

doi:10.15199/48.2024.11.43

Porównanie wpływu stopnia zawilgocenia na charakterystyki czasowe prądów polaryzacji i depolaryzacji półsyntetycznej izolacji celulozowo-aramidowej NOMEX[®] 910 impregnowanej estrem syntetycznym i naturalnym

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych analizujących wpływ stopnia zawilgocenia na charakterystyki prądów polaryzacji i depolaryzacji próbek izolacji transformatorowej wykonanych na bazie hybrydowego, celulozowo-aramidowego papieru elektroizolacyjnego NOMEX[®]910 zaimpregnowanego estrem syntetycznym MIDEL[®]7131 lub cieczą biopochodną Nytro[®] BIO 300X. Wynikiem przeprowadzonej analizy są funkcje regresji energii aktywacji oraz dominujących stałych czasowych komponentów składowych celulozowo-aramidowej izolacji NOMEX[®]910 z uwzględnieniem temperatury oraz stopnia zawilgocenia włókien celulozy.

Abstract. This article presents the results of laboratory tests analyzing the effect of the degree of moisture on the characteristics of polarization currents and depolarization of samples of transformer insulation made on the basis of hybrid cellulose-aramid electrical insulating paper NOMEX[®]910 impregnated with synthetic ester MIDEL[®]7131 or the bio-based liquid Nytro[®] BIO 300X. The result of the analysis, is the regression functions of the activation energy and the dominant time constants of the components of the cellulose-aramide insulation NOMEX[®]910, taking into account the temperature and degree of moisture of the cellulose fibers. (Comparison of the effect of the degree of moisture on the time characteristics of polarization and depolarization currents of semi-synthetic cellulose-aramide insulation NOMEX[®]910 impregnated with synthetic and natural ester)

Słowa kluczowe: izolacja stała transformatorów mocy, izolacja celulozowo-aramidowa, ester syntetyczny i naturalny, zawilgocenie izolacji, polaryzacja dielektryka, energia aktywacji, dominujące stałe czasowe.

Keywords: solid insulation of power transformers, cellulose-aramide insulation, synthetic and natural ester, insulation moisture, dielectric polarization, activation energy, dominant time constants.

Wstęp

Układ izolacyjny transformatora mocy jest jego jednym z najistotniejszych elementów. Należy pokreślić, że technologia produkcji transformatorów, pozostaje niezmienna od prawie stu lat [5], a najczęściej wykorzystywanym układem izolacyjnym służącym do budowy izolacji międzywojowej transformatorów mocy jest sycony mineralnym olejem izolacyjnym ulepszony termicznie celulozowy papier elektroizolacyjny typu Kraft. Materiał ten, choć tak powszechnie wykorzystywany, nie jest niestety pozbawiony wad. Do wad celulozy zaliczyć można niską wytrzymałość temperaturową, szczególnie uwidaczniającą się w wyższych temperaturach w postaci degradacji celulozy, rozumianej jako skracanie długości łańcuchów makrocząstek celulozy. Papier, w którego strukturze zajądą takie zmiany, cechować będzie się mniejszą wytrzymałością na zrywanie, a więc pogorszeniem właściwości mechanicznych. Wspomniane czynniki starzenia celulozy wpływają również na postępujące zwiększanie stopnia zawilgocenia izolacji, gdyż woda jest jednym z produktów utleniania celulozy. Zwiększający się stopień zawilgocenia izolacji prowadzi bezpośrednio do obniżania właściwości dielektrycznych (np. obniżenie wytrzymałości elektrycznej oraz rezystywności skrośnej), co bezpośrednio zagraża stanowi bezawaryjnej pracy transformatora.

