

doi:10.15199/48.2024.11.51

Analiza wpływu stopnia zawilgocenia izolacji NOMEX®910 impregnowanej estrem syntetycznym i naturalnym na charakterystyki dyspersyjne współczynnika strat dielektrycznych w dziedzinie niskich i wysokich częstotliwości

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych próbek izolacji celulozowo-aramidowej NOMEX®910 impregnowanej estrem syntetycznym MIDEL®7131 oraz naturalnym NYTRO®BIO 300X, w postaci charakterystyk dyspersyjnych pojemności, współczynnika strat dielektrycznych oraz zespolonej przenikalności w zakresie częstotliwości napięcia pomiarowego od 10 mHz do 5 MHz. Celem badań była analiza wpływu stopnia zawilgocenia składnika celulozowego izolacji na ww. charakterystyki. Wykazano, że wpływ ten jest istotny dla okna częstotliwości od 10 mHz do 400 kHz.

Abstract. The article presents the results of laboratory tests of samples of cellulose-aramid insulation NOMEX®910 impregnated with the synthetic ester MIDEL®7131 and the natural NYTRO®BIO 300X, in the form of dispersion characteristics of capacitance, dielectric loss coefficient and complex permittivity in the measurement voltage frequency range from 10 mHz to 5 MHz. The aim of the research was to analyze the impact of the degree of moisture of the cellulose component of the insulation on the aforementioned characteristics. It has been shown that this influence is significant for the frequency window from 10 mHz to 400 kHz. (Analysis of the influence of the degree of moisture of NOMEX®910 insulation impregnated with synthetic and natural ester on the dispersion characteristics of the dielectric loss coefficient in the low and high frequency domain).

Słowa kluczowe: izolacja celulozowo-aramidowa, ester syntetyczny, ester naturalny, współczynnik strat dielektrycznych, zespolona przenikalność elektryczna.

Keywords: cellulose-aramid insulation, synthetic ester, natural ester, dielectric loss factor, complex permittivity.

Wstęp

Izolacja celulozowa impregnowana olejem mineralnym stosowana jest w transformatorach energetycznych od ponad stu lat. Aktualnie, w nowoczesnych transformatorach energetycznych dużej mocy nadal dominuje ulepszana termicznie klasyczna izolacja celulozowa typu Kraft, jednak coraz częściej stosuje się jako ciecz impregnującą przyjazne dla środowiska biodegradowalne estry [1-2] w zastępstwie mineralnych olei, które z kolei wymagają utylizacji, a w razie awarii transformatora i rozszczelnienia kadzi, degradują środowisko naturalne. Jednak, pomimo ulepszenia technologii wytwarzania materiałów celulozowych dla przemysłu elektroenergetycznego jaka dokonała się na przestrzeni dziesięcioleci, aspekt utraty wytrzymałości tego materiału na skutek zmniejszania się stopnia polimeryzacji makrocząsteczek celulozy wraz z czasem eksploatacji transformatora jest oczywisty [3-5]. Głównym produktem ubocznym tego procesu jest magazynująca się w izolacji woda. Aby bezpiecznie przedłużyć czas życia technicznego izolacji celulozowej w transformatorach mocy, stosuje się zabiegi jej osuszania za pośrednictwem higroskopijnych estrów syntetycznych [6]. Otwartą kwestią nadal pozostaje jednak dotrzymanie parametrów wytrzymałości mechanicznej papierów celulozowych.

Wychodząc niejako naprzeciw oczekiwaniom rynku, firma DuPont zaproponowała nowy typ izolacji półsyntetycznej celulozowo-aramidowej NOMEX®910, z przeznaczeniem do zastosowań jako izolacja nawojowa impregnowana praktycznie dowolną cieczą dielektryczną, dopuszczoną do pracy w transformatorach mocy [7-10]. Papier elektrotechniczny NOMEX®910 łączy w sobie zalety naturalnego materiału celulozowego jaką jest wysoka wchłaniania cieczy impregnującej oraz syntetycznego materiału aramidowego w zakresie wyższej od celulozy wytrzymałości na rozzerwanie oraz znacznej odporności na wysoką temperaturę.

