

doi:10.15199/48.2024.11.52

Wpływ temperatury na odpowiedź dielektryczną w dziedzinie częstotliwości średnio zawilgoconego preszpanu celulozowego impregnowanego bio olejem transformatorowym

Streszczenie. Niniejsza publikacja zawiera badania odpowiedzi dielektrycznej zawilgoconego do 2% udz.wag. preszpanu celulozowego impregnowanego nowym bio olejem transformatorowym (NYNAS NYTRO BIO 300X) dla różnych wartości temperatury. Procesy relaksacyjne badano metodą FDS (Frequency Domain Spectroscopy) stosując uogólnione równanie Havriliaka-Negamięgo. Do wykonania pomiarów użyto systemu DIRANA firmyOMICRON. Do prezentacji i analizy wyników pomiarów wykorzystano program OriginPro 2023b oraz WinFit firmy Novocontrol.

Abstract. This publication contains tests of the dielectric response of moisture up to 2% by weight. Cellulose pressboard impregnated with new bio-transformer oil (NYNAS NYTRO BIO 300X) for various temperature values. Relaxation processes were examined using the FDS (Frequency Domain Spectroscopy). DIRANA OMICRON system, OriginPro 2021 and Novocontrol WinFit with Havriliak-Negami equation were used to analyze measurement results. (Influence of temperature on the dielectric response in the frequency domain of medium-moisture cellulose pressboard impregnated with bio-transformer oil).

Słowa kluczowe: preszpan transformatorowy, bio olej, izolacja stało-ciekła.

Keywords: transformer pressboard, biooil, solid-liquid insulation.

Wstęp

Transformatory energetyczne zawierające klasyczną izolację stało – ciekłą (preszpan na bazie celulozy i olej mineralny będący rafinatem ropy naftowej) produkowane są już ponad 100 lat. Zawilgocenie tego typu izolacji w warunkach normalnych może dojść do 8% w ujęciu wagowym lub nawet więcej, jednak w transformatorach praktycznie nie jest przekraczana wartość 5% zawilgocenia celulozy, gdyż mogłoby to spowodować katastrofalną awarię chociażby poprzez „bubble effect” (efekt bąbelkowania) [1-4].

Główne elementy transformatorów olejowych takie jak rdzeń, uzwojenia, kadź, przepusty w minionym wieku uległy praktycznie stosunkowo małym zmianom konstrukcyjnym w porównaniu do stosowania całkowicie nowych materiałów izolacyjnych. Przykładem może być papier izolacyjny wzmocniony aramidem lub Nomex wprowadzony do sprzedaży przez koncern DuPont [5]. Coraz częściej stosuje się nowoczesne ciecz izolującą chłodzącą takie jak estry syntetyczne lub naturalne, czy bio oleje [6, 7]. Oleje jako materiały izolacyjne spełniają dwie główne role: izolacji elektrycznej oraz chłodzącej. 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 lub pochodzenia roślinnego - oleje naturalne. Stosowanie bio komponentów olejów transformatorowych daje możliwość realnych oszczędności w wyniku zaprzestania projektowania i budowania kosztownych mis olejowych pod dany transformator tak jak to ma miejsce w wyniku stosowania oleju mineralnego [7].

Metody badawcze oparte o pomiar zjawisk relaksacyjnych (FDS - Frequency Domain Spectroscopy; PDC - Polarization Depolarization Current; RVM - Return Voltage Measurement) pozwalają w dostatecznym stopniu oszacować zawilgocenie klasycznej izolacji transformatorów energetycznych złożonych z preszpanu na bazie celulozy i oleju mineralnego [8-10]. W przypadku tych metod kluczowym elementem jest poprawna interpretacja osiągniętych wyników. Metody polaryzacyjne oceny zawilgocenia izolacji stałej dają wynik uśredniony badanego

