

# Odpowiedź dielektryczna w dziedzinie częstotliwości układu izolacyjnego celuloza-mieszanka estru syntetycznego i oleju mineralnego

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zagadnienia związane z oceną dynamiki wymiany oleju mineralnego na ester syntetyczny w izolacji celulozowej oraz problem oceny zawilgocenia izolacji celulozowej napełnionej mieszaniną oleju mineralnego z estrem syntetycznym. Z badań wynika, że proces wymiany oleju mineralnego na ester syntetyczny jest długotrwały, a ocena zawilgocenia metodą FDS na podstawie wzorców celuloza-olej mineralny skutkuje błędem niedoszacowania.

**Abstract.** The article presents issues related to the assessment of the dynamics of exchange of mineral oil to synthetic ester in cellulose insulation, and the problem of moisture evaluating of cellulose insulation filled with a mixture of mineral oil with synthetic ester. The research shows that the process of replacing mineral oil to synthetic ester is long, and the evaluation of moisture using FDS method based on patterns of cellulose-mineral oil results in an underestimation. Dielectric response in frequency domain of the cellulose-synthetic ester and mineral oil mixture insulating system

**Słowa kluczowe:** olej mineralny, ester syntetyczny, mieszanina estru syntetycznego z olejem mineralnym, spektroskopia dielektryczna w dziedzinie częstotliwości.

**Keywords:** mineral oil, synthetic ester, mixture of mineral oil with synthetic ester, frequency domain spectroscopy.

## Wstęp

W ostatnich latach można zauważyć wzrost zainteresowania wymianą oleju mineralnego na ester syntetyczny w transformatorach energetycznych. Podyktowane to jest głównie bezpieczeństwem pożarowym i względami ekologicznymi. Zagrożenie pożarowe jest konsekwencją zawilgocenia izolacji celulozowej. Po przekroczeniu krytycznego zawilgocenia i temperatury występuje zjawisko „bubble effect”, polegające na gwałtownym uwalnianiu wody z izolacji celulozowej. Może ono doprowadzić do wzrostu ciśnienia w kadzi oraz rozwoju wylądowań niezupełnych w pęcherzykach pary wodnej, co ostatecznie może skutkować eksplozją i pożarem transformatora.

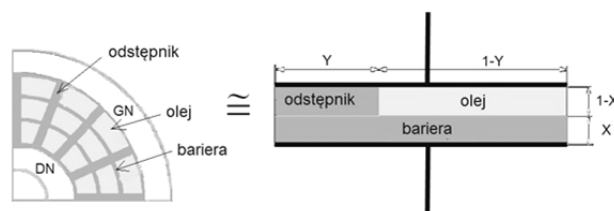
W związku z tym, niezbędna jest wiedza na temat zawilgocenia izolacji stałej transformatorów. Najdokładniejszym sposobem oceny stopnia zawilgocenia izolacji celulozowej jest miareczkowanie metodą Karla Fischera (KFT). Niestety, metoda ta wymaga pobrania próbek izolacji z wnętrza transformatora, co najczęściej jest niemożliwe. Z tego powodu wykorzystuje się metody pośrednie, takie jak spektroskopię dielektryczną w dziedzinie częstotliwości (FDS) i czasu (RVM) [2, 3] oraz pomiar prądu polaryzacji i depolaryzacji (PDC) [4].

Spektroskopia dielektryczna w dziedzinie częstotliwości polega na pomiarze pojemności  $C'$ ,  $C''$  lub strat dielektrycznych  $\tan\delta$ , w zakresie częstotliwości od  $10^{-4}$  do  $10^3$  Hz. Wyniki pomiarów porównuje się z wynikami obliczeń uwzględniające odpowiedź dielektryczną próbek o znanym zawilgoceniu i geometrii układu (model X-Y izolacji Rys. 1). Dokładność metody FDS zależy od liczby i jakości posiadanych próbek.

Wymiana oleju mineralnego na ester syntetyczny generuje kilka wątków natury poznawczej i aplikacyjnej. W artykule przedstawiono wyniki badań prowadzonych w dwóch wątkach:

- 1) ocena dynamiki wymiany oleju mineralnego na ester syntetyczny w izolacji celulozowej transformatora,
- 2) ocena zawilgocenia izolacji celulozowej nasyconej mieszaniną oleju mineralnego i estru syntetycznego.

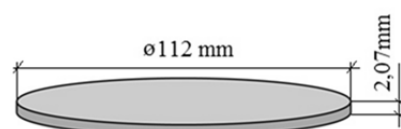
W obu wątkach badawczych oceny zachodzących zjawisk dokonywano wykorzystując spektroskopię dielektryczną w dziedzinie częstotliwości.