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wykonanych na próbkach izolacji

celulozowo-aramidowej NOMEX®910 impregnowanej dosyć już popularnym estrem syntetycznym MIDEL®7131 oraz stosunkowo nową cieczą NYTRO®BIO 300X, produkowaną z węglowodorów pochodzenia naturalnego. Celem badań była analiza wpływu stopnia zawilgocenia włókien celulozy na charakterystyki dyspersyjne pojemności oraz współczynnika strat dielektrycznych ϵ_g w szerokim zakresie częstotliwości napięcia pomiarowego. Aby precyzyjnie ocenić wpływ ww. zawilgocenia, postanowiono badać jedynie próbki niestarszone. Ocenę wpływu stopnia zesterzenia, tj. stopnia degradacji termicznej włókien celulozy, opisano w innym artykule [11].

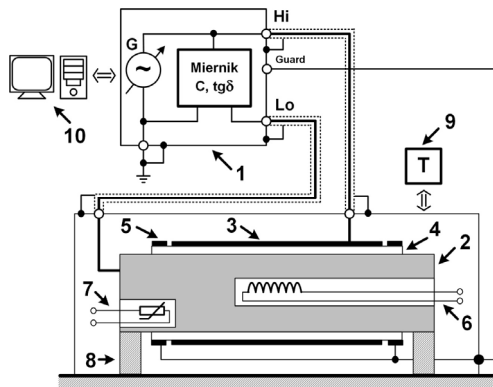
Sposób przygotowania próbek

Przygotowanie próbek do badań polegało na wycięciu z arkusza papieru elektroizolacyjnego NOMEX®910 o grubości 80 μm , 10 próbek o wymiarach 1300 x 120 mm. Liczba wyciętych próbek odpowiadała liczbie przyjętych stopni zawilgocenia dla dwóch cieczy impregnujących, tj. 1 – próbka niezawilgocona, 2 – zawilgocenie 1%, 3 – zawilgocenie 2%, 4 – zawilgocenie 3%, 5 – zawilgocenie 4%. Proces zawilgacania przeprowadzano w komorze klimatycznej, obserwując procentowy przyrost wagi próbek jeszcze przed procesem ich impregnacji. Kolejny etap polegał na impregnacji papieru NOMEX®910 o ustalonym wcześniej poziomie zawilgocenia. W tym celu próbki zanurzano w zlewkach laboratoryjnych, wewnątrz których znajdowała się wcześniej osuszona i odgazowana ciecz impregnująca (MIDEL®7131 bądź NYTRO®BIO 300X). Następnym etapem impregnacji było długotrwałe (48 h, 30°C) sezonowanie zanurzonych w cieczy próbek pod próżnią (ok. 1 Pa).

Układ pomiarowy

Bezpośrednio po procesie impregnacji próbki nawijano na elektrodę niskiego potencjału, którą stanowił mosiężny wałek o średnicy 40 mm oraz długości 160 mm. Wymiary próbki pozwoliły na uzyskanie 10 warstw izolacji. Następnie na zewnętrzną warstwę badanej próbki izolacji nawijano

cienką folię aluminiową o szerokości 80 mm. Folia stanowiła elektrodę wysokiego potencjału. Elektrody ochronne wykonano z metalowych opasek zaciskowych. Na rysunku 1 przedstawiono ideowy przekrój poprzeczny systemu elektrod pomiarowych wraz z dołączonym układem pomiarowym.



Rys. 1. Schemat ideowy układu pomiarowego
1 – mostek elektroniczny (Hioki IM3590 lub Hioki IM3570), 2 – elektroda niskiego potencjału (wałek mosiężny), 3 – elektroda wysokiego potencjału (folia aluminiowa), 4 – nawinięta próbka izolacji, 5 – elektrody ochronne (taśma stalowa), 6 – grzałka, 7 – czujnik temperatury, 8 – izolatory teflonowe (PTFE), 9 – układ regulacji i stabilizacji temperatury, 10 – komputer

W celu zapewnienia stałej temperatury podczas wykonywania badań, wałek pomiarowy wraz z nawiniętą na nim próbką izolacji oraz pozostałym układem elektrod, umieszczono w stabilizatorze temperatury, zapewniającym stałość temperatury otoczenia (z dokładnością do $\pm 1^\circ\text{C}$). Wspomniany stabilizator temperatury stanowił dedykowany hermetyczny sterylizator, którego konstrukcja została specjalnie przystosowana do wprowadzenia do jego wnętrza przewodów pomiarowych.

