

Przemysław FATYGA\*

## DYNAMIKA WYMIANY OLEJU MINERALNEGO NA ESTER SYNTETYCZNY W IZOLACJI CELULOZOWEJ TRANSFORMATORA

Wymiana całości oleju mineralnego na ester syntetyczny w transformatorze jest technicznie niewykonalna, gdyż w kadzi transformatora zawsze pozostanie pewna ilość oleju mineralnego. W tej sytuacji ocena stopnia zawilgocenia izolacji stałej transformatora z użyciem metody FDS jest obciążona pewnym błędem. Błąd ten można skorygować ale wyznaczone współczynniki poprawkowe będą miały zastosowanie dopiero po osiągnięciu w transformatorze stanu równowagi, co wymaga pewnego czasu. Artykuł prezentuje wstępne wyniki badań oszacowania czasu przesylenia izolacji celulozowej mieszanej nowej cieczy i pozostałości oleju mineralnego.

SŁOWA KLUCZOWE: odpowiedź dielektryczna, olej mineralny, ester syntetyczny

### 1. WSTĘP

W ostatnich latach można zaobserwować wzrost zastosowania estrów syntetycznych w przemyśle elektroenergetycznym. Budowane są transformatory dystrybucyjne WN/SN, SN/SN i SN/nN w których jako ciecz elektroizolacyjną zastosowano ester syntetyczny [1]. W pojedynczych przypadkach już można spotkać transformatory wyższych napięć napełnione tą cieczą [2].

Użycie estru syntetycznego powodowane jest, między innymi, wyższą temperaturą zapłonu par oraz dużą temperaturą palenia, co umożliwia zastosowanie transformatorów na terenie, w którym wystąpienie pożaru jest wysoce niebezpieczne i kosztowne. Kolejną zaletą estrów syntetycznych jest ich nietoksyczność, która w przypadku wycieku cieczy z transformatora nie spowoduje skażenia środowiska. Dodatkowo, estry syntetyczne charakteryzują się wysoką biodegradowalnością [3].

Istotną właściwością estrów syntetycznych jest ich bardzo wysoka graniczna rozpuszczalność wody. Cecha ta powoduje że po wymianie oleju mineralnego na ester syntetyczny zawilgocenie izolacji stałej transformatora ulega zmniejszeniu, co powoduje, między innymi, zwiększenie jej wytrzymałości elektrycznej.

---

\* Politechnika Poznańska.

Jedną z metod wykorzystywanych do oceny stopnia zawilgocenia izolacji stałej transformatorów jest spektroskopia dielektryczna w dziedzinie częstotliwości FDS [4]. Metoda ta bazuje na pomiarze pojemności zespolonej  $c'$  i  $c''$  lub strat dielektrycznych  $tg\delta$  w zakresie częstotliwości od  $10^{-4}$  do  $10^3$  Hz. Otrzymane wyniki pomiarów zestawia się następnie z charakterystykami wzorcowymi odpowiedzi dielektrycznej próbek modelowych o dokładnie znanej temperaturze i zawilgoceniu [5, 6].

## 2. CEL BADAŃ

W badaniach założono, że w procedurze wymiany izolacji ciekłej w transformatorze niemożliwe jest pozbycie się z układu całego oleju mineralnego. Celem badań było oszacowanie czasu potrzebnego na ustalenie się nowych warunków równowagi w układzie izolacyjnym preszpan-ciecz dielektryczna po wymianie oleju mineralnego na ester syntetyczny. Informacja o czasie potrzebnym na ujednorodnienie cieczy izolacyjnej w całej objętości układu izolacyjnego (osiągnięcie takiego samego stężenia estru w celulozie i w jej otoczeniu) jest niezbędna aby można było rozpocząć pomiary mające na celu ocenę zawilgocenia izolacji celulozowej transformatora po wymianie cieczy izolacyjnej.

Pomiary zostały przeprowadzone dla temperatury  $50^{\circ}\text{C}$ , mieszczącej się w zakresie typowej temperatury pracy transformatora energetycznego.