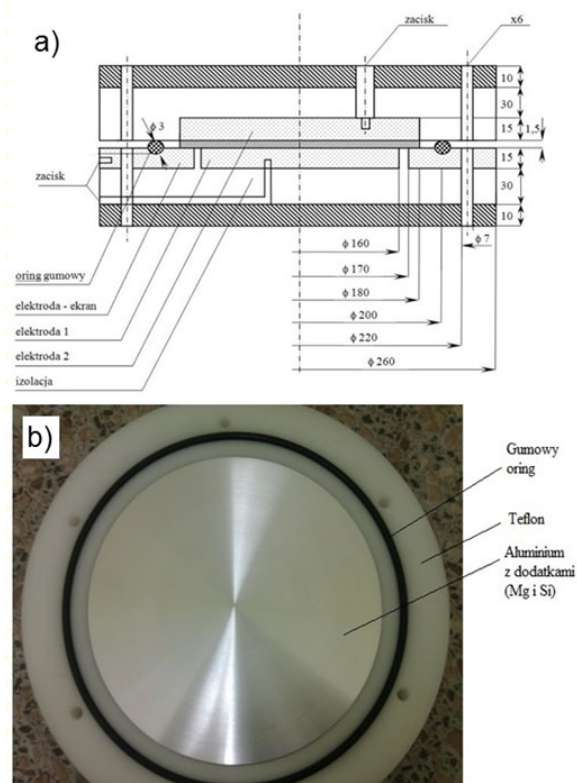
obiektu na podstawie charakterystyk wzorcowych danego zawilgocenia lub analizy ilościowej odpowiedzi dielektrycznej w danej temperaturze. Wydaje się naturalnym procesem matematyczno-fizycznym przełożenia powyższych technik szacowania zawilgocenia na nowoczesne izolacje stało-ciekłe [11].

Niniejsza publikacja dotyczy wpływu temperatury na parametry relaksacyjne izolacji stało – ciekłej złożonej z zawilgoconego do 2%udz.wag. preszpanu transformatorowego impregnowanego nowym bio olejem NYTRO BIO 300X firmy NYNAS na podstawie pomiarów metodą FDS (Frequency Domain Spectroscopy).

Obiekt i metodyka

W celu przeprowadzenia badań wpływu temperatury impregnowanego bio olejem preszpanu celulozowego na podstawie pomiarów metodą spektroskopii dielektrycznej (FDS) wykorzystano zespół elektrod pomiarowych (rys.1). Pomiędzy elektrodami umieszczono arkusz preszpanu celulozowego transformatorowego typu Kraft o grubości 1 mm. Żadaną wartość zawilgocenia wynoszącą 2%udz.wag. uzyskiwano poprzez suszenie preszpanu w temperaturze 80°C w laboratoryjnej komorze próżniowej przez okres 72 godziny. Doświadczenie autora podparte badaniami zawilgocenia wykonanymi metodą Karla – Fischera w zewnętrznym laboratorium pokazują, że po w/w cyklu suszenia zawartość wody w próbce wynosi około 0,6%udz.wag. Następnie próbkę zawilgacano w komorze klimatycznej Feutron KPK 400, przy względnej wilgotności powietrza 60% w temperaturze 60°C. Wartość zawilgocenia ustalano na podstawie pomiaru zmiany masy. Impregnację przeprowadzano w hermetycznym pojemniku wypełnionym bio olejem umieszczonym w komorze klimatycznej, w temperaturze 45°C przy zawilgoceniu względnym 30% przez 14 dni. Następnie zespół elektrod (rys. 1) umieszczano w komorze klimatycznej w celu wykonania pomiarów metodą spektroskopii dielektrycznej w zakresie wartości temperatury (20÷70)°C.

W badaniach wykorzystano spektrometr dielektryczny w postaci systemu pomiarowego DIRANA firmy OMICRON w zakresie pomiarowym od 10^{-4} do $5 \cdot 10^3$ Hz sterowany z komputera klasy PC z dedykowanym oprogramowaniem w wersji 1.9.



