

Wpływ grubości preszpanu na tempo penetracji estru syntetycznego w układzie izolacyjnym preszpan-olej mineralny po wymianie cieczy

Streszczenie. Artykuł przedstawia wyniki badań, mających na celu ustalenie tempa penetracji estru syntetycznego w preszpanie, w układzie izolacyjnym preszpan-olej mineralny po zamianie cieczy, w zależności od grubości preszpanu. Badania przeprowadzono dla temperatury 70 °C, a ich wyniki opisano równaniem. Do oceny tempa zmian w badanym układzie izolacyjnym posłużono się metodą DFR.

Abstract. The article presents the results of investigations aimed at determining the synthetic ester speed of penetration in the pressboard, in the mineral oil-pressboard insulation system after liquid exchange, depending on the thickness of the pressboard. The tests were carried out at a temperature of 70 °C, and their results were described in an equation. The DFR method was used to assess the rate of changes in the investigated insulating system (Pressboard thickness influence on the speed of penetration of the synthetic ester in a mineral oil-pressboard insulating system after an exchange of the liquids).

Słowa kluczowe: odpowiedź dielektryczna, metoda DFR, olej mineralny, ester syntetyczny.

Keywords: dielectric response, DFR method, mineral oil, synthetic ester.

Wstęp

W ostatnich latach można zaobserwować wzrost zainteresowania wykorzystaniem estrów do izolowania transformatorów energetycznych [1]. Estry, zarówno syntetyczne jak i naturalne, cechuje wiele zalet. Należą do nich: wysoka wytrzymałość elektryczna, wysoka rozpuszczalność wody, wysoka temperatura zapłonu par, nietoksyczność, biodegradowalność, wydłużanie czasu życia izolacji celulozowej, bardzo dobra mieszalność z olejem mineralnym i inne. Ich największą wadą jest wciąż jeszcze wysoka cena, kilkukrotnie wyższa niż oleju mineralnego.

Z powodu zalet estrów syntetycznych produkowane są już transformatory, które są nimi napelnione. W wielu jednostkach już eksploatowanych dokonano wymiany oleju mineralnego na ester. Najczęściej celem tego zabiegu była chęć poprawy bezpieczeństwa pożarowego i ekologicznego transformatora w miejsca jego zainstalowania [1, 2]. Jednak dodatkowym efektem jest zmniejszenie zawilgocenia izolacji celulozowej tych jednostek, co jest skutkiem ogromnej rozpuszczalności wody w estrze syntetycznym, około 35-krotnie większej niż w oleju mineralnym [3].

Niniejsza praca dotyczy jednego z problemów związanych z wymianą oleju mineralnego na ester syntetyczny w transformatorze, a mianowicie sposobu oceny zawilgocenia jego izolacji celulozowej. Ponieważ wysokie zawilgocenie izolacji jest jednym z najpoważniejszych zagrożeń dla transformatora, to jego ocena jest kluczowa podczas podejmowaniu decyzji o odwołaniu zabiegów eksploatacyjnych względem danej jednostki.

Oceny zawilgocenia izolacji celulozowej transformatora najczęściej dokonuje się z wykorzystaniem metody pośredniej DFR (ang. *Dielectric Frequency Response*), kiedyś nazywanej FDS (ang. *Frequency Domain Spectroscopy*). Metoda ta polega na pomiarze pojemności zespolonej C' i C'' lub strat dielektrycznych $\tan\delta$ w zakresie częstotliwości od 10^{-4} do 10^3 Hz. Wyniki pomiarów odnosi się następnie do charakterystyk wzorcowych, bazujących na próbkach modelowych o dokładnie znanej temperaturze i zawilgoceniu [4, 5], w wyniku czego otrzymuje się wartość zawilgocenia izolacji celulozowej badanego transformatora.