## 3. OBIEKT BADAŃ

Badania wykonano na próbkach preszpanu o gęstości  $1,2\text{ g/cm}^3$ , oleju mineralnego i estru syntetycznego. W ramach przygotowania próbek do badań preszpan oraz cieczy elektroizolacyjne zostały poddane procesowi suszenia w komorze próżniowej, a następnie były kondycjonowane w komorze klimatycznej w temperaturze  $50^{\circ}\text{C}$  aż do osiągnięcia zawilgocenia preszpanu na poziomie około 3,5%. Kondycjonowanie próbek preszpanu i cieczy elektroizolacyjnych w tych samych warunkach i czasie pozwoliło utrzymać stan równowagi w układzie izolacyjnym

## 4. PROCEDURA BADAŃ

Badaną próbkę umieszczono między elektrodami w szczelnym naczyniu napełnionym cieczą elektroizolacyjną (rys. 1), które przez cały czas badania znajdowało się w komorze termicznej (rys. 2) o stałej temperaturze  $50^{\circ}\text{C}$ . W okresie pomiędzy pomiarami odpowiedzi dielektrycznej próbki (metodą FDS) elektrody były odsunięte od próbki preszpanu (rys. 3), w celu umożliwienia swobodnego przepływu cieczy wokół badanej próbki i jej penetrowania w głąb tej próbki.



Rys. 1. Szczelne naczynie wraz z próbką preszpanową umieszczoną między elektrodami

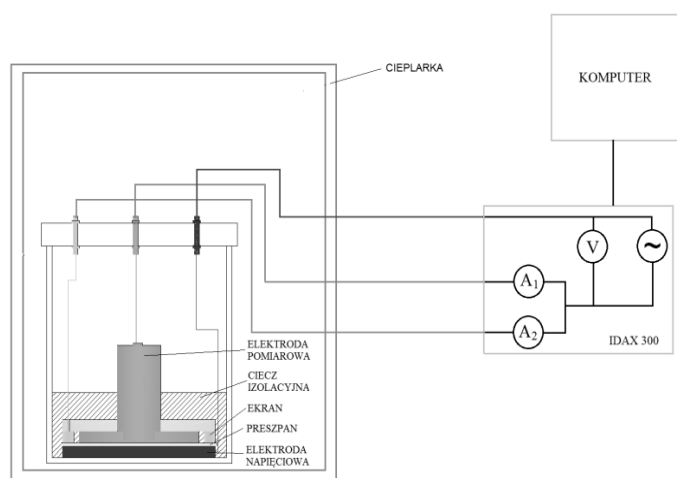


Rys. 2. Komora klimatyczna użyta w badaniach



Rys. 3. Naczynie szklane wraz z próbką preszpanową i rozsuniętymi elektrodami – położenie elektrod pomiędzy pomiarami

- Prace badawcze przeprowadzono według następującej procedury:
- przygotowanie próbki preszpanowej i cieczy elektroizolacyjnych,
  - kondycjonowanie próbek i cieczy elektroizolacyjnych,
  - umieszczenie próbki preszpanowej na stanowisku badawczym,
  - zbadanie odpowiedzi dielektrycznej preszpanu zanurzonego w oleju mineralnym (schemat systemu pomiarowego przedstawiono na rys. 4)
  - wymiana oleju mineralnego na ester syntetyczny,
  - badanie odpowiedzi dielektrycznej próbki – powtarzane co kilka dni.