Rys.1. Elektrody pomiarowe: projekt (a), widok (b)

Do prezentacji i analizy wyników pomiarów wykorzystano program OriginPro 2023b oraz WinFit firmy Novocontrol. Do wyznaczenia podstawowych parametrów funkcji relaksacyjnych w dziedzinie częstotliwości zastosowano uogólnione równanie H-N (Havriliaka-Negamięgo) w postaci [12]:

$$(1) \quad \varepsilon(\omega) = -j \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} \right)^N + \sum_{k=1}^2 \left(\frac{\Delta \varepsilon_k}{(1 + (j\omega\tau_k)^{\alpha_k})^{\beta_k}} + \varepsilon_{\infty k} \right)$$

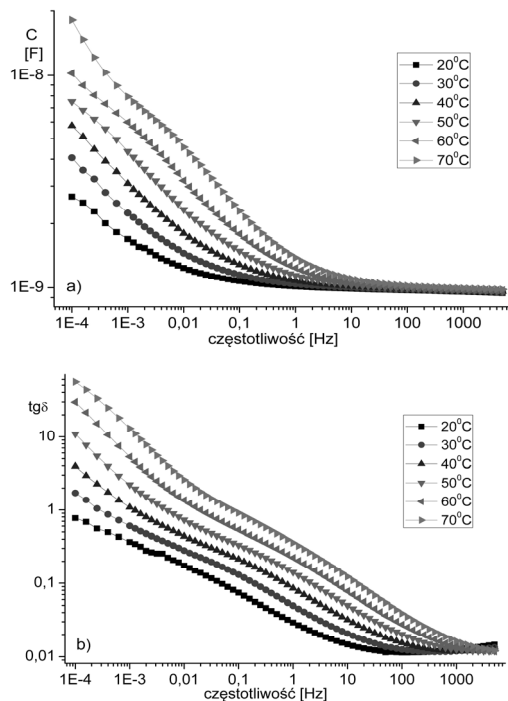
gdzie: $\Delta \varepsilon$ – polaryzowalność, τ – czas relaksacji, ε_{∞} – przenikalność optyczna, α, β – stałe H-N, σ_0 – parametr konduktywności zmiennoprądowej

Wyniki

Z pomiarów otrzymano szereg charakterystyk FDS preszpanu transformatorowego o zawilgoceniu 2% impregnowanego nowym bio olejem NYTRO BIO 300X dla różnych wartości temperatury. Przykładowe wyniki pomiarów zaprezentowano na rysunku 2. Wynika z nich, że zwiększanie wartości temperatury powoduje wzrost wartości pojemności C w całym spektrum częstotliwości, przy czym największe zmiany występują w zakresie niskoczęstotliwościowym, co jest właściwym zachowaniem tego typu izolacji w zmiennym polu elektrycznym (rys. 2a) [13]. Zmiany współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ zaprezentowane na rysunku 2b są przesuwane w kierunku wyższych częstotliwości wraz ze wzrostem temperatury, jednocześnie odnotowano wzrost ich wartości w zakresie nisko i średnio częstotliwościowym. Jest to typowe zachowanie dla stało - ciekłego układu dielektrycznego, którego można opisać prawem Arrheniusa. Zmiany współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ dowodzą istnienia co najmniej dwóch procesów relaksacyjnych w badanym zakresie częstotliwości.

Główny proces relaksacyjny H-N występuje w zakresie LF (poniżej 0,05 Hz) i jest znacząco przysłonięty gwałtownymi zmianami przewodnictwa wraz ze wzrostem temperatury. Przykładowo zmiana współczynnika strat dielektrycznych

$tg\delta$ dla częstotliwości 10^{-4} Hz wynosi dwa rzędy wielkości. Ponadto w zakresie HF (wysokiej częstotliwości) prawdopodobnie istnieje drugi proces relaksacyjny H-N2 widoczny po lokalnym minimum na charakterystykach $tg\delta$. Jest on najlepiej widoczny dla niskich temperatur, gdyż zaczyna się od częstotliwości około 10^2 Hz. Stała czasowa tego procesu prawdopodobnie rośnie wraz ze wzrostem wartości temperatury i nie jest w pełni obserwowalna ze względu na ograniczony zakres pomiarowy systemu Dirana (do 5 kHz).