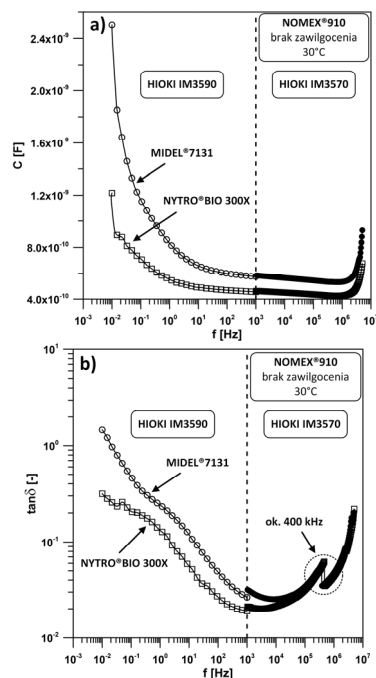
Do pomiarów pojemności C oraz współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ próbek w funkcji częstotliwości wykorzystano dwa mostki elektroniczne japońskiej firmy Hioki o oznaczeniu handlowym IM3590 oraz IM3570. Pierwszy z nich oferuje zakres częstotliwości napięcia pomiarowego od 1 mHz do 200 kHz, drugi natomiast od 4 Hz do 5 MHz. W trakcie badań wykorzystano dedykowane przewody pomiarowe firmy Hioki o oznaczeniu handlowym L2000, dla których producent deklaruje zakres pomiarowy od napięcia stałego do częstotliwości 8 MHz.

Wyniki badań

Dla wszystkich stopni zawilgocenia celulozy opisanych we wcześniejszym rozdziale, wykonano pomiary pojemności C oraz współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ w następujących zakresach częstotliwości napięcia pomiarowego: 1 – od 10 mHz do 1 kHz (miernik IM3590), 2 – od 1 kHz do 5 MHz (miernik IM3570). Każda z próbek była mierzona dla kilku wartości temperatury izolacji, tj. 30°C , 40°C , 50°C , 60°C oraz 70°C . Zakres temperatury odpowiada typowemu warunkom rzeczywistej eksploatacji tego typu izolacji spotykanym w transformatorach elektroenergetycznych mocy [4, 11-12]. Na rysunku 2 przedstawiono przykładową charakterystykę pojemności C oraz współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ dla próbki suchej impregnowanej cieczą MIDEL[®]7131 bądź NYTRO[®]BIO 300X, w temperaturze pomiaru 30°C .

Widoczna na rysunku 2 pionowa linia przerywana wyznacza częstotliwość 1 kHz, przy której dokonywano zamiany miernika Hioki IM3590 na Hioki IM3570. Na rysunku 2b oznaczono częstotliwość ok. 400 kHz, przy której zaobserwowano gwałtowne obniżenie wartości

współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$. Fakt ten obserwowano dla wszystkich próbek, tzn. niezależnie od stopnia zawilgocenia celulozy, jak również niezależnie od temperatury pomiaru. Ostatecznie, uznano to za błąd systematyczny aparatury pomiarowej i aby go wyeliminować, dalszych analiz dokonywano w okach częstotliwości, tj. LF – od 10 mHz do 1 kHz, MF – od 1 kHz do 400 kHz oraz HF – od 400 kHz do 5 MHz.



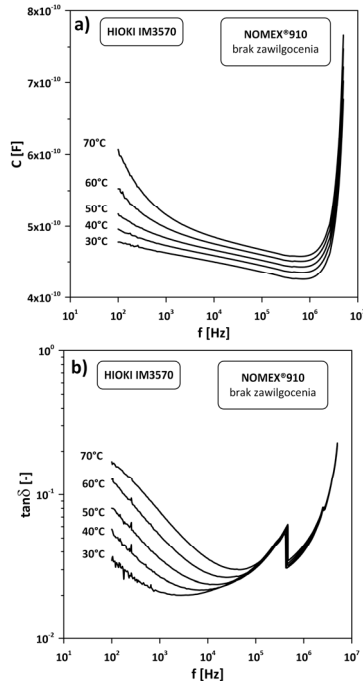
Rys.2. Pojemność C (a) oraz współczynnik strat dielektrycznych $tg\delta$ (b) papieru izolacyjnego NOMEX[®]910 w funkcji częstotliwości w zakresie od 10 mHz do 5 MHz (ciecz impregnująca: MIDEL[®]7131 bądź NYTRO[®]BIO 300X)

