

Rezystywność powierzchniowa preszpanu zanurzonego w oleju mineralnym lub estrze syntetycznym

Streszczenie. Tematem artykułu jest rezystywność powierzchniowa preszpanu zanurzonego w oleju mineralnym lub estrze syntetycznym. Zmiany rezystywności powierzchniowej zależą od kierunku migracji wody. Migracji wody z celulozy do cieczy towarzyszy wzrost rezystywności, natomiast migracji wody z cieczy do celulozy – spadek rezystywności. Preszpan sycony olejem mineralnym przeniesiony do estru syntetycznego wykazuje skokowy wzrost rezystywności, co jest bardzo korzystne, ale wymaga wyjaśnienia i dalszych badań.

Abstract. The subject of the article is the surface resistivity of pressboard immersed in mineral oil or synthetic ester. The changes of surface resistivity depend on the direction of water migration. The consequence of water migration from the cellulose into a liquid is the increase of the resistivity, while the migration of water from the liquid into the cellulose results in the decrease of the resistivity. Pressboard impregnated with mineral oil transferred to synthetic ester shows a sharp rise in resistivity, which is very beneficial, but requires clarification and further research. (**Surface resistivity of pressboard immersed in mineral oil or synthetic ester**).

Słowa kluczowe: rezystywność powierzchniowa, ester syntetyczny, olej mineralny

Keywords: surface resistivity, synthetic ester, mineral oil

Wprowadzenie

Temat jest związany z aktualnym na świecie problemem wymiany oleju mineralnego w transformatorze rozdzielczym na ester syntetyczny. Zastąpienie oleju mineralnego cieczą alternatywną jest podyktowane głównie bezpieczeństwem pożarowym oraz względami ekologicznymi.

Estry syntetyczne mają wysoką temperaturę zapłonu par i temperaturę palenia. Odznaczają się stosunkowo szybką biodegradowalnością w warunkach naturalnych oraz są nietoksyczne.

W dokumentach CIGRE do cieczy alternatywnych zalicza się estry naturalne, estry syntetyczne oraz silikony [1]. Wszystkie te ciecze są stosowane w warunkach, w których pożar transformatora stanowi ogromne zagrożenie.

Pierwszy transformator rozdzielczy napełniony estrem syntetycznym wyprodukowano w 1978 r. Z biegiem lat coraz więcej firm wykonywało transformatory rozdzielcze z estrem syntetycznym. Od lat 90-tych XX w. pojawiają się w kilku krajach transformatory z estrem syntetycznym, których liczba na całym świecie wynosi łącznie kilka tysięcy sztuk. W 2003 r. wyprodukowano pierwszy transformator sieciowy dużej mocy z estrem syntetycznym.

Oprócz produkcji nowych transformatorów z estrem syntetycznym pojawiła się koncepcja wymiany oleju mineralnego na ester syntetyczny w transformatorach już eksploatowanych. Do tej operacji typowane są transformatory o średnim stopniu wyeksploatowania, mające dwadzieścia-trzydzieści lat, a nawet czterdzieści.

Na całym świecie 12 krajów stosuje ciecze alternatywne, ale względna liczba transformatorów z wymienionym dielektrykiem ciekłym stanowi ułamek procenta ogółu transformatorów. Rekordzistą w tym względzie są Niemcy, gdzie do 2010 r. wymieniono olej mineralny na ester syntetyczny w 351 transformatorach rozdzielczych, natomiast transformatorów rozdzielczych nowych z estrem syntetycznym było 2572 sztuk [1].

Zwolennicy tradycyjnych rozwiązań stawiają pytania, czy wymiana oleju na ester nie wpływa negatywnie na podstawowe wielkości opisujące układ izolacyjny. Jedną z takich wielkości jest rezystywność powierzchniowa preszpanu. Jest to wielkość decydująca o upływności, o współczynniku strat dielektrycznych, ale też o wyładowaniach niezupełnych, które na powierzchni preszpanu mogą być bardzo agresywne, doprowadzając do awarii.