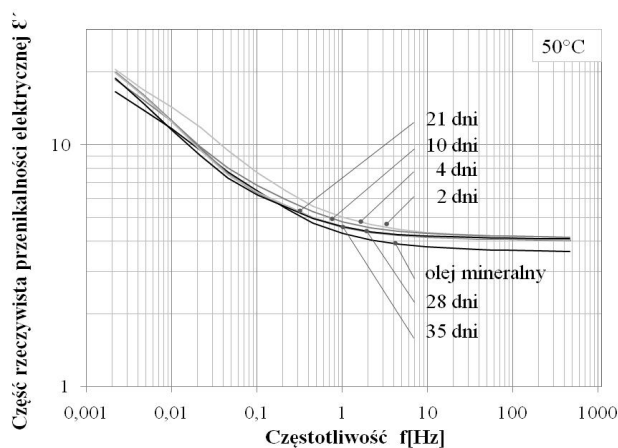


Rys. 4. Schemat systemu pomiarowego

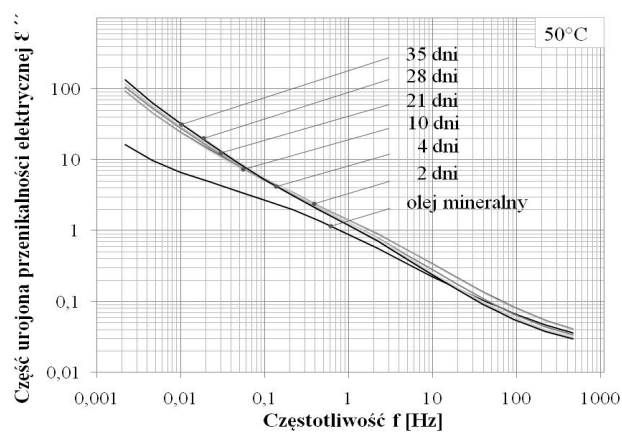
## 5. WYNIKI BADAŃ

Na rysunkach 5 i 6 zestawiono odpowiedzi dielektryczne układu izolacyjnego preszpan-ciecz elektroizolacyjna dla różnych chwil czasowych od dnia wymiany oleju mineralnego na ester syntetyczny. Widzimy na nich sukcesywną zmianę kształtu charakterystyk, spowodowaną przesycaeniem próbki preszpanowej nową cieczą elektroizolacyjną.

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono odpowiedź dielektryczną układu izolacyjnego preszpan-ciecz elektroizolacyjna przed i po wymianie oleju mineralnego na ester syntetyczny w funkcji liczby dni od wymiany cieczy, dla wybranej częstotliwości 0,1 Hz. Dla tej częstotliwości zarejestrowano największe zmiany odpowiedzi dielektrycznej między kolejnymi pomiarami. Można zauważyć, że największe zmiany odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego po wymianie cieczy elektroizolacyjnych zachodzą dla części rzeczywistej przenikalności elektrycznej  $\mathcal{E}'$ . Natomiast część urojona przenikalności elektrycznej  $\mathcal{E}''$  od drugiego dnia po wymianie cieczy praktycznie się już nie zmienia.



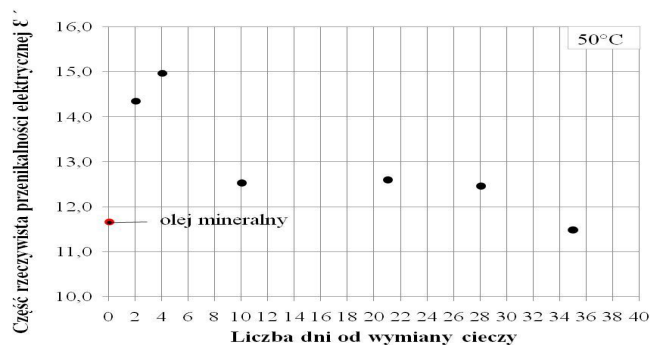
Rys. 5. Odpowiedź dielektryczna układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły przed i po wymianie oleju mineralnego na ester syntetyczny – część rzeczywista  $\epsilon'$



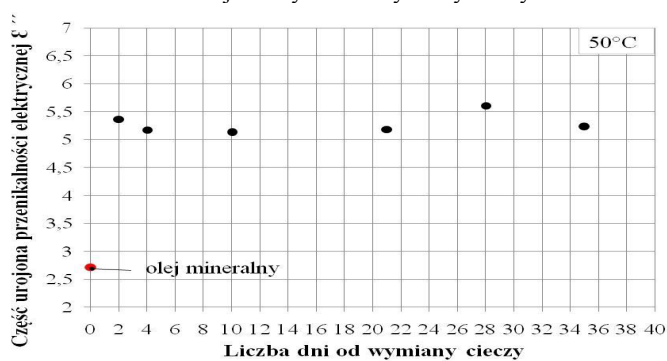
Rys. 6. Odpowiedź dielektryczna układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły przed i po wymianie oleju mineralnego na ester syntetyczny – część urojona  $\epsilon''$

Z wykresów wynika także, że po około 10 dniach od wymiany cieczy odpowiedź dielektryczna układu izolacyjnego praktycznie się już nie zmieniała, co świadczy o ustaleniu się w nim nowego stanu równowagi.

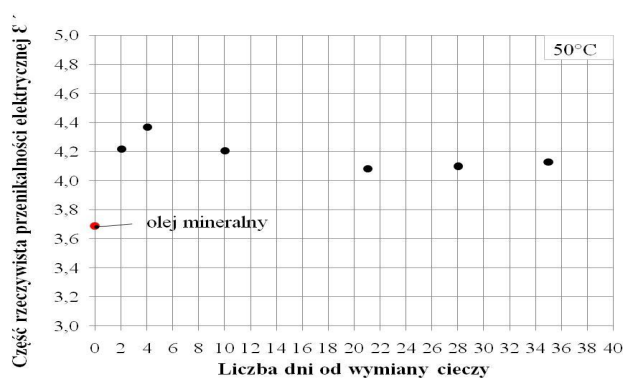
Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono takie same charakterystyki jak na rysunkach poprzednich ale dla wybranej częstotliwości 50 Hz. Największe różnice między kolejnymi wynikami pomiarów występują dla części urojonej przenikalności elektrycznej  $\epsilon''$ . W tym przypadku można zauważyć pewne ustabilizowanie się wyników pomiarów po około 20 dniach od wymiany cieczy izolacyjnych.