Zaobserwowano, że impregnacja cieczą MIDEL[®]7131 powoduje wzrost pojemności oraz współczynnika strat dielektrycznych próbki w porównaniu z cieczą NYTRO[®]BIO 300X. Obserwacja jest zgodna z parametrami dielektrycznymi obu cieczy deklarowanymi przez producentów. Istotnym jest, że współczynnik strat dielektrycznych $tg\delta$ jest praktycznie identyczny dla obu cieczy po przekroczeniu ok. 100 kHz, za co odpowiadają zbliżone czasy relaksacji dipolowych cieczy dla tych zakresów częstotliwości.

Na rysunku 3 przedstawiono wpływ temperatury pomiaru na charakterystyki dyspersyjne pojemności C oraz współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ dla próbki suchej, impregnowanej cieczą NYTRO[®]BIO 300X. Analizę oddziaływania temperatury wykonano dla każdej z badanych próbek, tzn. również dla tych poddanych procesowi zawilgacania, obserwując na charakterystykach dyspersyjnych niemalże identyczną tendencję, jak przedstawia to rysunek 3. Badania powtórzono również dla cieczy impregnującej MIDEL[®]7131, uzyskując podobne rezultaty, które opisywano już w publikacji [11].

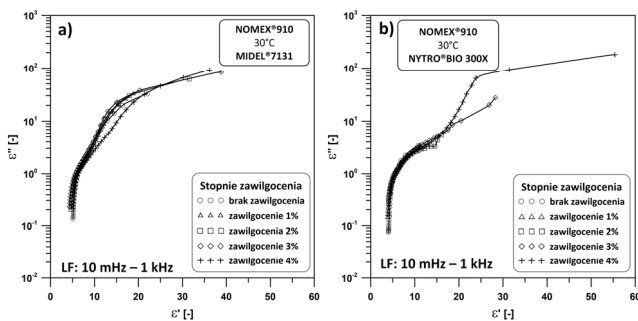
W przypadku pojemności C , w zakresie częstotliwości napięcia pomiarowego do 1 MHz, zaobserwowano praktycznie proporcjonalny wzrost pojemności próbki wraz z rosnącą temperaturą. W oknie częstotliwości od ok. 1 kHz do ok. 1 MHz, malejąca wraz z rosnącą temperaturą lepkość cieczy NYTRO[®]BIO 300X, ułatwia proces polaryzacji dipolowej tej cieczy. Szacunkowo można przyjąć, że przyrost pojemności osiąga ok. 15% przy temperaturze próbki 70°C , w odniesieniu do temperatury bazowej 30°C . Dla częstotliwości poniżej 1 kHz, zaczynają

dominować polaryzacje zdecydowanie dłużej relaksujące, związane z dipolową budową materiałów stałych, tzn. celulozy oraz aramidu. Tutaj, wzrost pojemności związany jest z rosnącą wraz temperaturą przenikalnością elektryczną tych materiałów [10]. W przypadku analizy zmian współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ (rys.3b), rosnąca temperatura zwiększa przewodnictwo jonowe cieczy oraz przewodnictwo elektronowe dielektryków stałych, czyli celulozy i aramidu. Ponadto, rosną straty związane z relaksacją dipolową, na skutek większych drgań termicznych cząsteczek, szczególnie wolno relaksujących łańcuchów celulozy oraz aramidu.



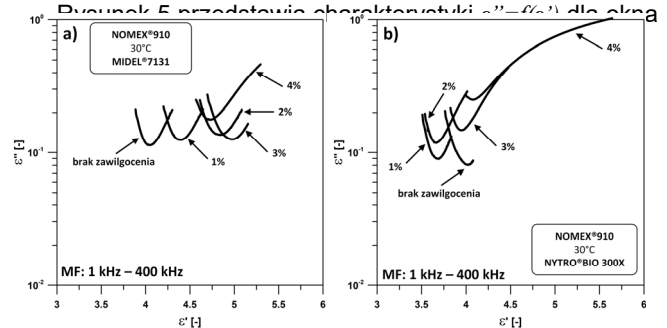
Rys.3. Wpływ temperatury na charakterystyki dyspersyjne pojemności C (a) oraz współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ (b) papieru izolacyjnego NOMEX®910 (ciecz impregnująca: NYTRO®BIO 300X)