Z uwagi na wskazane wady układów izolacyjnych projektowanych w oparciu o celulozowe papiery elektroizolacyjne, poszukiwane są nowe rozwiązania umożliwiające dłuższą, bezawaryjną pracę tych urządzeń, z uwzględnieniem rozwiązań przyjaznych dla środowiska naturalnego. Obecnie bardzo duże nadzieje pokłada się w układach izolacyjnych zbudowanych w oparciu o hybrydowe celulozowo-aramidowe papiery elektroizolacyjne zawierające w swojej strukturze włókna aramidowe. Zastosowanie hybrydowych materiałów elektroizolacyjnych ma na celu połączenie najlepszych cech materiałów na

bazie celulozy (wchłaniałość cieczy elektroizolacyjnych) i materiałów aramidowych (bardzo dobre właściwości elektryczne i mechaniczne).

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wykonanych na nowym typie hybrydowej izolacji celulozowo-aramidowej, znanej pod handlową nazwą NOMEX[®]910. Materiał ten składa się z 3 warstw, główną środkową warstwę stanowi papier celulozowy, zaś warstwy zewnętrzne wzbogacone są składnikiem aramidowym, zapewniającym wzmocnienie mechaniczne struktury papieru izolacyjnego, co bezpośrednio wpływa na jego przedłużoną żywotność [2, 3, 4]. Odnosząc się do cieczy elektroizolacyjnych stosowanych do impregnacji izolacji stałej transformatorów, na rynku energetycznym zaobserwować można tendencję odchodzenia od klasycznego oleju mineralnego w kierunku biodegradowalnych estrów naturalnych lub syntetycznych [1, 2, 5]. Podczas badań eksperymentalnych do sylenia izolacji NOMEX[®]910 posłużono się dwoma estrami, syntetycznym MIDEL[®]7131 oraz naturalnym Nytro[®]BIO 300X. Analizując własności wykorzystanych cieczy elektroizolacyjnych można stwierdzić, że Nytro[®]BIO 300X jest węglowodorem, do którego produkcji wykorzystywane są produkty pochodzenia biologicznego, głównie roślinnego. MIDEL[®]7131 jest natomiast estrem syntetycznym. Obie cieczy charakteryzują się biodegradowalnością, a więc są przyjazne dla środowiska. Porównując obie cieczy można stwierdzić, że ciecz elektroizolacyjna Nytro[®]BIO 300X [8] charakteryzuje się mniejszą gęstością, liczbą kwasową oraz lepkością kinetyczną, co bezpośrednio wpływa na polepszenie zdolności chłodzenia uzwojeń transformatora. MIDEL[®]7131 [2, 9] cechuje się zaś większym napięciem przebicia i ponad 2,5 krotnie większą rozpuszczalnością wody w stosunku do płynu Nytro[®]BIO 300X, bez istotnego zmniejszenia napięcia przebicia. Ponadto MIDEL[®]7131 charakteryzuje się 2 krotnie większą temperaturą zapłonu,

co wpływa na bezpieczeństwo obsługi transformatorów szczególnie podczas awaryjnych zwarć wewnętrznych.

Metoda PDC

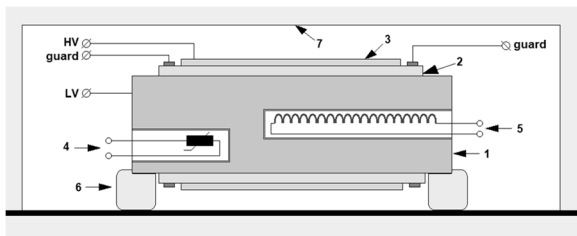
Do szacowania stopnia zawilgocenia próbek izolacji NOMEX®910 zaimpregnowanej estrami Nytro®BIO 300X i MIDEL®7131, posłużono się metodą analizy prądów polaryzacji i depolaryzacji dielektryków PDC (Polarization and Depolarization Current). Metoda PDC należy do grupy polaryzacyjnych metod diagnostycznych, a bazuje na analizie zjawiska polaryzacji dipolowej dielektryków, jaka ma miejsce po umieszczeniu ich w polu napięcia stałego. Idea metody jak i metoda wyznaczenia energii aktywacji E_A , oraz dominujących stałych czasowych τ_1 i τ_2 opisana została przez autorów niniejszej pracy w [3, 4].