Rys. 1. Model XY izolacji transformatora [6]

## Ocena dynamiki wymiany oleju mineralnego na ester syntetyczny w izolacji celulozowej transformatora

Obiektem badań była próbka preszpanu o zawilgoceniu 4,07 % i gęstości  $1,0 \text{ g/cm}^3$  (Rys. 2). Próbka była nasycona olejem mineralnym, a następnie kondycjonowana przez trzy doby w komorze klimatycznej. W badaniach wykorzystano olej mineralny oraz ester syntetyczny, który poddano suszeniu przez zanurzenie w nim bardzo suchego papieru.



Rys. 2 Wymiary próbki preszpanowej

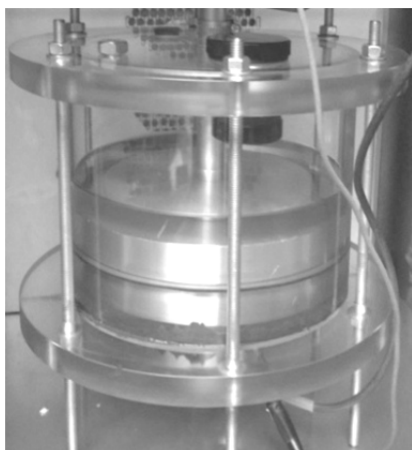
Badana próbka została umieszczona w szczelnym naczyniu wypełnionym cieczą elektroizolacyjną (rys. 3). Przez cały okres badania naczynie to znajdowało się w cieplarni o stałej temperaturze  $30^\circ\text{C}$ . W naczyniu znajdował się także układ trzech elektrod pomiarowych, które w czasie pomiarów były odsunięte od siebie, w celu umożliwienia swobodnego przepływu cieczy wokół badanej próbki (rys. 4).

## Procedura pomiarowa

Badanie przeprowadzono zgodnie z procedurą:

- przygotowanie próbki preszpanowej i cieczy izolacyjnych,
- kondycjonowanie próbki zanurzonej w oleju – 3 dni,
- wyznaczenie zawilgocenia próbki preszpanowej metodą KFT,
- umieszczenie próbki preszpanowej na stanowisku badawczym i badanie odpowiedzi dielektrycznej preszpanu

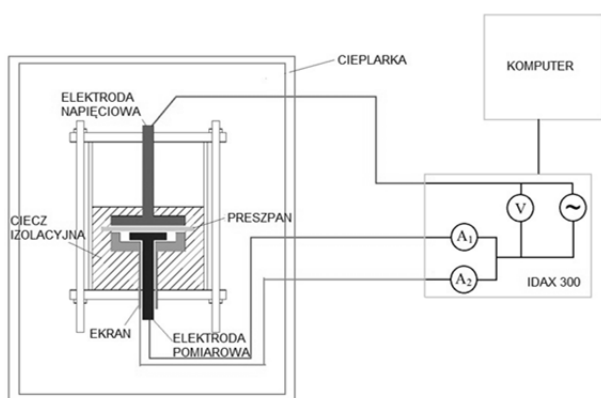
- zanurzonego w oleju mineralnym (zgodnie ze schematem systemu pomiarowego przedstawionego na rysunku 5),
- wymiana oleju mineralnego na ester syntetyczny,
- badanie odpowiedzi dielektrycznej próbki – powtarzane co kilka dni.



Rys. 3. Zdjęcia szczelnego naczynia z próbką preszpanową między elektrodami podczas pomiarów