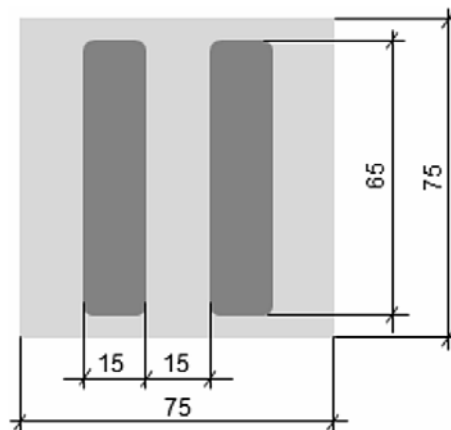
Analizując rezystywność powierzchniową preszpanu zanurzonego w oleju mineralnym oraz w estrze syntetycznym trzeba wziąć pod uwagę skomplikowane zjawiska rozpuszczalności wody w obu cieczach [2, 3, 4], równowagę zawilgocenia układu celuloza-olej mineralny oraz celuloza-ester syntetyczny [3, 5-8] oraz zjawisko będące skutkiem dwóch wymienionych, a mianowicie migrację wody z celulozy do cieczy lub odwrotnie [9, 10]. Odpowiedzią na migrację wody są zmiany rezystywności powierzchniowej preszpanu. Oczywiście, migracja wody z preszpanu do cieczy powinna powodować wzrost rezystywności powierzchniowej, a migracja wody z cieczy do preszpanu – jej spadek.

Problem oceny zmian rezystywności powierzchniowej znacznie się komplikuje w przypadku przeniesienia preszpanu z oleju mineralnego do estru syntetycznego, co odpowiada wymianie w transformatorze oleju na ester.

Ujęcie ilościowe zmian rezystywności powierzchniowej w różnych sytuacjach, odpowiadających różnym kierunkom migracji wody, wymaga eksperymentu, którego wyniki przedstawiono poniżej.

Obiekty badań

Próbki do badań wykonano z preszpanu o grubości 1 mm i gęstości 1,0 g/cm³. Elektrody wykonane z folii miedzianej zostały naklejone na preszpan. Wymiary próbki i elektrod przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Wymiary próbki preszpanowej oraz elektrod z folii miedzianej

Próbki preszpanowe z naklejonymi elektrodami zostały poddane odpowiedniej preparacji. W pierwszym kroku próbki impregnowano olejem mineralnym lub estrem syntetycznym. Następnie, wykorzystując komorę klimatyczną o regulowanej wilgotności i temperaturze, kondycjonowano próbki preszpanu oraz cieczy, w taki sposób, aby uzyskać założone ich zawilgocenie. Zaprojektowano trzy warianty zawilgocenia komponentów stałych i ciekłych, charakteryzujące się możliwością migracji wody z celulozy do cieczy, z cieczy do celulozy lub stanem równowagi, w którym nie występuje migracja wody.

Poniżej przedstawiono trzy warianty zawilgocenia komponentów.

- (1) Zawilgocenie preszpanu i cieczy odpowiada stanowi równowagi w warunkach otoczenia w laboratorium (20°C, 35 % ww powietrza); w tej sytuacji nie spodziewamy się migracji wody z preszpanu do cieczy i odwrotnie;
 - zawilgocenie preszpanu 5,3 % wagowo,
 - zawilgocenie oleju mineralnego 34 % ww, 17 ppm,
 - zawilgocenie estru syntetycznego 34 % ww, 589 ppm.
- (2) Zawilgocenie preszpanu i cieczy nie jest w równowadze; można się spodziewać migracji wody z cieczy do preszpanu, co powinno wpływać na spadek rezystywności. Sytuacja jest nierealna. Eksperyment służył jedynie zademonstrowaniu zależności rezystywności powierzchniowej od kierunku migracji wody;
 - zawilgocenie preszpanu 3 % wagowo,
 - zawilgocenie oleju mineralnego 34 % ww, 17 ppm,
 - zawilgocenie estru syntetycznego 34 % ww, 589 ppm.
- (3) Zawilgocenie preszpanu i cieczy nie jest w równowadze; należy spodziewać się migracji wody z preszpanu do cieczy. Sytuacja realna – odpowiada zalaniu zawilgoconej izolacji celulozowej bardzo suchą cieczą;
 - zawilgocenie preszpanu 3,2 % wagowo,
 - zawilgocenie oleju mineralnego 0,8 ppm,
 - zawilgocenie estru syntetycznego 33,1 ppm.