Sposób przygotowania próbek

Proces przygotowania 10 próbek pomiarowych (po 5 dla każdej cieczy impregnacyjnej) obejmował wycięcie próbek z materiału NOMEX®910 o grubości 80 μm i wymiarach 1300 x 120 mm. Liczba próbek odpowiadała przyjętym stopniom zawilgocenia, jakie w późniejszym etapie badań miały podlegać pomiarom (tj. próbka sucha oraz próbki zawilgocone w 1%, 2%, 3%, 4%). Przed procesem zawilgocenia, każda z próbek podlegała procesowi suszenia w temperaturze 110°C w warunkach próżni laboratoryjnej. Równoległe przygotowanie cieczy dielektrycznych (MIDEL®7131 i Nytro®BIO 300X) polegało na ich osuszeniu w temperaturze 70°C i odgazowaniu również w warunkach próżniowych. Przygotowane próbki pomiarowe zawilgacane były z wykorzystaniem komory klimatycznej, wewnątrz której znajdowała się waga laboratoryjna służąca do kontrolowania przyrostu masy wynikającej z procesu zawilgacania. Kolejny etap preparacji próbek polegał na impregnacji zawilgoconych próbek cieczami dielektrycznymi. W tym celu zawilgocone próbki zanurzono w osuszonych i odgazowanych cieczach dielektrycznych, które następnie podlegały długiemu procesowi sezonowania w szczelnych pojemnikach bez dostępu powietrza.

Układ pomiarowy

Po zakończeniu procesu sezonowania próbek, zawilgocone i zaimpregnowane próbki nawijano na elektrodę niskiego potencjału, w postaci mosiężnego wałka pomiarowego o średnicy 40 mm i długości 160 mm. Wymiary próbki pozwalały na uzyskanie 10 warstw izolacji. Następnie na tak nawiniętą próbkę, nawijano cienką folię aluminiową o szerokości 80 mm, która podczas pomiarów posłużyła za elektrodę wysokiego potencjału. Na rysunku 1 przedstawiono przekrój poprzeczny wałka, badanej próbki, elektrody oraz inne elementy układu pomiarowego.



Rys.1 Układ elektrod wałka pomiarowego

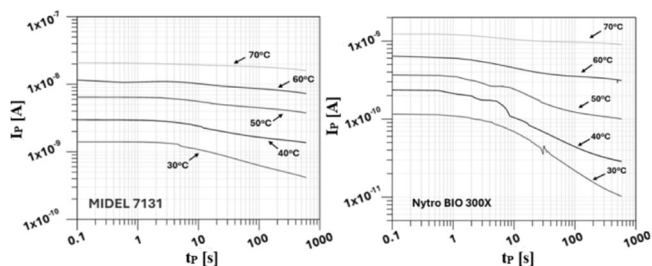
1 – elektroda niskiego potencjału (wałek pomiarowy); 2 – próbka badanej izolacji; 3 – elektroda wysokiego potencjału (folia aluminiowa); 4 – czujnik temperatury; 5 – grzałka; 6 – teflon (PTFE); 7 – ścianka wewnętrzna sterylizatora

W celu zapewnienia stałej temperatury podczas wykonywania eksperymentów, układ pomiarowy wyposażony został w stabilizator temperatury (zmodyfikowany sterylizator laboratoryjny), który zapewniał stabilną temperaturę podczas pomiarów (z dokładnością $\pm 1^\circ\text{C}$).