Rys. 4. Widok układu elektrod i próbki w czasie pomiędzy pomiarami

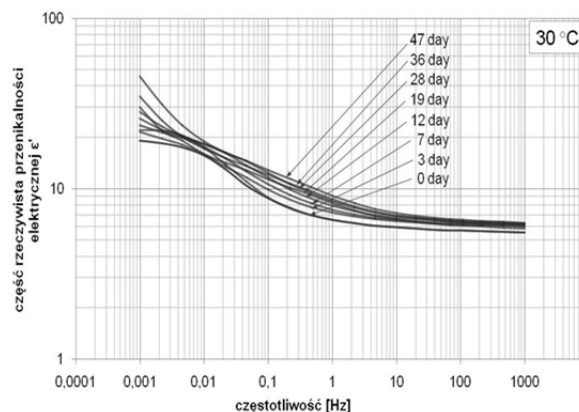


Rys. 5. Schemat systemu pomiarowego

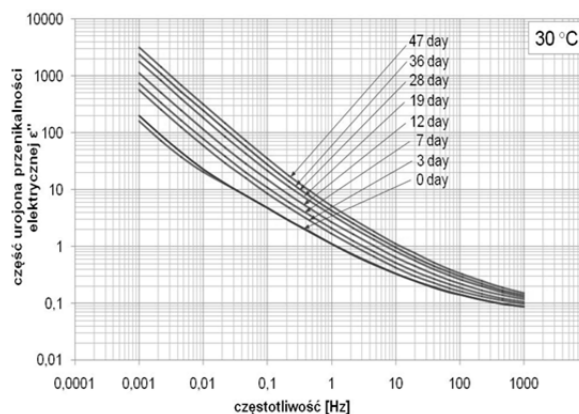
### Wyniki badań

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono odpowiedzi dielektryczne układu izolacyjnego papier-ester syntetyczny dla różnych wartości czasu od dnia wymiany oleju mineralnego na ester syntetyczny. Można tu zauważyć sukcesywne przechodzenie krzywych – od charakterystyki typowej dla układu izolacyjnego preszpan-olej mineralny do

charakterystyki typowej dla układu izolacyjnego preszpan-ester syntetyczny. W niewielkim stopniu, na zmianę kształtu charakterystyk miały także wpływ zmiany zawilgocenia próbki, spowodowane wykonywaniem pomiarów w różnych odstępach czasu.



Rys. 6. Charakterystyki  $\epsilon'$  w zależności od częstotliwości dla różnych wartości czasu od chwili zamiany oleju mineralnego na ester syntetyczny



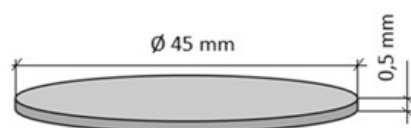
Rys. 7. Charakterystyki  $\epsilon''$  w zależności od częstotliwości dla różnych wartości czasu od chwili zamiany oleju mineralnego na ester syntetyczny

### Ocena zawilgocenia izolacji celulozowej nasyconej mieszaniną oleju mineralnego i estru syntetycznego.

Badaniom podlegało 6 próbek preszpanowych, o gęstości  $1,0 \text{ g/cm}^3$  (rys. 8), nasyconych cieczami elektroizolacyjnymi. Cieczami elektroizolacyjnymi wykorzystanymi w badaniach były:

- olej mineralny (OM),
- ester syntetyczny (ES),
- mieszanina oleju mineralnego z estrem syntetycznym w proporcjach 80% ES i 20% OM, 60% ES i 40% OM, 40% ES i 60% OM, 20% ES i 80% OM.

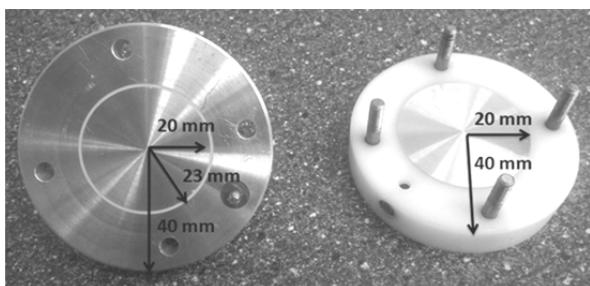
Próbki preszpanowe wraz z cieczami zostały poddane kondycjonowaniu w komorze klimatycznej Binder, MKF 240 aż do osiągnięcia zawilgocenia względnego 3,4%. Pomiary odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego preszpan-ciecz izolacyjna przeprowadzono z wykorzystaniem zestawu elektrod przedstawionych na rysunkach 10 i 11.



Rys. 8. Wymiary próbki preszpanu



Rys. 10. Trójelektrowy układ elektrod pomiarowych



Rys. 11. Wymiary elektrod pomiarowych

W trakcie pomiarów próbki preszpanowe znajdowały się w szczelnym naczyniu wypełnionym cieczą elektroizolacyjną (rys.12).