Układ pomiarowy

W badaniach wykorzystano dwa mierniki różniące się zasadniczo zakresem pomiarowym. Pomiary rezystancji powierzchniowej izolacji prowadzono przy stałym napięciu 500 V.



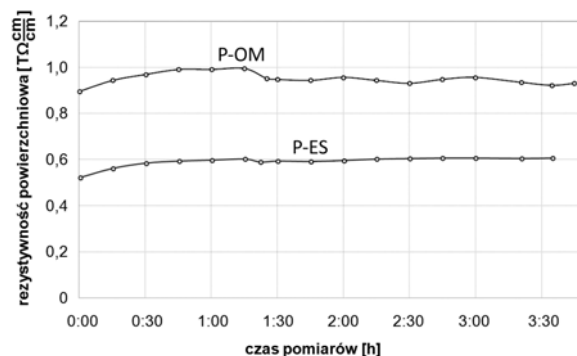
Rys.2. Elektrometr Danbridge DB604; zakres pomiarowy do $3 \times 10^{15} \Omega$, $U=50\text{-}5000 \text{ V DC}$



Rys.3. Miernik izolacji UNILAP ISO 5kV; zakres pomiarowy do $3 \times 10^{13} \Omega$, $U=1\text{-}5000 \text{ V DC}$

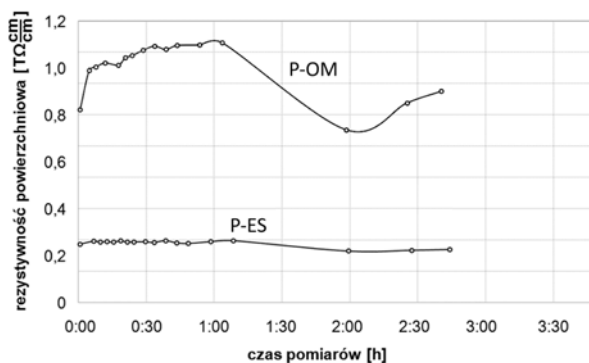
Wyniki badań i dyskusja

Pierwsza seria badań dotyczyła układu, w którym zawilgocenie celulozy i cieczy odpowiada stanowi równowagi. Nie występuje w tej sytuacji migracja wody, co sprawia, że rezystywność powierzchniowa jest stabilna w czasie. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 4. Rezystywność powierzchniowa preszpanu zanurzonego w estrze jest nieco mniejsza niż preszpanu zanurzonego w oleju.



Rys.4. Rezystywność powierzchniowa preszpanu o zawilgoceniu 5,3 % wagowo zanurzonego w oleju mineralnym o zawilgoceniu 17 ppm, 34 % ww (P-OM) oraz w estrze syntetycznym o zawilgoceniu 589 ppm, 34 % ww (P-ES); układ w stanie równowagi

W drugiej serii badań układ nie był w stanie równowagi, a migracja wody odbywała się z cieczy do preszpanu. W tej sytuacji należało spodziewać się spadku rezystywności powierzchniowej. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiarów. Spadek rezystywności powierzchniowej zaczyna się manifestować się po upływie około jednej godziny od chwili wymiany cieczy izolacyjnej. Rezystywność powierzchniowa preszpanu zanurzonego w estrze syntetycznym jest około 5 razy mniejsza niż preszpanu zanurzonego w oleju, ale wykazuje większą stabilność i odporność na zawilgocenie cieczy.