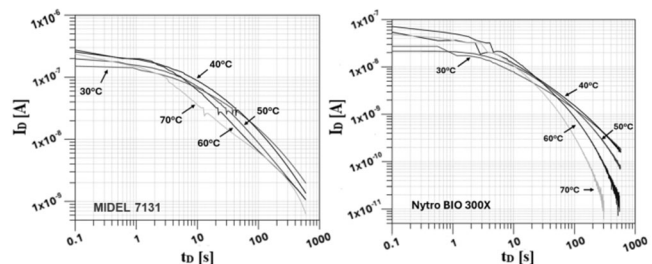
Na rysunku 2 przedstawiono układ pomiarowy z nawiniętą próbką umieszczony wewnątrz stabilizatora temperatury.



Rys.2 Stanowisko laboratoryjne do pomiarów prądów polaryzacji i depolaryzacji próbek izolacji transformatorowych z widocznym stabilizatorem temperatury otoczenia oraz miernikiem SONEŁ® MIC-15k1



Rys.3. Charakterystyki czasowe prądów polaryzacji izolacji NOMEX®910 syconej: estrem MIDEL®7131 i cieczą Nytro®BIO 300X zmierzonych na niezawilgoconych próbkach izolacji dla temperatury pomiaru z zakresu 30°C - 70°C



Rys.4 Charakterystyki czasowe prądów depolaryzacji izolacji NOMEX®910 syconej: estrem MIDEL®7131 i cieczą Nytro®BIO300X zmierzonych na niezawilgoconych próbkach izolacji dla temperatury pomiaru z zakresu 30°C - 70°C

Wyniki badań

Do pomiarów prądów polaryzacji i depolaryzacji próbek izolacji NOMEX®910 zaimpregnowanych cieczami izolacyjnymi MIDEL®7131 i Nytro®BIO 300X posłużono się miernikiem wysokich rezystancji SONEŁ® MIC-15k1. Miernik ten dzięki funkcji pomiaru współczynnika rozładowania dielektryka (DD factor – Dielectric Discharge) zapewnia możliwość pomiaru i rejestracji przebiegów prądów polaryzacji i depolaryzacji badanej izolacji. Ponadto, dzięki wbudowanej baterii zapewnia stałą wartość przyłożonego napięcia podczas wykonywania pomiarów prądów polaryzacji. W trakcie badań napięcie pomiarowe

wynosiło 500 V. Wszystkie pomiary cechowały się jednakowym czasem rejestracji wyników, wynoszącym $t_P = t_D = 600$ s. Częstotliwość próbkowania wynosiła 2 Hz, którą uznaje się za wystarczającą, z uwagi na wolnozmienny charakter zmian wartości rejestrowanych prądów. Aby wyeliminować ewentualne zakłócenia pomiarowe, wszystkie czynności związane ze sterowaniem pracą miernika przeprowadzono za pośrednictwem aplikacji mobilnej Sonel MIC Mobile i komunikacji bezprzewodowej Bluetooth®.

Wpływ temperatury

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wpływ temperatury próbki na charakterystyki czasowe prądów polaryzacji i depolaryzacji. Zakres temperatur, w których wykonywano pomiary (od 30°C do 70°C) odpowiada temperaturom w jakich może odbywać się pomiar w warunkach terenowych na wyłączonym transformatorze. Skrajne temperatury, tj. 30°C odpowiada temperaturze izolacji transformatora po dłuższym wyłączeniu z eksploatacji, gdy pomiar odbywa się w okresie letnim. Temperatura 70°C odpowiada temperaturze transformatora, który przed wyłączeniem i odłączeniem od sieci był obciążony znamionowo.

