieści się w przedziale $0,3 \div 0,45\text{eV}$ [5, 6].

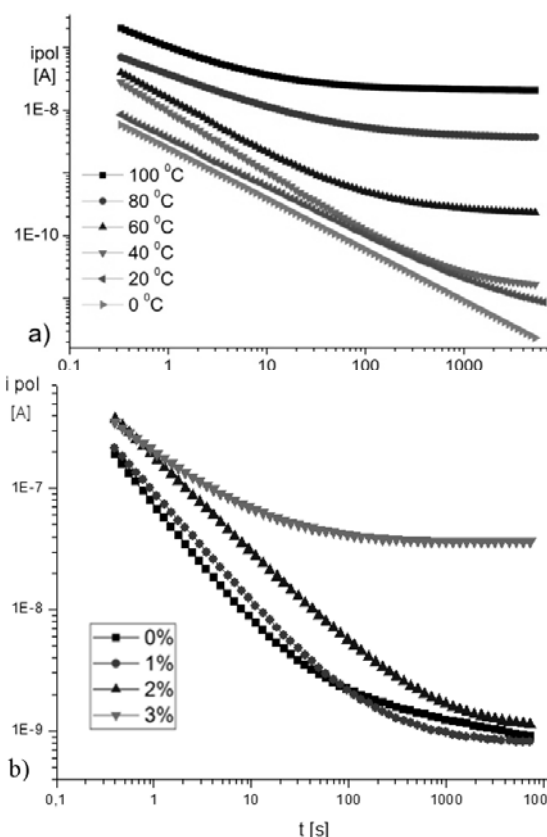
Autor publikacji zaproponował sposób szacowania energii aktywacji głównego procesu relaksacyjnego za pomocą prawa Arrheniusa na podstawie prostego przeliczania wartości częstotliwości na okres T dla którego występuje w charakterystykach $tg\delta$ lokalne maksimum lub punkt przegięcia. Przykładowe wyniki szacowanej w ten sposób energii aktywacji przedstawiono w układzie współrzędnych $\ln(\tau)$ od $1000/T$ na rysunku 5. Wynoszą one odpowiednio dla zawilgocenia $X=1\%$, $E_{1\%}=0,36\text{eV}$ oraz $X=3\%$, $E_{3\%}=0,42\text{eV}$. Osiągnięto w ten sposób stosunkowo dużą zgodność wyników energii aktywacji dla zawilgocenia $X=3\%$ wyliczonej na podstawie skomplikowanej analizy za pomocą równania H-N (1), a prostym szacowaniem opisanym powyżej.

Głównym parametrem charakteryzującym zmiany pierwszego procesu relaksacyjnego (zakres LF) jest stała czasowa τ_1 (rys.6). Na skali półlogarytmicznej wykazuje ona liniowy charakter zmian wraz ze wzrostem zawilgocenia w badanym zakresie $X=0\div 5\%$. Ma to duże znaczenie z punktu widzenia szacowania zawilgocenia badanej izolacji. Zmiany

stałej czasowej τ_1 wynoszą, aż trzy rzędy wielkości i tak dla suchego układu wynosi ona około 29 sekund, natomiast dla zawilgocenia $X=5\%$ aż $\tau_1=3928\text{ s}$.



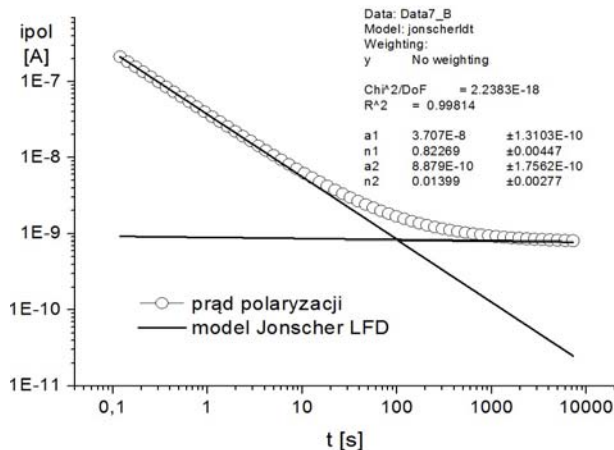
Rys. 6. Zależność stałej czasowej τ_1 procesu HN1 od zawilgocenia dla impregnowanego estrem syntetycznym Nomexu w temperaturze $20\text{ }^\circ\text{C}$



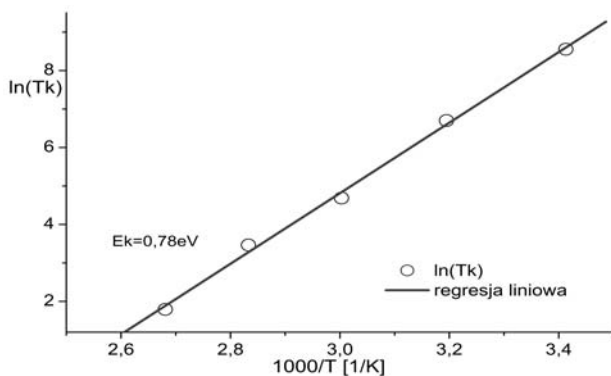
Rys.7. Prądy polaryzacji dla zawilgocenia 3% w różnej temperaturze (a) oraz dla różnego zawilgocenia w temperaturze $100\text{ }^\circ\text{C}$ (b)

Z pomiarów otrzymano szereg charakterystyk PDC Nomexu impregnowanego estrem syntetycznym. Na rysunku 7 przedstawiono jedynie przykładowe pomiary w dziedzinie czasu dla różnej temperatury (rys.7a) i zawilgocenia (rys.7b). Wynika z nich, że zwiększanie temperatury powoduje wzrost wartości prądu polaryzacji w całym zakresie rejestrowanego czasu (rys.7a). Podobny wpływ na wartość prądów polaryzacji ma ilość znajdującej się w badanej izolacji wody (rys. 7b).