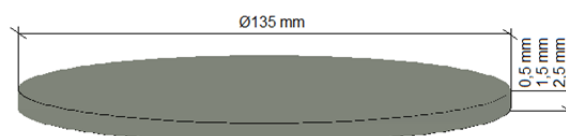
Wykorzystanie metody DFR do oceny zawilgocenia izolacji transformatora po wymianie oleju mineralnego na ester syntetyczny napotyka na pewne trudności. Po pierwsze, krzywe modelowe, do których odnosi się wyniki

pomiarów, zostały wyznaczone dla próbek preszpanu nasyconych czystym olejem mineralnym albo czystym estrem. W transformatorze po wymianie oleju mineralnego na ester syntetyczny zawsze pozostanie pewna ilość oleju mineralnego. W zależności od techniki i czasu opróżniania transformatora z oleju, może być to od 1,7 do 9,7% [6]. Może to utrudnić interpretację wyników badań jego odpowiedzi dielektrycznej ale problem ten można rozwiązać, przez opracowanie współczynników poprawkowych [7]. Drugi problem wynika z dynamiki procesu penetracji estru syntetycznego w układ izolacyjny preszpan-olej mineralny. Zastosowanie metody DFR do oceny zawilgocenia izolacji stałej wymaga stanu równowagi zawilgocenia między celulozą i izolacją ciekłą. Osiągnięcie tego stanu wymaga pewnego czasu, na co wpływ mają, przede wszystkim, grubość izolacji stałej i temperatura.

Celem przedstawionych badań była ocena wpływu grubości preszpanu na czas penetrowania estru syntetycznego w układ izolacyjny preszpan-olej mineralny po wymianie cieczy dielektrycznej. W pracy założono, że czas ten jest tożsamy z czasem ustania zmian odpowiedzi dielektrycznej próbek. Następuje to wtedy, gdy stężenie oleju mineralnego w estrze jest takie samo wewnątrz próbki preszpanowej jak w cieczy ją otaczającej. Oczywiście, na zmiany w czasie odpowiedzi dielektrycznej układu celuloza-ciecz ma również proces ustalania się stanu równowagi zawilgocenia między różnie zawilgoconymi próbkami celulozy i cieczy. W badaniach zjawisko to zostało wyeliminowane przez wspólne kondycjonowanie próbek preszpanu i cieczy izolacyjnych, w wyniku czego ich zawilgocenie względne było takie samo.

Eksperyment

Badanie przeprowadzono na próbkach preszpanu o gęstości 1,2 g/cm³ i grubości: 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm (rys.1), zanurzonych początkowo w oleju mineralnym a następnie w estrze syntetycznym.



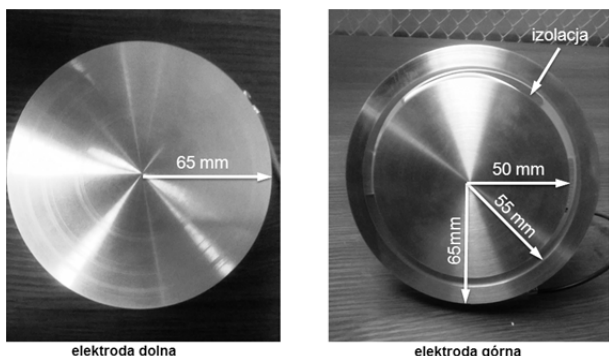
Rys.1. Wymiary próbki preszpanu

Preszpan do badań został przygotowany w następujący sposób:

- suszenie w komorze próżniowej, w temperaturze 100°C, przez 4 godziny,
- umieszczenie suchych próbek w naczyniu wypełnionym olejem mineralnym – impregnacja,
- kondycjonowanie układu izolacyjnego preszpan-olej mineralny w komorze klimatycznej – w celu upewnienia się, że został osiągnięty stan równowagi zawilgocenia w preszpanie i cieczy.

Do badań odpowiedzi dielektrycznej próbek wykorzystano układ trójelektrodowy o wymiarach pokazanych na rysunku 2.

W trakcie eksperymentu, badana próbka preszpanu wraz z elektrodami znajdowały się w szczelnym naczyniu wypełnionym cieczą elektroizolacyjną (rys.3). Naczynie to przez cały okres badań znajdowało się w komorze termicznej, w której panowała stała temperatura 70°C (rys. 4).



Rys.2. Wymiary elektrod pomiarowych



Rys.3. Naczynie z umieszczonymi w nim elektrodami i próbkami preszpanowymi

W czasie pomiędzy kolejnymi pomiarami elektrody były odsuwane od siebie na odległość około 1,5 cm, w celu umożliwienia swobodnego penetrowania przez ester syntetyczny próbki preszpanowej (rys.5).