Analizując charakterystyki przedstawione na rysunku 3 wykazano, że zmiany rejestrowanych wartości prądów polaryzacji są w przybliżeniu proporcjonalne do wzrostu temperatury próbki o 10°C, zarówno dla impregnacji MIDEL®7131 jak i Nytro®BIO 300X. Powodem tego zjawiska jest malejąca rezystywność cieczy izolacyjnych jak i zaimpregnowanej nimi celulozy. Próbki zaimpregnowane płynem transformatorowym Nytro®BIO 300X wykazują mniejsze wartości prądów polaryzacji dla odpowiadających sobie temperatur. Wynika to bezpośrednio z większej rezystywności cieczy Nytro®BIO 300X w stosunku do MIDEL®7131. Podobnie jak w przypadku prądów polaryzacji, próbki zaimpregnowane cieczą Nytro®BIO 300X wykazują się o rząd niższymi wartościami rejestrowanych prądów,

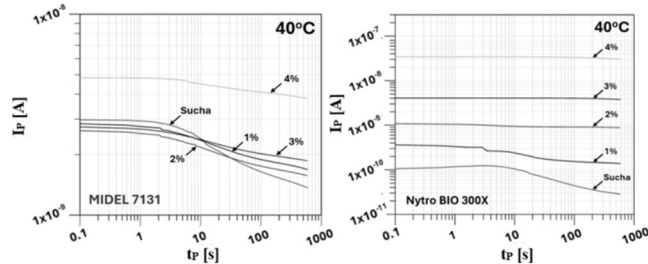
co wynika ze wspomnianej już większej rezystywności cieczy Nytro®BIO 300X.

Odnosząc się do przebiegów czasowych prądów depolaryzacji z rysunku 4, to w początkowym okresie analizy

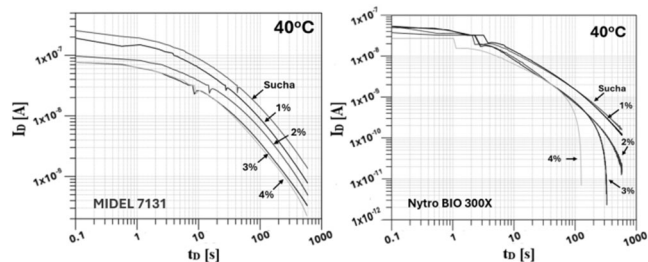
(tuż po zwarceniu zacisków prądowych), próbki cechujące się wyższą temperaturą wykazują wyższe wartości prądów depolaryzacji. Po upływie kilkunastu sekund zaobserwować można odwrotną tendencję, tj. im wyższa temperatura próbki tym dynamiczniejszy zanik wartości prądów depolaryzacji. Proces ten przebiega szybciej dla próbek zaimpregnowanych Nytro®BIO 300X, głównie z uwagi na mniejszą lepkość tej cieczy w stosunku do estru MIDEL®7131. Charakter zmian obserwowanych prądów dla obu cieczy wynika z faktu, że wraz ze wzrostem temperatury próbki maleje lepkość obu cieczy dielektrycznych, którymi zaimpregnowano materiał NOMEX®910, ponadto wyższa temperatura próbki zwiększa drgania dipoli badanego dielektryka, co sprzyja szybszemu procesowi osiągnięcia pierwotnego stanu nieuporządkowania dipoli elektrycznych, a więc procesowi rozładowania dielektryka.

Wpływ stopnia zawilgocenia

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wpływ zawilgocenia na wartości rejestrowanych prądów polaryzacji i depolaryzacji próbek zaimpregnowanych estrem MIDEL®7131 i cieczą Nytro®BIO 300X dla przykładowej temperatury pomiaru wynoszącej 40°C. Dla pozostałych temperatur eksperymentu dostrzeżono analogiczne zależności.