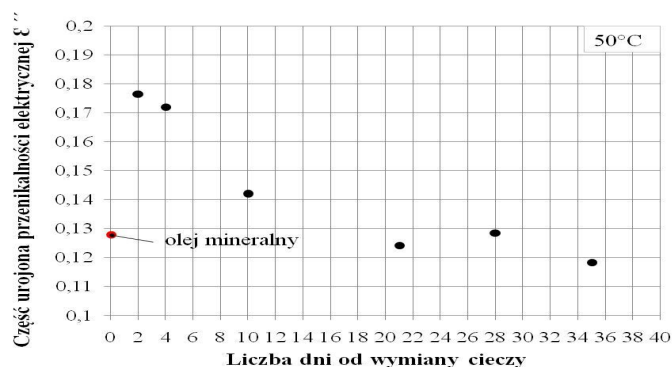
Rys. 7. Część rzeczywista przenikalności elektrycznej  $\epsilon'$  dla częstotliwości 0,1 Hz układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły przed i po wymianie oleju mineralnego na ester syntetyczny w funkcji liczby dni od wymiany cieczy



Rys. 8. Część urojona przenikalności elektrycznej  $\epsilon''$  dla częstotliwości 0,1 Hz układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły przed i po wymianie oleju mineralnego na ester syntetyczny w funkcji liczby dni od wymiany cieczy



Rys. 9. Część rzeczywista przenikalności elektrycznej  $\epsilon'$  dla częstotliwości 50 Hz układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły przed i po wymianie oleju mineralnego na ester syntetyczny w funkcji liczby dni od wymiany cieczy



Rys. 10. Część urojona przenikalności elektrycznej  $\epsilon''$  dla częstotliwości 50 Hz układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły przed i po wymianie oleju mineralnego na ester syntetyczny w funkcji liczby dni od wymiany cieczy

## 6. WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wynika, że po wymianie oleju mineralnego na ester syntetyczny w transformatorze energetycznym osiągnięcie nowego stanu równowagi w układzie izolacyjnym preszpan-ciecz dielektryczna jest procesem długotrwałym. Dla temperatury 50°C trwa on około 20 dni. Przez ten czas ocena zawilgocenia układu izolacyjnego preszpan-mieszanina oleju mineralnego i estru syntetycznego z wykorzystaniem charakterystyk wzorcowych będzie obciążona pewnym dodatkowym błędem wynikającym z różnego składu chemicznego cieczy napełniającej celulozę i cieczy będącej na zewnątrz celulozy.

## 7. LITERATURA

- [1] CIGRE Brochure nr 436, Experiences in service with new insulating liquid, 2010.
- [2] MIDEL 7131 synthetic ester transformer fluid – Product guide, M&I Materials, [www.midel.com](http://www.midel.com) z dnia 12.05.2016.
- [3] Fatyga P., Dielectric response change of pressboard immersed with mineral oil after replacing insulating liquid with synthetic ester, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 113 (2016) 012001.
- [4] Bugajny K., Dałek J. i Pinkiewicz I., Diagnostyka stanu zawilgocenia izolacji transformatorów zmodyfikowaną metodą  $C_2/C_{50}$ , Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje, nr 1'2004.
- [5] Morańda H. i Koch M., Program do analizy odpowiedzi częstotliwościowej (FDS) dielektryków, Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje, nr 1/2006.
- [6] Gielniak J. i Morańda H., Dynamika zawilgocenia izolacji transformatorów energetycznych w zależności od konstrukcji, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 10 (2014).

**THE DYNAMICS OF EXCHANGE OF MINERAL OIL TO SYNTHETIC ESTER  
IN CELLULOSE INSULATION OF TRANSFORMER**

Replacing the whole mineral oil with synthetic ester in the transformer is technically impossible, because in the tank of the transformer will always remain a small amount of mineral oil. In this situation, the determination of the moisture degree in transformer solid insulation using the FDS method is performed with systematic error. The error can be corrected but determined coefficient factors will can be applied only after reaching equilibrium state in a transformer, that requires some time. The article presents the preliminary results of the research, whose purpose is estimation the time required for saturation of cellulose insulation with mixture consist of a new liquid and residual mineral oil.

*(Received: 27. 01. 2017, revised: 15. 02. 2017)*