Rys.4. Komora termiczna wykorzystana w badaniach

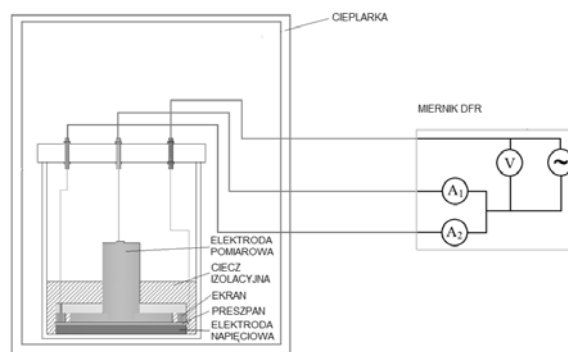
Procedura pomiarowa

Badanie zrealizowano według następującej procedury:

- przygotowanie próbek preszpanowych i cieczy elektroizolacyjnych,
- zbadanie metodą DFR odpowiedzi dielektrycznej układu preszpan-olej mineralny, w układzie pomiarowym pokazanym na rysunku 6,
- wymiana oleju mineralnego na ester syntetyczny,
- dalsze badanie odpowiedzi dielektrycznej próbek; badanie to było powtarzane co kilka dni, aż do osiągnięcia nowego stanu równowagi.



Rys.5. Położenie elektrod pomiarowych między pomiarami

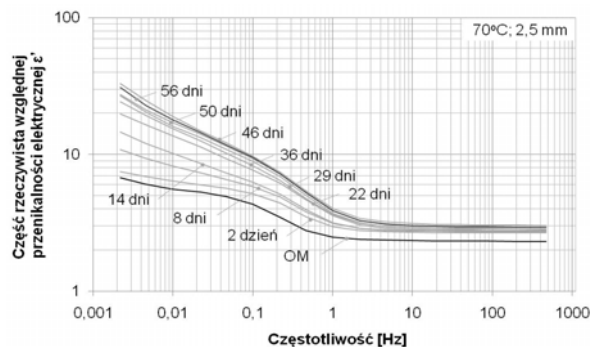


Rys.6. Schemat systemu pomiarowego

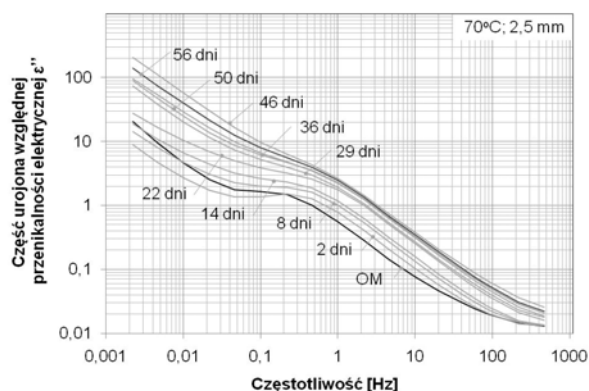
Wyniki badań

Preszpan o grubości 2,5 mm

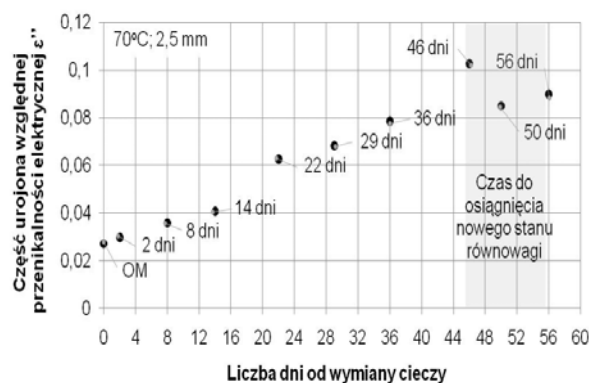
Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono odpowiedź dielektryczną układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły na chwilę przed oraz po wymianie oleju mineralnego na ester syntetyczny. Widoczne są na nich skutki stopniowego penetrowania estru syntetycznego w układ izolacyjny preszpan-olej mineralny. Aby łatwiej można było zauważyć zmiany odpowiedzi dielektrycznej w czasie wybrano dwie częstotliwości pomiarowe dla których te zmiany są szczególnie widoczne: 0,1 Hz i 50 Hz. Na rysunkach 9 i 10 pokazano wartości części rzeczywistej i urojonej przenikalności elektrycznej badanego układu izolacyjnego dla częstotliwości 0,1 Hz, a na rysunkach 11 i 12 dla 50 Hz.