Rys.5. Wpływ stopnia zawilgocenia na charakterystyki czasowe prądów polaryzacji izolacji NOMEX®910 syconej estrem MIDEL®7131 i cieczą Nytro®BIO 300X zmierzonych na próbkach izolacji w temperaturze 40°C



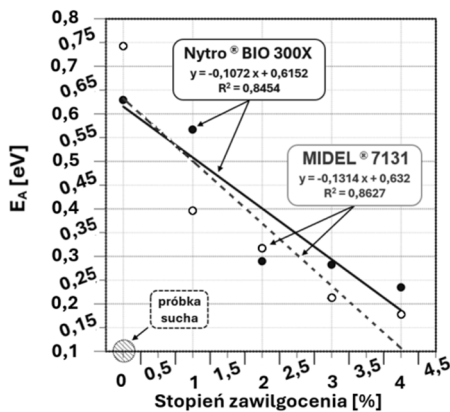
Rys.6 Wpływ stopnia zawilgocenia na charakterystyki czasowe prądów depolaryzacji izolacji NOMEX®910 syconej estrem MIDEL®7131 i cieczą Nytro®BIO 300X zmierzonych na próbkach izolacji w temperaturze 40°C

Analizując charakterystyki prądów polaryzacji (rys.5) próbek zaimpregnowanych estrem MIDEL®7131 potwierdzono [5, 9], że jest to ciecz o dużej rozpuszczalności wody, która nie wpływa znacząco na zdolności dielektryczne badanej izolacji. Dopiero po przekroczeniu progu 4% zawilgocenia, widoczna jest znacząca zmiana wartości rejestrowanych prądów polaryzacji, jednakże wartość ta jest o rząd wielkości mniejsza do analogicznego zawilgocenia próbki zaimpregnowanej cieczą Nytro®BIO 300X. Analizując z kolei zmiany prądów polaryzacji izolacji impregnowanej cieczą Nytro®BIO 300X wykazano, że są one w przybliżeniu proporcjonalne do wzrostu zawilgocenia próbki o 1%. Powodem tego zjawiska jest niemalże liniowy wzrost przewodności izolacji wraz ze wzrostem stopnia jej zawilgocenia.

Na podstawie charakterystyk czasowych prądów depolaryzacji przedstawionych na rysunku 6 można stwierdzić, że dla obu cieczy impregnujących, im wyższy stopień zawilgocenia, tym niższa wartość rejestrowanych prądów depolaryzacji. Próbka izolacji zaimpregnowana cieczą Nytro®BIO 300X wykazuje jednak szybszy charakter zmian prądów depolaryzacji wraz ze wzrostem stopnia zawilgocenia niż ester MIDEL®7131. Wynika to z opisanego wcześniej większego wpływu zawilgocenia na przewodność próbki zaimpregnowanej cieczą Nytro®BIO 300X, tzn. im wyższy stopień przewodności badanej izolacji tym proces depolaryzacji następuje szybciej.

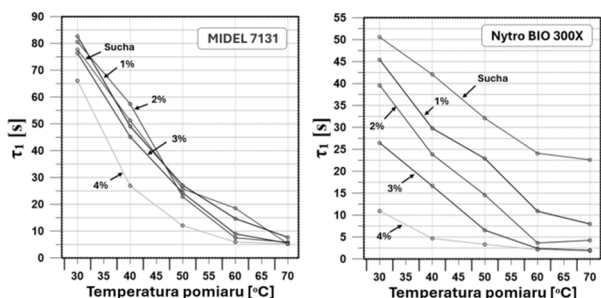
Wyznaczenie energii aktywacji E_A w funkcji zawilgocenia

Na podstawie zarejestrowanych charakterystyk czasowych prądów polaryzacji dla całego zakresu temperatur izolacji (30°C - 70°C), korzystając z równania Jonschera wyznaczono energię aktywacji [6, 7] dla próbek zaimpregnowanych oboma cieczami dielektrycznymi dla wszystkich stopni zawilgocenia (rys.7).