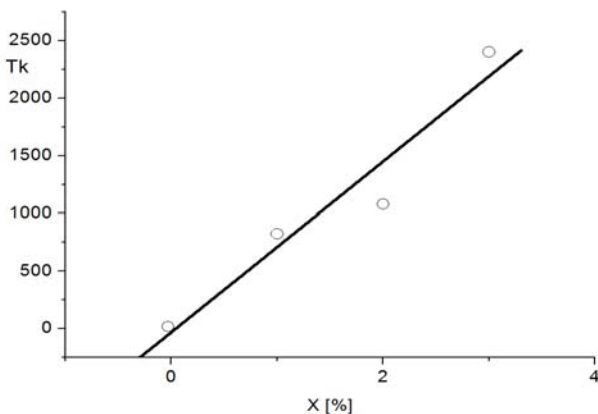
Analizę jakościową odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie czasu, zaprezentowaną na rysunku 7, przeprowadzono przy zastosowaniu zależności Jonschera LFD (2). Przykładową analizę dla impregnowanej próbki Nomexu pokazano na rysunku 8.



Rys.8. Analiza procesu relaksacji w dziedzinie czasu Nomexu impregnowanego estrem syntetycznym na podstawie prądu polaryzacji dla zawilgocenia 1% w temperaturze 100 °C



Rys.9. Wykres Arrheniusa dla czasu charakterystycznego T_k wyznaczonego z prądu polaryzacji dla zawilgocenia 3%



Rys.10. Zależność czasu charakterystycznego T_k wyznaczonego z prądu polaryzacji dla różnego zawilgocenia w temperaturze 40 °C

Przeprowadzona analiza pozwoliła wyznaczyć parametr T_k dla różnej temperatury impregnowanego estrem syntetycznym Nomexu. Interpretacja fizyczna parametru T_k utożsamia go z czasem charakterystycznym po którym następuje zmiana procesu relaksacyjnego. Wartość

obliczonej energii aktywacji na podstawie równania (3) dla zawilgocenia 3% wynosi $E_a = 0,78\text{eV}$ (rys. 9). Przeprowadzona analiza za pomocą modelu (2) charakterystyk prądów polaryzacji pozwoliła w stosunkowo łatwy sposób oszacować energię aktywacji wolnozmiennych procesów relaksacyjnych na podstawie równania (3).

Na rysunku 10 zaprezentowano przykładowe zmiany czasu charakterystycznego T_k od zawilgocenia w temperaturze 40 °C. Liniowy charakter tych zmian w badanym zakresie zawilgocenia ma duże praktyczne znaczenie, gdyż może być parametrem stosowanym do szacowania zawilgocenia izolacji Nomex-ester syntetyczny na podstawie pomiarów prądów polaryzacji.

Wnioski

Badania FDS wykazały istnienie trzech procesów dielektrycznych w badanej izolacji.

Przeprowadzona analiza za pomocą aproksymacji równaniem (1) charakterystyk FDS pozwoliła obliczyć energię aktywacji głównego procesu relaksacyjnego na podstawie równania (3), jednak zaprezentowany autorski sposób szacowania energii aktywacji wydaje się dla tej izolacji metodą dużo łatwiejszą i praktyczniejszą.

Najważniejszym parametrem z punktu widzenia szacowania zawilgocenia Nomexu impregnowanego estrem syntetycznym jest dla metody FDS wartość stałej czasowej τ_1 pozwalającej w stosunkowo łatwy sposób wyznaczyć wartości zawilgocenia w układzie.

Przeprowadzona analiza 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.

Praktyczne znaczenie parametru określanego jako czas charakterystyczny T_k (uzyskanego z metody PDC) pozwala na wyznaczanie zawilgocenia izolacji Nomex-ester syntetyczny.

Autorzy: dr inż. Marek Zenker, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, tel. 91 449 47 54, E-mail: marek.zenker@zut.edu.pl; dr inż. Andrzej Mrozik, ZUT w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, tel. 91 449 45 61, E-mail: andrzej.mrozik@zut.edu.pl

LITERATURA

- [1] <http://www2.dupont.com>, stan na dzień 15 czerwca 2018
- [2] Jain A., Vijayan K., Effect of penetrants on the aramid Nomex, *Bulletin of Materials Science*, 23 (2000), No. 3, 211–214
- [3] Havriliak S. Jr., Havriliak S. J., Dielectric and Mechanical Relaxation in Materials. Analysis, Interpretation, and Application to Polymers, *Hanser Publishers*, Munich, Vienna, New York, 1997
- [4] Jonscher A., The Universal Dielectric Response and Its Physical Significance, *IEEE Trans. El. Insulation*, 27 (1992), No 3, 407-423
- [5] Zenker M., Zasięg relaksacji w modelu kanałów olejowych transformatorów energetycznych na podstawie pomiarów FDS, *Przegląd Elektrotechniczny*, 11b (2010), 300-303
- [6] Żukowski P., Kołtunowicz T.N., Kierczyński K., Rogalski P., Subocz J., Szrot M., Gutton M., Sebok M., Jurcik J., Permittivity of a composite of cellulose, mineral oil, and water nanoparticles: theoretical assumptions, *Cellulose*, 23 (2016), 175-183