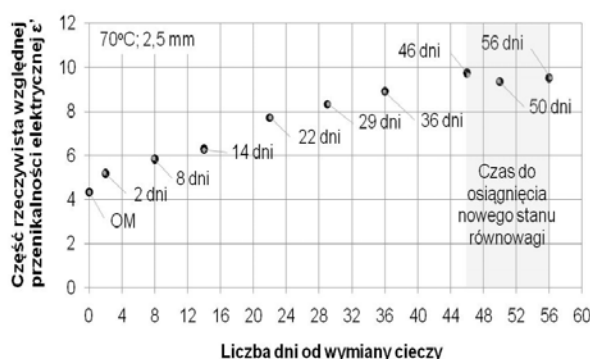
Rys.7. Charakterystyki ϵ' w zależności od częstotliwości dla różnych wartości czasu od chwili wymiany oleju mineralnego na ester syntetyczny



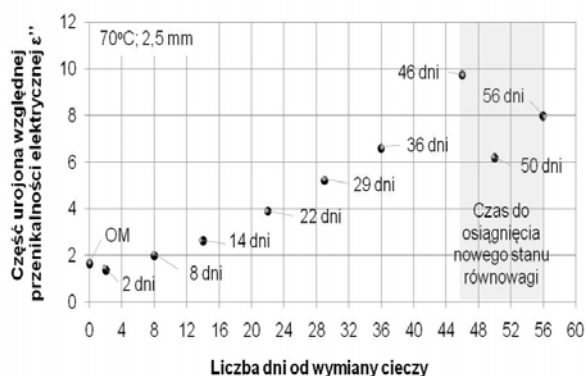
Rys.8. Charakterystyki ϵ'' w zależności od częstotliwości dla różnych wartości czasu od chwili wymiany oleju mineralnego na ester syntetyczny



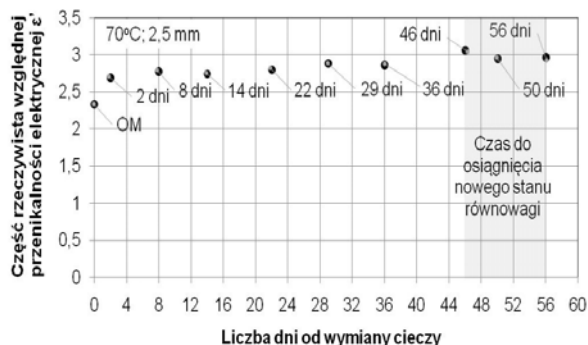
Rys.12. Charakterystyki ϵ'' dla częstotliwości 50 Hz układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły w funkcji liczby dni od wymiany cieczy



Rys.9. Charakterystyki ϵ' dla częstotliwości 0,1 Hz układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły w funkcji liczby dni od wymiany cieczy



Rys.10. Charakterystyki ϵ'' dla częstotliwości 0,1 Hz układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły w funkcji liczby dni od wymiany cieczy

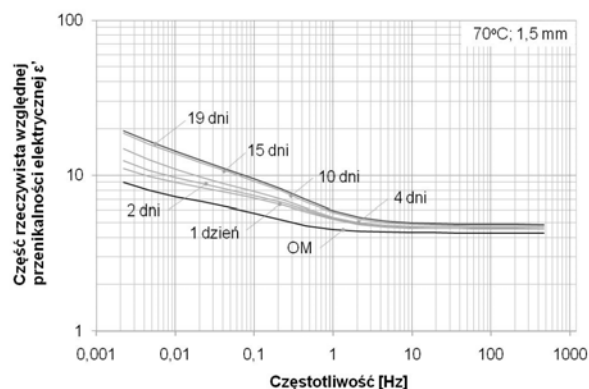


Rys.11. Charakterystyki ϵ' dla częstotliwości 50 Hz układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły w funkcji liczby dni od wymiany cieczy