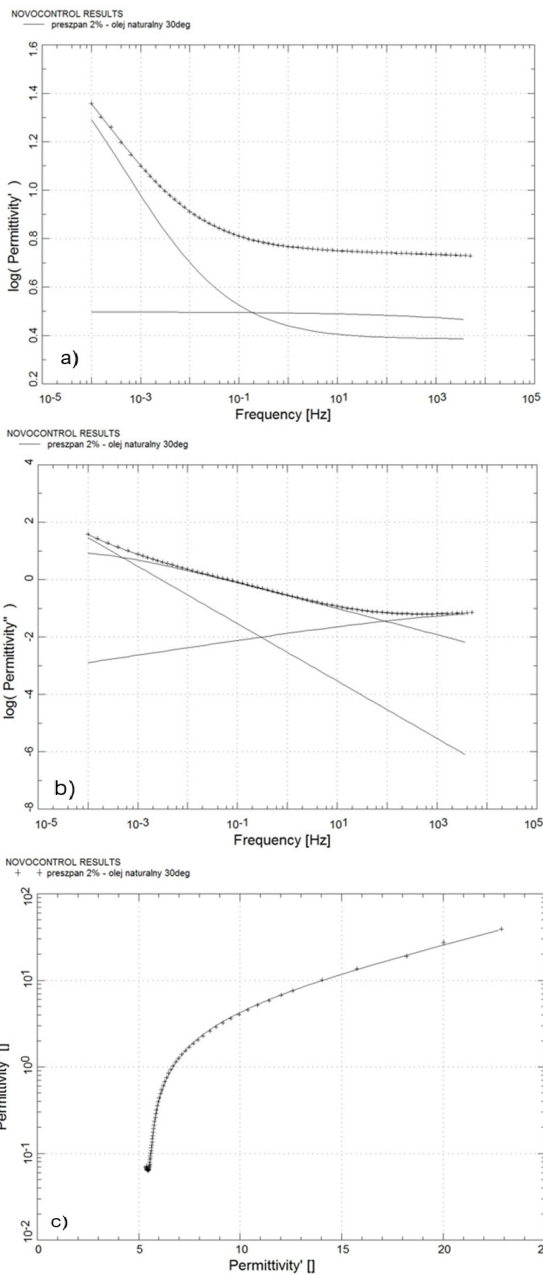
Rys.2. Temperaturowe charakterystyki FDS zawilgoconego do 2% preszpanu transformatorowego impregnowanego bio olejem. Zmiany pojemności C (a) oraz współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ (b)

Analiza uzyskanych danych pomiarowych zaprezentowanych na rysunku 2 po przeliczeniu na rzeczywistą ε' oraz urojoną ε'' część przenikalności elektrycznej dla różnej częstotliwości została przeprowadzona w programie WinFit firmy Novocontrol za pomocą równania Havriliaka-Negamięgo (1). W ten sposób ilościowo oszacowano podstawowe parametry występującej głównej relaksacji dielektrycznej badanej izolacji. Na rysunku 3 ukazano przykładowy proces aproksymacji w programie WinFit dla 2% zawilgoconego preszpanu transformatorowego impregnowanego bio olejem dla temperatury 30°C.

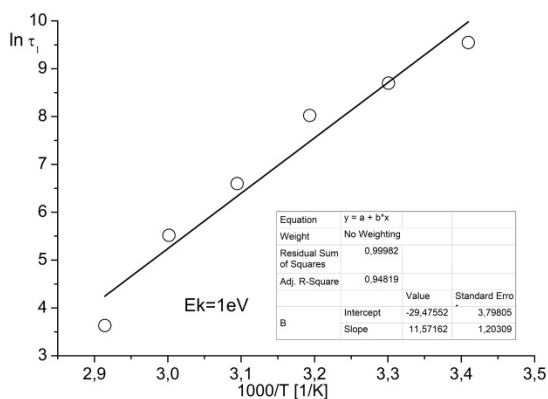
Wybrano najbardziej czuły parametr (stała czasowa τ) analizy ilościowej na zmiany temperatury, zawilgocenia oraz rodzaj użytego ciekłego medium izolacyjnego i zaprezentowano go na rysunku 4. Ponieważ zmiany stałej czasowej τ głównego procesu relaksacyjnego H-N od temperatury przedstawione na wykresie Arrheniusa posiadają liniowy charakter, można w prosty sposób obliczyć jego energię aktywacji (rys.4).