Rys. 12. Szczelne naczynie wraz elektrodami i umieszczoną między nimi próbką preszpanową

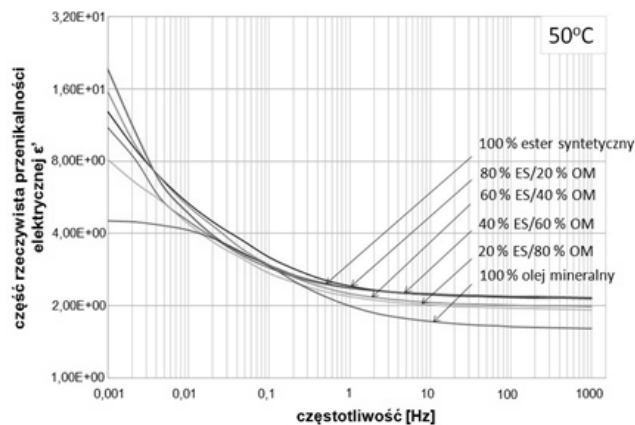
### Procedura pomiarowa

- Badanie zrealizowano według następującej procedury:
- przygotowanie próbek preszpanowych i cieczy elektroizolacyjnych,
  - wysuszenie próbek w komorze próżniowej,
  - przygotowanie mieszanin estru syntetycznego z olejem mineralnym,
  - kondycjonowanie próbek preszpanowych w komorze klimatycznej przez okres 3 dni, w powietrzu o wilgotności względnej 17 % i temperaturze 50°C, do osiągnięcia zawilgocenia względnego preszpanu 3,4 %,
  - kondycjonowanie próbek preszpanowych zanurzonych w cieczach elektroizolacyjnych w komorze klimatycznej przez okres 8 dni, w powietrzu o wilgotności względnej 17 % i temperaturze 50°C,
  - pomiar odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego.

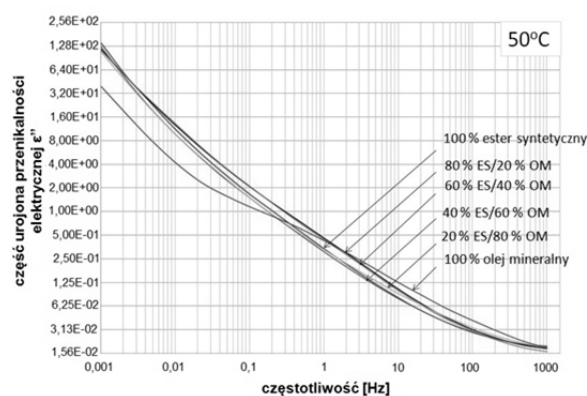
### Wyniki badań

Na rysunkach 13 i 14 przedstawiono odpowiedź dielektryczną układów izolacyjnych celuloza-dielektryk

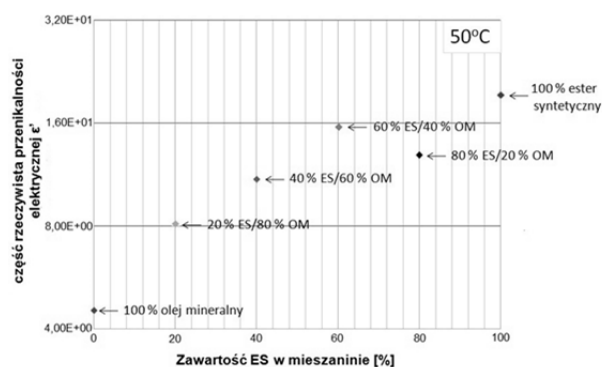
ciekły. Wynika z nich że już niewielki dodatek estru syntetycznego do oleju mineralnego powoduje zmianę odpowiedzi dielektrycznej układu. Przedstawione charakterystyki układów izolacyjnych celuloza dielektryk ciekły różnią się od siebie. Największe różnice charakterystyk występują dla części rzeczywistej przenikalności elektrycznej  $\epsilon'$  układów izolacyjnych preszpan-dielektryk ciekły przy częstotliwości 0,001 Hz. (rys.15).



Rys. 13. Charakterystyki  $\epsilon'$  w zależności od częstotliwości układów izolacyjnych preszpan-dielektryk ciekły



Rys. 14. Charakterystyki  $\epsilon''$  w zależności od częstotliwości układów izolacyjnych preszpan-dielektryk ciekły



Rys. 15. Część rzeczywista przenikalności elektrycznej  $\epsilon'$  wyznaczona dla częstotliwości 0,001 Hz w zależności od zawartości estru w mieszaninie.

W tabelicy 1 przedstawiono porównanie zawilgocenia próbek preszpanowych wyznaczonego metodą wagową i z użyciem oprogramowania załączonego przez producenta do miernika IDAX 300. Można w niej zauważyć różnicę między rzeczywistym zawilgoceniem próbek a wartościami wskazywanymi przez program MODS.