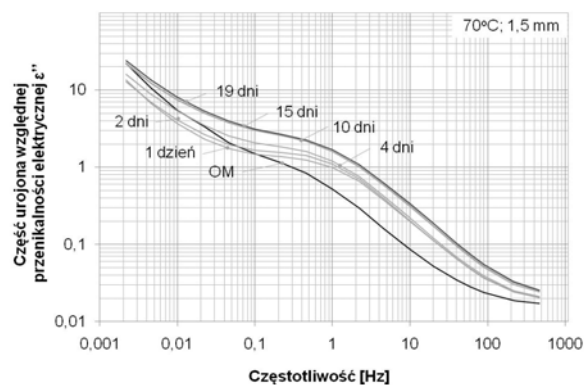
Przeprowadzona analiza otrzymanych charakterystyk pozwala stwierdzić, że w temperaturze 70°C proces penetrowania estru syntetycznego w preszpan o grubości 2,5 mm, nasycony uprzednio olejem mineralnym, ulega zakończeniu po około 46-56 dniach od chwili wymiany cieczy elektroizolacyjnej.

Preszpan o grubości 1,5 mm.

Na rysunkach 13 i 14 przedstawiono wyniki takich samych badań ale dla próbek preszpanowych o grubości 1,5 mm. Jak można się domyśleć, z uzyskanych przebiegów wynika, że nowy stan równowagi zostaje osiągnięty w czasie krótszym niż dla preszpanu o grubości 2,5 mm.

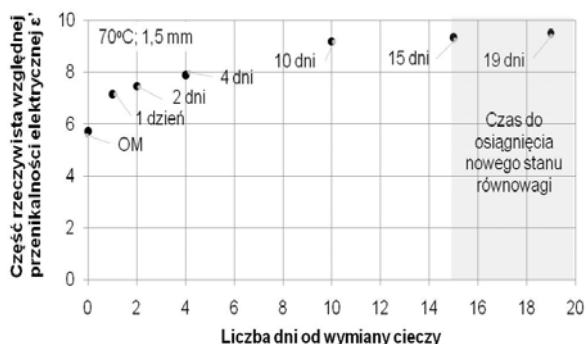


Rys.13. Charakterystyki ϵ' w zależności od częstotliwości dla różnych wartości czasu od chwili wymiany oleju mineralnego na ester syntetyczny

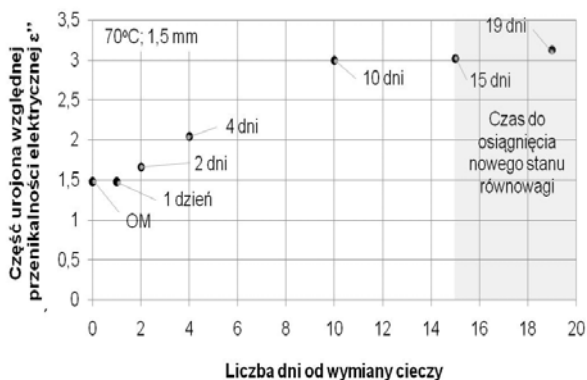


Rys.14. Charakterystyki ϵ'' w zależności od częstotliwości dla różnych wartości czasu od chwili wymiany oleju mineralnego na ester syntetyczny

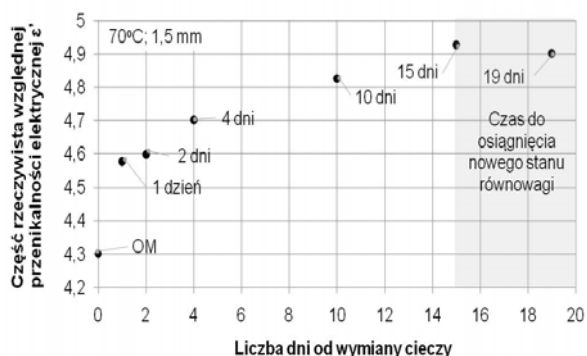
Na kolejnych rysunkach pokazano wartości części rzeczywistej i urojonej przenikalności elektrycznej badanego układu izolacyjnego dla częstotliwości 0,1 Hz (rys.15 i 16) oraz 50 Hz (rys.17 i 18).