Aby kompleksowo ocenić wpływ stopnia zawilgocenia celulozy na pojemność C oraz współczynnik strat dielektrycznych $tg\delta$ w oknach częstotliwości LF (10 MHz – 1 kHz), MF (1 kHz – 400 kHz) oraz HF (400 kHz – 5 MHz), postanowiono przeliczyć ww. charakterystyki na odpowiadające im charakterystyki zespolonej przenikalności elektrycznej, które analizowano w układzie Cole-Cole, tzn. $\epsilon''=f(\epsilon')$. Rysunek 4 przedstawia ww. charakterystyki dla okna częstotliwości LF .



Rys.4. Wpływ stopnia zawilgocenia papieru izolacyjnego NOMEX®910 na charakterystyki przenikalności zespolonej w temperaturze 30°C (ciecz impregnująca: MIDEŁ®7131 (a); NYTRO®BIO 300X (b), okno częstotliwości LF)

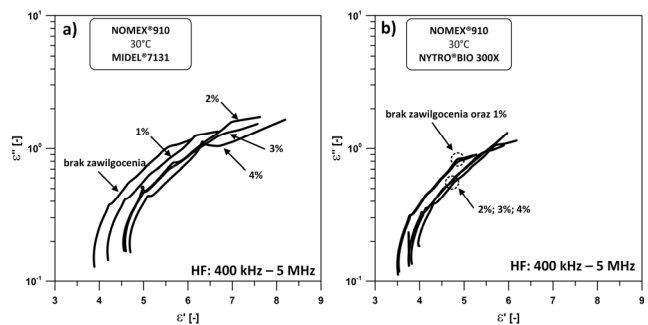
Analizując charakterystyki z rysunku 4a zauważyć można, że jakkolwiek stopień zawilgocenia celulozy nie wpływa w sposób istotny na charakterystyki $\epsilon''=f(\epsilon')$. Powodem jest duża higroskopijność cieczy MIDEŁ®7131, która w przypadku cienkich warstw próbek okazała się wystarczająca, aby je skutecznie osuszać. W przypadku cieczy NYTRO®BIO 300X (rys.4b) zaobserwowano duże zmiany wartości przenikalności ϵ' oraz ϵ'' wraz z rosnącym zawilgoceniem, co zostanie potwierdzone dalszą analizą.



Rys.5. Wpływ stopnia zawilgocenia papieru izolacyjnego NOMEX®910 na charakterystyki przenikalności zespolonej w temperaturze 30°C (ciecz impregnująca: MIDEŁ®7131 (a); NYTRO®BIO 300X (b), okno częstotliwości MF)

Analizując charakterystyki z rysunku 5a zauważono, że rosnący stopień zawilgocenia celulozy próbek izolacji NOMEX®910 impregnowanej cieczą MIDEŁ®7131 powoduje przesuwanie minimum charakterystyk $\epsilon''=f(\epsilon')$ w prawo. Oznacza to, że rosnący udział polarnych cząsteczek wody w izolacji, niezależnie czy magazynowanej w celulozie czy w postaci wody rozproszonej w estrze, istotnie zwiększa przenikalność rzeczywistą ϵ' . Podobny wniosek można sformułować dla cieczy NYTRO®BIO 300X (rys.5b), przy czym opisywane zmiany dotyczą zarówno części rzeczywistej ϵ' , jak i urojonej ϵ'' . Ponadto, zmienność tych przenikalności jest zdecydowanie większa, co zostanie potwierdzone dalszą analizą.

Rysunek 6 przedstawia charakterystyki $\epsilon''=f(\epsilon')$ dla okna częstotliwości HF .