Tabela 1. Porównanie zawilgocenia układów izolacyjnych preszpan-dielektryk ciekły

Dielektryk ciekły nasycający preszpan	Zawilgocenie próbek (wagowo) [%]	Zawilgocenie próbek (MODS) [%]
Olej mineralny 100 %	3,4	3,6
Mieszanina 20 % ES/ 80 % OM	3,4	2,9
Mieszanina 40 % ES/ 60 % OM	3,4	2,6
Mieszanina 60 % ES/ 40 % OM	3,4	2,9
Mieszanina 80 % ES/ 20 % OM	3,4	2,9
Ester syntetyczny 100 %	3,4	2,7

## Wnioski

Wymiana oleju mineralnego na ester syntetyczny w preszpanie jest procesem długotrwałym. W wyniku tego procesu mamy do czynienia zawsze z mieszaniną estru syntetycznego i niewielkiej ilości oleju mineralnego.

Badania rekonesansowe wykazały, że już niewielki dodatek estru syntetycznego do oleju mineralnego powoduje zauważalną zmianę odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego.

Dla części rzeczywistej przenikalności elektrycznej  $\epsilon'$  największe różnice (w zależności od stężenia poszczególnych płynów izolacyjnych) występują przy niskiej częstotliwości 0,001 Hz. W przypadku części urojonej przenikalności elektrycznej  $\epsilon''$  największe różnice występuje dla częstotliwości poniżej 0,1 Hz.

Wcześniej przeprowadzone badania wykazały, że odpowiedź dielektryczna układu izolacyjnego syconego olejem mineralnym znacząco różni się od odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego syconego estrem syntetycznym [7, 8]. Skutkiem tego ocena zawilgocenia układu izolacyjnego celuloza-mieszanina oleju mineralnego i estru syntetycznego, bazująca na wykorzystaniu wzorcowych charakterystyk dla układu izolacyjnego celuloza-olej mineralny, jest obciążona błędem niedoszacowania. Błąd ten jest różny w zależności od proporcji oleju i estru w mieszaninie. Planowane dalsze badania mają na celu wyznaczenie współczynnika poprawkowego, który skoryguje ten błąd i umożliwi wykorzystanie charakterystyk odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego celuloza-olej mineralny lub celuloza-ester syntetyczny do oceny zawilgocenia układów izolacyjnych

syconych mieszaniną tych dwóch cieczy. Wyniki badań pozwolą rozwiązać problemem oceny zawilgocenia transformatora po wymianie oleju mineralnego na ester syntetyczny.

**Autorzy:** mgr inż. Przemysław Fatyga, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych, ul. Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, E-mail: [przemyslaw.h.fatyga@doctorate.put.poznan.pl](mailto:przemyslaw.h.fatyga@doctorate.put.poznan.pl); dr hab. inż. Hubert Morańda, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych, ul. Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, E-mail: [hubert.moranda@put.poznan.pl](mailto:hubert.moranda@put.poznan.pl)

## LITERATURA

- [1] Gielniak J., Morańda H., Neumann S., Ossowski M., Przybyłek P., Walczak K., Mościcka-Grzesiak H., Warunki wystąpienia „bubble effect” w transformatorze o izolacji papierowo-olejowej, Konferencja naukowo-techniczna Transformatory w eksploatacji, Kołobrzeg-Dźwirzyno, 20-22.04.2005, *Energetyka*, Zeszyt tematyczny nr VI, s.120-122.
- [2] Bugajny K., Dalek J., Pinkiewicz I., Diagnostyka stanu zawilgocenia izolacji transformatora zmodyfikowaną metodą  $C_2/C_{50}$ , *Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje*, Nr 1 (2004), s. 38-41.
- [3] Dolta B. i Shayegani A., Badanie procesów starzenia układów izolacyjnych papier-olej, *Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje*, Nr 1 (2004), s. 54-56.
- [4] Zengel W. S., Applications of Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol.19 (2003), No 6. p. 9-22.
- [5] Morańda H. i Koch M., Program do analizy odpowiedzi częstotliwościowej (FDS) dielektryków, *Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje*, Nr 1 (2006), s. 162-165.
- [6] Gielniak J. i Morańda H., Dynamika zawilgocenia izolacji transformatorów energetycznych w zależności od konstrukcji, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 10 (2014), s. 27-30.
- [7] Graczkowski A., Gielniak J., Influence of impregnating liquids on dielectric response of impregnated cellulose insulation, *IEEE International Conference on Solid Dielectrics-ICSD, Potsdam, Germany, July 4-9, 2010*, p. 513-516.
- [8] Morańda H., Walczak K., Gielniak J., Przybyłek P., Graczkowski A., Study of the dielectric response of ester impregnated cellulose for moisture content evaluation, *Nordic Insulation Symposium - Nord-IS 13 - Trondheim, Norway, June 9-12, 2013*, p. 67-70.