Rys.15. Charakterystyki ϵ' dla częstotliwości 0,1 Hz układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły w funkcji liczby dni od wymiany cieczy



Rys.16. Charakterystyki ϵ'' dla częstotliwości 0,1 Hz układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły w funkcji liczby dni od wymiany cieczy



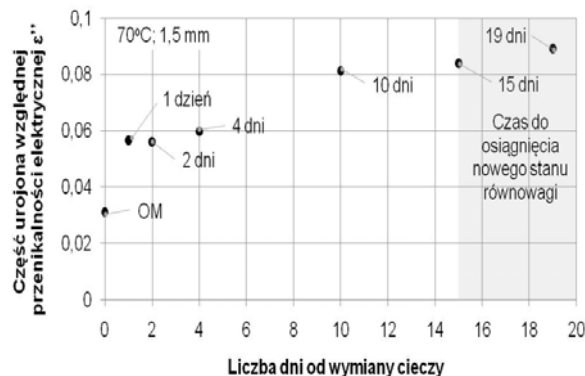
Rys.17. Charakterystyki ϵ' dla częstotliwości 50 Hz układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły w funkcji liczby dni od wymiany cieczy

Z analizy przedstawionych przebiegów wynika, że w temperaturze 70°C ester syntetyczny penetrujący preszpan o grubości 1,5 mm potrzebuje około 19 dni na uzyskanie nowego stanu równowagi.

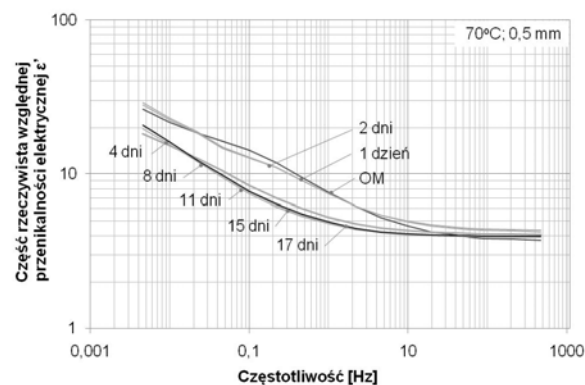
Preszpan o grubości 0,5 mm.

Na kolejnych rysunkach przedstawiono wyniki badań dla preszpanu o grubości 0,5 mm. Rysunek 19 przedstawia część rzeczywistą odpowiedzi dielektrycznej próbki, natomiast rysunek 20 część urojoną. Z pomiarów wynika,

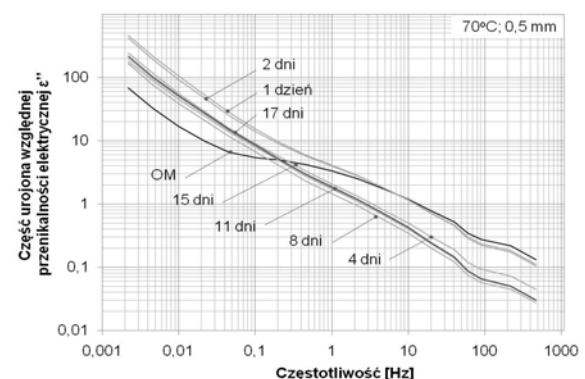
że proces ustalania się nowego stanu równowagi w badanym układzie izolacyjnym przebiega jeszcze krócej niż w przypadkach opisanych poprzednio. Potwierdzają to kolejne rysunki, na których przedstawiono odpowiedź dielektryczną badanego układu izolacyjnego dla wybranych wartości częstotliwości: 0,1 Hz (rys.21 i 22) oraz 50 Hz (rys.23 i 24). Wynika z nich, że zakończenie zmian odpowiedzi dielektrycznej, a więc ustalenie nowego stanu równowagi układu, następuje po około 8-13 dniach od zamiany cieczy izolacyjnych.