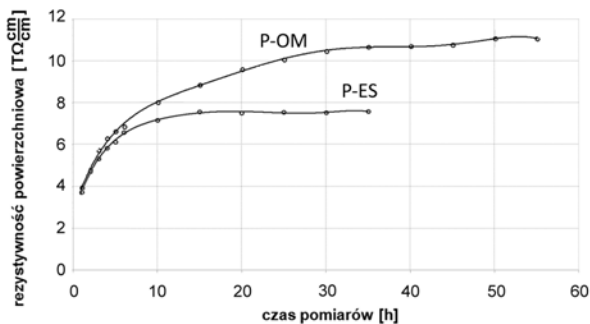


Rys.5. Rezystywność powierzchniowa preszpanu o zawilgoceniu 3,0 % wagowo zanurzonego w oleju mineralnym o zawilgoceniu 17 ppm, 34 % ww (P-OM) oraz w estrze syntetycznym o zawilgoceniu 589 ppm, 34 % ww (P-ES); migracja wody występuje z cieczy do celulozy

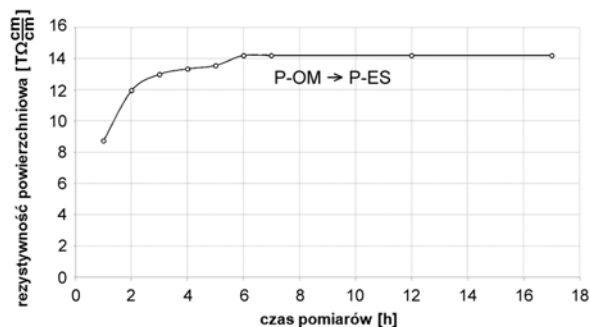
W trzeciej serii badań układ również nie był w stanie równowagi, ale spodziewano się migracji wody z preszpanu do bardzo suchej cieczy. Wyniki przedstawiono na rysunku 6. W tej sytuacji, zgodnie z oczekiwaniami, rezystywność powierzchniowa rosła wraz z upływem czasu.

Ostatnia seria pomiarowa dotyczyła realnej sytuacji związanej z wymianą w transformatorze oleju mineralnego na ester syntetyczny. W tej serii próbkę preszpanu o zawilgoceniu 3,2 % wagowo znajdującą w oleju

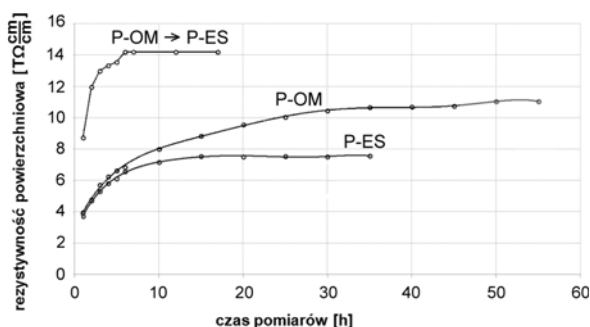
mineralnym o zawilgoceniu 7,4 ppm, 13,5 % ww, przeniesiono do bardzo suchego estru o zawilgoceniu 33,1 ppm, 3,2 % ww. Wyniki przedstawiono na rysunku 7. Rezystywność wraz z upływem czasu rośnie. Ważniejszy jednak jest fakt, że rezystywność powierzchniowa po operacji przeniesienia z oleju do estru jest dużo większa niż w przypadku próbek zanurzonych w oleju lub w estrze (patrz rys. 6). To porównanie przedstawiono na rysunku 8. Problem będzie analizowany w przyszłości w celu wyjaśnienia fizycznych aspektów zjawiska.