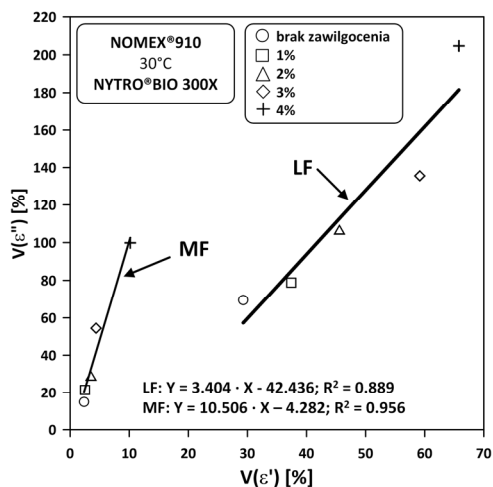


Rys.6. Wpływ stopnia zawilgocenia papieru izolacyjnego NOMEX®910 na charakterystyki przenikalności zespolonej w temperaturze 30°C (ciecz impregnująca: MIDEŁ®7131 (a); NYTRO®BIO 300X (b), okno częstotliwości HF)

Analizując charakterystyki z rysunku 6a zauważono, że rosnący stopień zawilgocenia celulozy próbek izolacji NOMEX®910 impregnowanej cieczą MIDEŁ®7131 powoduje przesuwanie całych charakterystyk $\epsilon''=f(\epsilon')$ w prawo. Podobnie jak poprzednio można stwierdzić, że ogólny przyrost polarnych cząsteczek wody najbardziej determinuje rzeczywistą część przenikalności ϵ' . W przypadku cieczy NYTRO®BIO 300X (rys.6b) zaobserwowano podobną tendencję, jednak zmiany mają zdecydowanie słabszy charakter. Prawdopodobnie w

zakresie częstotliwości HF , sposób rozproszenia wody w cieczach impregnujących oraz jej ilość przede wszystkim wpływa na zmiany przenikalności ϵ' , głównie z uwagi na szybkoszienne relaksacje dipolowe tych cieczy.

Na rysunku 7 przedstawiono zależność współczynników zmienności przenikalności $V(\epsilon')$ oraz $V(\epsilon'')$ w funkcji zawilgocenia próbek dla okna częstotliwości LF i MF .



Rys. 7. Wpływ stopnia zawilgocenia papieru izolacyjnego NOMEX®910 na charakterystyki współczynników zmienności przenikalności zespolonej w temperaturze 30°C (ciecz impregnująca: NYTRO®BIO 300X, okno częstotliwości LF oraz MF)

Charakterystyki z rysunku 7 wyznaczono jedynie dla cieczy NYTRO®BIO 300X, gdyż silnie higroskopijny charakter cieczy MIDEL®7131 spowodował, że nie ustalono korelacji pomiędzy stopniem zawilgocenia próbek a współczynnikami zmienności. Współczynniki obliczono jako iloraz odchylenia standardowego do wartości średniej, podając wynik w skali procentowej. Współczynnik zmienności jest często stosowaną miarą rozproszenia wartości cechy w analizie statystycznej. Ostatecznie ustalono liniową funkcję regresji współczynników $V(\epsilon')$ oraz $V(\epsilon'')$ w korelacji ze stopniem zawilgocenia próbek dla okien częstotliwości LF i MF (rys. 7). W oknie częstotliwości HF nie zaobserwowano takiej korelacji dla żadnej z badanych cieczy impregnujących.

Wnioski

Podstawowym celem wprowadzenia obustronnej cienkiej powłoki aramidowej w półsyntetycznym papierze elektrotechnicznym NOMEX®910 jest wzmocnienie wytrzymałości mechanicznej materiału celulozowego, który ulega pogorszeniu wraz ze zmianami strukturalnymi celulozy wywołanymi przez procesy starzeniowe. Otwartą kwestią pozostaje gromadząca się w izolacji woda, będąca jednym z produktów starzenia się celulozy oraz jej migracja do cieczy dielektrycznej poprzez cienkie warstwy aramid. Tym samym, badania diagnostyczne analizujące w sposób kompleksowy opisywane zagadnienia mają niewątpliwie swoje uzasadnienie aplikacyjne.

W trakcie badań dowiedziono, że zmiany dominujących czasów relaksacji powiązanych z zawilgocaniem celulozą najsilniej objawiają się w oknach częstotliwości napięcia pomiarowego LF oraz MF , tj. łącznie w zakresie od 10 mHz do 400 kHz. Do analizy opisywanego zjawiska można wykorzystać zespoloną przenikalność elektryczną, w układzie współrzędnych typu Cole-Cole. Dowiedziono silnej korelacji stopnia zawilgocenia celulozy ze współczynnikami zmienności $V(\epsilon')$ i $V(\epsilon'')$, gdy cieczą impregnującą był biopochodny węglowodór NYTRO®BIO 300X, produkowany przez firmę Nynas AB.