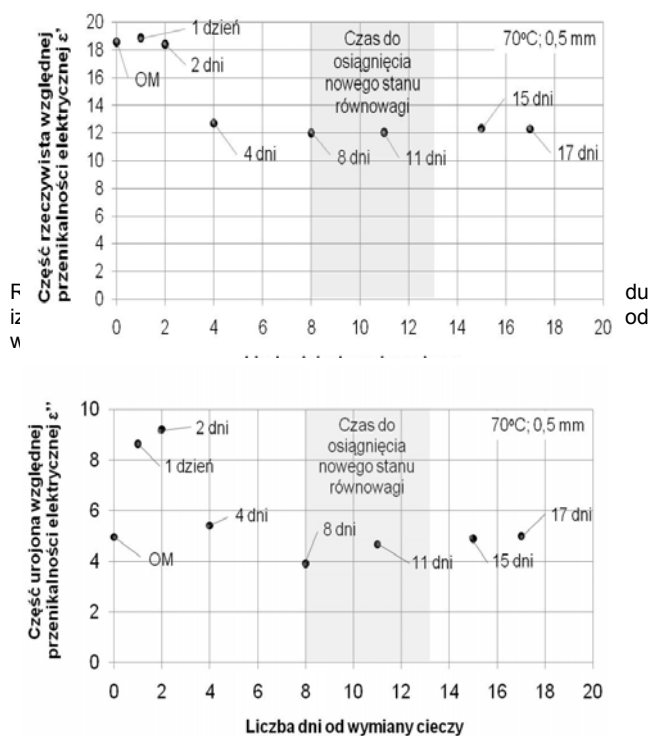
Rys.18. Charakterystyki ϵ'' dla częstotliwości 50 Hz układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły w funkcji liczby dni od wymiany cieczy



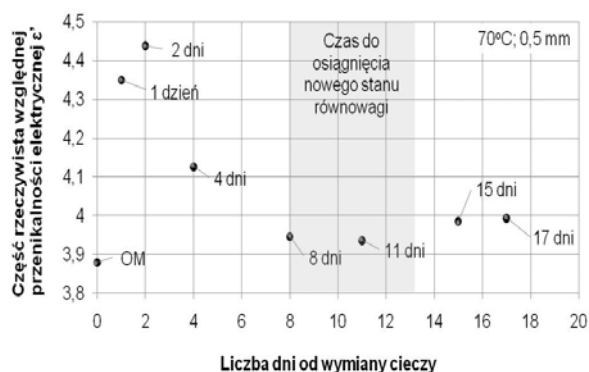
Rys.19. Charakterystyki ϵ' w zależności od częstotliwości dla różnych wartości czasu od chwili zamiany oleju mineralnego na ester syntetyczny



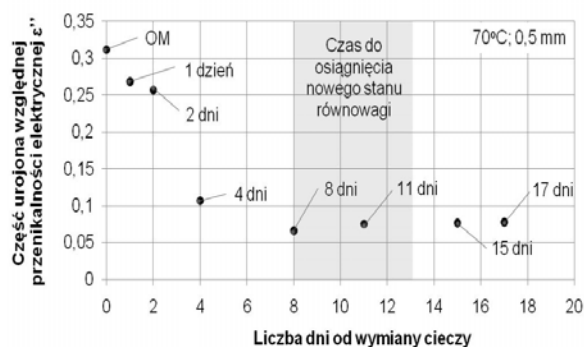
Rys.20. Charakterystyki ϵ'' w zależności od częstotliwości dla różnych wartości czasu od chwili wymiany oleju mineralnego na ester syntetyczny



Rys.22. Charakterystyki ε'' dla częstotliwości 0,1 Hz układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły w funkcji liczby dni od wymiany cieczy



Rys.23. Charakterystyki ε' dla częstotliwości 50 Hz układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły w funkcji liczby dni od wymiany cieczy



Rys.24. Charakterystyki ε'' dla częstotliwości 50 Hz układu izolacyjnego preszpan-dielektryk ciekły w funkcji liczby dni od wymiany cieczy

Wyniki badań odpowiedzi dielektrycznej próbek preszpanu o różnej grubości zestawiono w tabeli 1. Na jej podstawie sporządzono wykres, pokazany na rysunku 25.

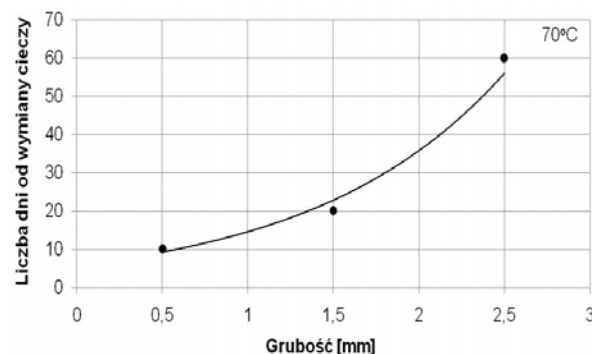
Do punktów pomiarowych dopasowano krzywą, którą opisano równaniem (1):

$$(1) \quad t = 5,971e^{0,895g}$$

gdzie: t – liczba dni od wymiany cieczy, g – grubość preszpanu.