$$(2) \quad E_k = 1000 \cdot \alpha \cdot k$$

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

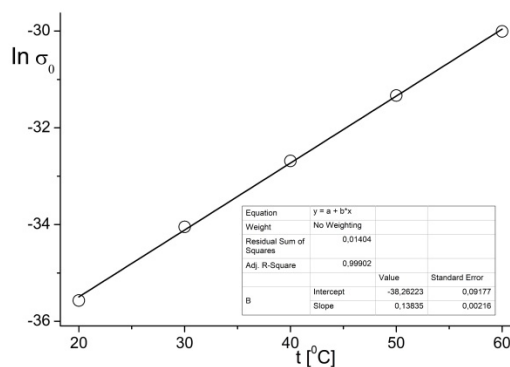


Rys.3. Analiza procesów relaksacyjnych preszpanu transformatorowego impregnowanego bio olejem dla temperatury 30°C z wykorzystaniem równania H-N, (a) części rzeczywistej ϵ' przenikalności elektrycznej, (b) części urojonej ϵ'' przenikalności elektrycznej oraz (c) wykres Cole – Cole



Rys. 4. Wykres Arrheniusa zmian stałej czasowej głównego procesu relaksacyjnego H-N średnio zawilgoconego (2% udz.wag.) preszpanu transformatorowego impregnowanego bio olejem

Energia aktywacji średnio zawilgoconego preszpanu transformatorowego impregnowanego bio olejem wyliczona z parametrów równania H-N (1) dla głównego procesu relaksacyjnego wynosi $E_a = 1 \text{ eV}$ (rys.4). Obliczone wartości energii aktywacji są wyższe niż dla klasycznej izolacji stało-ciekłej złożonej z celulozy i mineralnego oleju, gdzie wartość ta mieści się w przedziale $0,3 \div 0,8 \text{ eV}$ [4, 13]. Prowadzone równoległe badania energii aktywacji wyliczonej z metody PDC (Polarization Depolarization Current) w dziedzinie czasu dla zawilgoconego preszpanu wynoszą $E_a = 1,1 \text{ eV}$ [14], co dodatkowo potwierdza wynik przeprowadzonego eksperymentu badawczego.



Rys. 5. Zmiany logarytmu naturalnego przewodności zmiennoprądowej $\ln \sigma_0$ od temperatury średnio zawilgoconego (2% udz.wag.) preszpanu impregnowanego bio olejem

Na rysunku 5 przedstawiono przeliczone przez logarytm naturalny zmiany przewodności zmiennoprądowej preszpanu impregnowanego bio olejem od temperatury. Stosunkowo duże zmiany wartości przewodności wynoszące od $3,6 \cdot 10^{-16} \text{ S/m}$ dla temperatury 20°C do $9,2 \cdot 10^{-14} \text{ S/m}$ dla temperatury 60°C oraz liniowy charakter logarytmu naturalnego ich wartości w praktyce mogą ułatwić szacowanie zawilgocenia izolacji celuloza-bio olej urządzeń WN w różnej temperaturze.

Wnioski

Przeprowadzona analiza odpowiedzi dielektrycznej oraz procesów relaksacyjnych impregnowanego olejem NYTRO BIO 300X zawilgoconego do 2% preszpanu transformatorowego wykazała, że:

- zaobserwowano istnienie dwóch procesów relaksacyjnych, główny w zakresie niskich częstotliwości oraz drugi w zakresie HF,
- przeprowadzona analiza za pomocą równania H-N charakterystyk FDS pozwoliła oszacować energię aktywacji głównego procesu relaksacyjnego $E_a = 1 \text{ eV}$, co stanowi stosunkowo wysoką wartość w porównaniu do klasycznej i innych izolacji stało-ciekłych
- najważniejszym parametrami z punktu widzenia szacowania zawilgocenia dla różnej temperatury jest dla metody FDS wartość parametru przewodności zmiennoprądowej σ_0 oraz stałej czasowej τ głównego procesu relaksacyjnego
- wzrost temperatury powoduje wzrost wartości współczynnika strat dielektrycznych $\tan \delta$ w zakresie nisko i średnio częstotliwościowym, jednocześnie przesuwając te charakterystyki w kierunku wyższych częstotliwości. Związane jest to ze skokową zmianą przewodnictwa elektrycznego i zachowaniem opisanym przez prawo Arrheniusa,

- zaprezentowane wyniki badań zjawisk relaksacyjnych stanowią bazę do diagnostyki urządzeń wykonanych z izolacji celuloza – bio olej

Autor: dr inż. Marek Zenker, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Wysokich Napięć i Elektroenergetyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, tel. 91 449 47 54, E-mail: marek.zenker@zut.edu.pl

LITERATURA

- [1] Wei, Y., Han W., Li G., Liang X., Gu Z., Hu K., Aging Characteristics of Transformer Oil-Impregnated Insulation Paper Based on Trap Parameters, *Polymers*, 13 (2021), 1364
- [2] Walczak K., Mościcka-Grzesiak H., Przybyłek P., Morańda H., Szewczyk R., Frequency Dielectric Response of Aramid Enhanced Cellulose Paper in Aspect of Its Water Content Determination, *Przegląd Elektrotechniczny*, 97 (2021), Nr 8, 23-26
- [3] Hill J., Wang Z., Liu Q., Krause C., Wilson G., A., Analysing the power transformer temperature limitation for avoidance of bubble formation, *High Volt.*, 4 (2019), 210-216
- [4] Żukowski P., Kołtunowicz T.N., Kierczyński K., Rogalski P., Subocz J., Szrot M., Gutten M., Sebok M., Jurcik J., Permittivity of a composite of cellulose, mineral oil, and water nanoparticles: theoretical assumptions, *Cellulose*, 23 (2016), 175 – 183
- [5] Szewczyk R., Papier izolacyjny wzmocniony aramidem - właściwości i zastosowania, *Urządzenia dla Energetyki*, 2 (2019), 47-54
- [6] <https://www.midel.com/>; zasoby internetowe na dzień 24.05.2024
- [7] <https://www.nynas.com/>; zasoby internetowe na dzień 24.05.2024
- [8] Mishra D., Haque N., Baral A., Chakravorti S., Assessment of interfacial charge accumulation in oil-paper interface in transformer insulation from polarization-depolarization current measurements, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 24 (2017), 1665-1673
- [9] Zhang S. L., The simulation analysis of transformer recovery voltage by field and circuit method based on PSO algorithm, *IEEE, International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, (2018), 610-613
- [10] Brncal P., Gutten M., Diagnostics of Insulating Condition of Traction Transformer by Frequency Method, *Transportation Research Procedia*, 55 (2021), 977-982
- [11] Zenker M., Wpływ temperatury na odpowiedź dielektryczną w dziedzinie częstotliwości suchego papieru celulozowego i aramidowego impregnowanego eksploatowanym oraz zregenerowanym estrem syntetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 100 (2024), Nr 5, 108-111
- [12] 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
- [13] Żukowski P., Rogalski P., Kołtunowicz T.N., Kierczyński K., Zenker M., Pogrebnjak A. D., Kucera M., DC and AC Test of Moisture Electrical Pressboard Impregnated with Mineral Oil or Synthetic Ester – Determination of Water Status in Power Transformer Insulation, *Energies*, 15 (2022), 2859
- [14] Kierczyński K., Zenker M., Korenciak D., Activation energy of DC conductivity of high moisture content electrical pressboard impregnated with mineral oil of natural origin NYNAS NYTRO BIO300X, *ELEKTRO*, IEEE Xplore, (27 June 2022), 10.1109/ELEKTRO53996.2022.9803745