Analizując wyniki badań, gdy cieczą impregnującą był ester syntetyczny MIDEL®7131 produkowany przez firmę MIDEL & MIVOLT Fluids Ltd., zaobserwowano bardzo silną higroskopijność tej cieczy, powodującą brak korelacji stopnia zawilgocenia celulozy z ww. współczynnikami zmienności. Jedynie w oknie częstotliwości HF , tj. w zakresie od 400 kHz do 5 MHz wykazano trend wzrostowy przenikalności ϵ' wraz ze stopniem zawilgocenia celulozy.

Oczywiście do ew. aplikacyjności wyżej opisanych obserwacji w diagnostyce transformatorów energetycznych jest jeszcze bardzo daleko, choćby z uwagi na fakt, że stosowana aktualnie diagnostyczna aparatura pomiarowa dla współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ oferuje zazwyczaj graniczną częstotliwość napięcia pomiarowego do 1 kHz.

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

LITERATURA

- [1] Moranda H., Gielniak J., Kownacki I., Assessment of Concentration of Mineral Oil in Synthetic Ester Based on the Density of the Mixture and the Capacitance of the Capacitor Immersed in It, *Energies*, 14 (2021), nr 7, 1839, DOI: 10.3390/en14071839
- [2] Zukowski P., Kierczyński K., Okal P., Rogalski P., Zenker M., Pajak R., Molenda P., Szrot M., Koltunowicz T.N., Research on Changes in the Phase Shift Angle and Admittance of the Cellulose–Bio-Oil Composite under the Influence of Increasing Moisture during the Long-Term Operation of Power Transformers, *Energies*, 16 (2023), nr 23, 7880, DOI: 10.3390/en16237880
- [3] Gielniak J., Graczkowski A., Moranda H., Przybyłek P., Walczak K., Nadolny Z., Mościcka-Grzesiak H., Feser K., Gubanski S.M., Moisture in cellulose insulation of power transformers–statistics, *IEEE Trans. on Dielectr. and Electr. Insul.*, 20 (2013), nr 3, 982-987
- [4] Lundgaard L.E., Hansen W., Linhjell D., Painter T.J., Aging of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 19 (2004), nr 1, 230-239
- [5] Wolny S., Aging degree evaluation for paper-oil insulation, carried out using the recovery voltage method, *IEEE Trans. on Dielectr. and Electr. Insul.*, 22 (2015), nr 5, 2455-2462
- [6] Przybyłek P., Walczak K., Sikorski W., Mościcka-Grzesiak H., Morańda H., Cybulski M., Experimental Validation of a Method of Drying Cellulose Insulation in Distribution Transformers Using Circulating Synthetic Ester, *IEEE Access*, (2021), nr 9, 150322-150329, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3125840
- [7] <https://safety.dupont.com/Nomex-910-transformer-insulation>
- [8] Krotowski A., Wolny S., Analysis of Polarization and Depolarization Currents of Samples of NOMEX®910 Cellulose–Aramid Insulation Impregnated with Synthetic Ester, *Energies*, 15 (2021), nr 9, 3107, DOI: 10.3390/en15093107
- [9] Morańda H., Mościcka-Grzesiak H., Przybyłek P., Walczak K., Szewczyk R., Comparative Tests of Partial Discharges in Nomex®910 Paper and Cellulose Paper, *Energies*, 13 (2020), nr 3, DOI: 10.3390/en13030647
- [10] 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), nr 22, DOI: 10.3390/en13226075
- [11] Wolny S., Analiza wpływu stopnia termicznej degradacji izolacji półsyntetycznej NOMEX®910 syconej estrem syntetycznym na charakterystyki dyspersyjne współczynnika strat dielektrycznych w dziedzinie niskich i wysokich częstotliwości, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10 (2022), 221-224, DOI: 10.15199/48.2022.10.49
- [12] Zenker M., Spektroskopia dielektryczna układu papier-olej z osadami na celulozie, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 11b, 82-85, DOI: 10.15199/48.2024.05.19