Tab. 1. Zestawienie wyników badań

Grubość preszpanu [mm]	Czas do zakończenia penetrowania estru syntetycznego w próbce preszpanowej nasyconej olejem mineralnym, a następnie zalanej estrum syntetycznym [dni]
0,5	8-13
1,5	15-25
2,5	46-56



Rys.25. Czas penetrowania estru syntetycznego w preszpanie nasyconym olejem mineralnym w zależności od grubości preszpanu

Wnioski

Ester syntetyczny, którym zastąpiono olej mineralny w układzie izolacyjnym typu papier-ciecz izolacyjna, penetruje ten układ stosunkowo wolno. Czas zakończenia tego procesu bardzo zależy od grubości preszpanu. Z badań wykonanych w temperaturze 70°C wynika, że zakończenie tego procesu następuje po około:

- 10 dniach, dla preszpanu o grubości 0,5 mm,
- 20 dniach, dla preszpanu o grubości 1,5 mm,
- 60 dniach, dla preszpanu o grubości 2,5 mm.

Należy mieć na uwadze, że w niższej temperaturze czas ten będzie znacznie dłuższy.

Długi czas penetrowania estru syntetycznego w układ izolacyjny preszpan-olej mineralny utrudnia prawidłową ocenę zawilgocenia izolacji stałej transformatora po wymianie cieczy izolacyjnej. Jednak z drugiej strony, krótkotrwała wymiana oleju na ester, w celu wysuszenia celulozy, a następnie ponowne zalanie transformatora olejem mineralnym, nie powinno być przeszkodą w ocenie zawilgocenia jednostki metodą DFR, opartej na krzywych wzorcowych powstałych dla układu izolacyjnego typu papier-czysty olej mineralny.

Przeprowadzone badania umożliwiły opisanie prostym równaniem (1) zależność między grubością preszpanu i czasem ustalenia nowego stanu równowagi po wymianie oleju mineralnego na ester syntetyczny dla jednej wartości temperatury, to jest 70°C. Autorzy planują wykonanie badań także dla innych wartości temperatury.



Fundusze Europejskie
Inteligentny Rozwój



Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego



Artykuł pt. „Wpływ grubości preszpanu na tempo penetracji estru syntetycznego w układzie izolacyjnym preszpan-olej mineralny po wymianie cieczy” finansowany przez

Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ze środków Poddziałania 4.1.2 „Regionalne agendy naukowo-badawcze” w ramach projektu POIR.04.01.02-00-0045/17-00 pt. „Mobilny system suszenia izolacji transformatorów rozdzielczych z wykorzystaniem medium ciekłego”.



UNIWERSYTET
IM. ADAMA MICKIEWICZA
W POZNANIU



Odnowienie energii - Ekologia - Błogo

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; 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.

LITERATURA

- [1] Experiences in service with new insulating liquid, *CIGRE Brochure*, nr 436, 2010

- [2] MDEL 7131 synthetic ester transformer fluid – Product guide, *M&I Materials*, www.midel.com, data dostępu: 15.05.2018 r.
- [3] Przybyłek P., Rozpuszczalność wody w estrze syntetycznym oraz mieszanie estru z olejem mineralnym w aspekcie suszenia izolacji celulozowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 92, nr 10/2016, 92-95
- [4] Morańda H., Koch M., Program do analizy odpowiedzi częstotliwościowej (FDS) dielektryków, *Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje*, nr 1/2006, 156-162
- [5] Gielniak J., Morańda H., Dynamika zawilgocenia izolacji transformatorów energetycznych w zależności od konstrukcji, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 90, nr 10/2014, 27-30
- [6] Fatyga P., Morańda H., Ocena składu procentowego mieszaniny oleju mineralnego i estru syntetycznego po wymianie oleju na ester w transformatorze energetycznym, *Międzynarodowa konferencja transformatorowa Transformator'17*, Toruń, 09-11.05.2017, 233-242
- [7] Fatyga P., Morańda H., Odpowiedź dielektryczna w dziedzinie częstotliwości układu izolacyjnego celuloza-mieszanina estru syntetycznego i oleju mineralnego, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 92, nr 10/2016, 38-41.