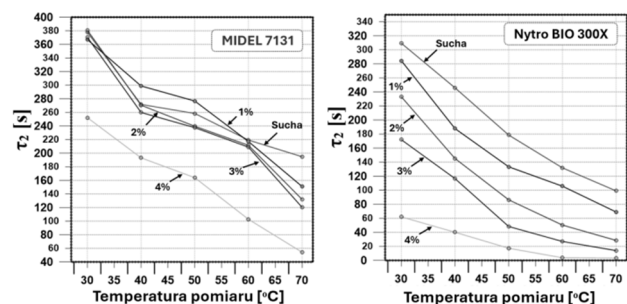


Rys.7 Charakterystyka energii aktywacji w funkcji zawilgocenia izolacji NOMEX®910 syconej: estrem MIDEL®7131 i cieczą Nytro® BIO 300X

Przeprowadzona analiza wykazała, że w obu przypadkach im próbka bardziej zawilgocona tym mniejsza energia potrzebna do przeprowadzenia polaryzacji dielektryka. Analiza porównawcza energii aktywacji próbek zaimpregnowanych oboma cieczami wykazała, że ester MIDEL®7131 wykazuje dynamiczniejsze obniżenie wartości energii aktywacji wraz ze wzrostem stopnia zawilgocenia w stosunku do cieczy Nytro®BIO 300X. Prawdopodobnie ta wynika z mechanizmu absorbowania wody, jaki ma miejsce w estrze MIDEL®7131, który przebiega w sposób rozproszony, a co za tym idzie następuje wzrost przewodnictwa na skutek tunelowania elektronów, wynikającego z bliskiego sąsiedztwa mikrocząstek wody rozproszonej w estrze MIDEL®7131 [1].



Rys.8 Wpływ stopnia zawilgocenia na charakterystyki stałej czasowej τ_1 w funkcji temperatury pomiaru próbek izolacji NOMEX®910 syconej: estrem MIDEL®7131 i cieczą Nytro® BIO 300X



Rys.9 Wpływ stopnia zawilgocenia na charakterystyki stałej czasowej τ_2 w funkcji temperatury pomiaru próbek izolacji NOMEX®910 syconej: estrem MIDEL®7131 i cieczą Nytro® BIO 300X

Analiza dominujących stałych czasowych

Aby określić wpływ zawilgocenia na elementy składowe struktury materiału NOMEX®910, na podstawie przebiegów prądów depolaryzacji i funkcji regresji w postaci równania Debye'a z dwoma stałymi czasowymi [3, 4], wyznaczono dominujące stałe czasowe τ_1 oraz τ_2 (rys.8 i 9). Stała czasowa τ_1 korelowana jest z procesem relaksacji włókien aramidu, zaś τ_2 włókien celulozy.

Analiza dominującej stałej czasowej τ_1 z rysunku 8 wykazała, że zarówno temperatura próbki jak i stopień zawilgocenia izolacji mają znaczący wpływ na wartości dominującej stałej czasowej τ_1 . Z uwagi na syntetyczny charakter włókien aramidu, wpływ zawilgocenia na wartość czasu relaksacji τ_1 wiązać należy z wpływem zawilgocenia na właściwości dielektryczne cieczy izolacyjnej, którą zaimpregnowane są zewnętrzne warstwy izolacji NOMEX®910.

Analiza dominującej stałej czasowej τ_2 z rysunku 9 wykazała, że dla obu zastosowanych cieczy dielektrycznych wraz ze wzrostem temperatury pomiaru maleje wartość wyznaczonych stałych czasowych τ_2 . Charakter obserwowanych zmian wynika bezpośrednio z właściwości zastosowanych cieczy impregnowanych. Wzrost temperatury pomiaru, naturalnie zaburza proces polaryzacji dipoli celulozy, więc w efekcie dipole relaksują się szybciej i stała czasowa τ_2 ulega zmniejszeniu.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzić można:

- dla obu cieczy impregnowanych zmiany rejestrowanych wartości prądów polaryzacji są w przybliżeniu proporcjonalne do wzrostu temperatury próbki o 10°C,
- potwierdzono, że ester MIDEL®7131 jest cieczą o dużej rozpuszczalności wody, która nie wpływa znacząco na właściwości dielektryczne izolacji. Dopiero po przekroczeniu progu 4% zawilgocenia widoczna jest znacząca zmiana wartości rejestrowanych prądów polaryzacji. Wartości rejestrowanych prądów są o rząd mniejsze w stosunku do cieczy Nytro® BIO 300X,
- zmiany rejestrowanych wartości prądów polaryzacji izolacji zaimpregnowanej Nytro® BIO 300X są w przybliżeniu proporcjonalne do wzrostu zawilgocenia próbki o 1%. Powodem tego zjawiska jest proporcjonalny wzrost przewodności izolacji wraz ze wzrostem stopnia jej zawilgocenia,
- próbka izolacji zaimpregnowana cieczą Nytro® BIO 300X wykazuje dynamiczniejszy charakter zmian prądów depolaryzacji wraz ze wzrostem stopnia zawilgocenia niż ester MIDEL®7131. Wynika to z większego wpływu zawilgocenia na przewodność próbki zaimpregnowanej cieczą Nytro®BIO 300X,
- MIDEL®7131 wykazuje dynamiczniejsze obniżenie wartości energii aktywacji wraz ze wzrostem stopnia zawilgocenia w stosunku do cieczy Nytro®BIO 300X. Obserwacja ta wynika z mechanizmu absorbowania wody jaki ma miejsce w estrze MIDEL®7131,
- analiza dominujących stałych czasowych wykazała, że zarówno temperatura próbki jak i stopień zawilgocenia izolacji mają znaczący wpływ na wartości tych parametrów.

Autorzy: mgr inż. Adam Krotowski, Politechnika Opolska, Katedra Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Próżkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: adam.krotowski@doktorant.po.edu.pl; dr hab. inż. Stefan Wolny, Politechnika Opolska, Katedra Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Próżkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: s.wolny@po.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Zukowski P., Kierczynski K., Rogalski P., Bondariev V., Zenker M., Pajak R., Szrot M., Molenda P., Koltunowicz T., Analysis of the Influence of Insulation Moisture during Long-Term Exploitation of Transformers on Their Reliability as Determined by Alternating Current Electrical Parameters, *Energies*, 17 (2024), No.8, 1952 DOI: 10.3390/en17081952
- [2] Lewandowski K., Moranda H., Szewczyk R., Bubble Effect Phenomenon in Modern Transformer Insulation Systems Using Aramid-Based Materials and Alternative Insulating Liquids, *Energies*, 16 (2023), No.14, 5297, DOI: 10.3390/en16145297
- [3] Krotowski A., Wolny S., Analysis of Polarization and Depolarization Currents of Samples of NOMEX®910 Cellulose–Aramid Insulation Impregnated with Synthetic Ester, *Energies*, 15 (2022), 3107, DOI: 10.3390/en15093107
- [4] Wolny S., Krotowski A., Analysis of Polarization and Depolarization Currents of Samples of NOMEX®910 Cellulose–Aramid Insulation Impregnated with Mineral Oil, *Energies*, 13 (2020), 6075, DOI: 10.3390/en13226075
- [5] Przybyłek P., Rozpuszczalność wody w estrze syntetycznym oraz mieszaninie estru z olejem mineralnym w aspekcie suszenia izolacji celulozowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10 (2016), 92-95, DOI: 10.15199/48.2016.10.22
- [6] Zenker M., Mrozik A., Odpowiedź dielektryczna papieru aramidowego impregnowanego estrem syntetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10 (2018), 164-167, DOI: 10.15199/48.2018.10.37
- [7] Jonscher A., The universal dielectric response and its physical significance, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 27 (1992), No.3, 407-423, DOI: 10.1109/14.142701.
- [8] <https://www.famcocorp.com/Uploadfiles/CkEditor/Files/Catalog/nynas-transformator-oil-nytro-bio-300x.pdf> (dostęp: 1.03.2024r.)
- [9] https://static.mimaterials.com/midel/documents/technical/MIDEL_7131_UK.pdf (dostęp: 4.03.2024r.)