Rys.6. Rezystywność powierzchniowa preszpanu o zawilgoceniu 3,2 % wagowo zanurzonego w bardzo suchym oleju mineralnym o zawilgoceniu 0,8 ppm, 3,2 % ww (P-OM) oraz w bardzo suchym estrze syntetycznym o zawilgoceniu 33,1 ppm, 3,2 % ww (P-ES); migracja wody następuje z celulozy do cieczy



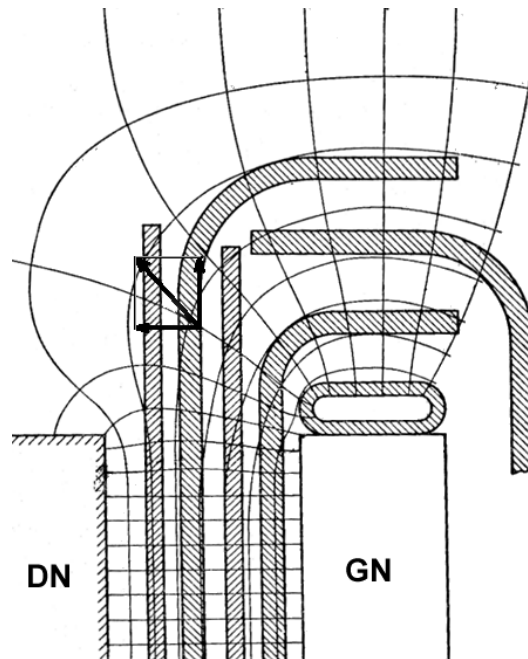
Rys.7. Rezystywność powierzchniowa preszpanu o zawilgoceniu 3,2 % wagowo nasyconego olejem mineralnym o zawilgoceniu 7,4 ppm, 13,5 % ww (P-OM) przeniesionego do bardzo suchego estru syntetycznego o zawilgoceniu 33,1 ppm, 3,2 % ww (P-ES)



Rys.8. Porównanie rezystywności powierzchniowej próbek preszpanowych o zawilgoceniu 3,2 % wagowo zanurzonych w bardzo suchym oleju mineralnym o zawilgoceniu 0,8 ppm, 3,2 % ww (P-OM) i w estrze syntetycznym o zawilgoceniu 33,1 ppm, 3,2 % ww (P-ES) oraz próbki preszpanowej o zawilgoceniu 3,2 % ww nasyconej olejem mineralnym przeniesionej do bardzo suchego estru syntetycznego o zawilgoceniu 33,1 ppm, 3,2 % ww (P-OM ->P-ES)

Komentarz i wnioski

Rezystywność powierzchniowa preszpanu jest bardzo ważna w obszarach układu izolacyjnego, w których występuje tzw. „ukośne” pole elektryczne, co pokazano na rysunku 9. Przy małej wartości rezystywności powierzchniowej, znaczna wartość składowej stycznej pola elektrycznego mogłaby powodować wyładowania niezupełnie powierzchniowe – bardzo agresywne, niszczące trwale preszpan.



Rys.9. Obraz pola elektrycznego w górnym krańcu kolumny transformatora; na podstawie [11]

Eksperyment potwierdził, że zmiany rezystywności powierzchniowej zależą od kierunku migracji wody.

Migracji wody z celulozy do cieczy towarzyszy wzrost rezystywności, natomiast migracji wody z cieczy do celulozy – spadek rezystywności.

Preszpan sycony olejem mineralnym przeniesiony do estru syntetycznego wykazuje skokowy wzrost rezystywności, co jest bardzo korzystne, ale wymaga wyjaśnienia i dalszych badań. Można oczekiwać, że wymiana w transformatorze oleju mineralnego na suchy ester syntetyczny powinna istotnie zwiększyć rezystywność powierzchniową preszpanu.

Autorzy: dr hab. inż. Hubert Morańda, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, E-mail: hubert.moranda@put.poznan.pl; dr inż. Piotr Przybyłek, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, E-mail: piotr.przybylek@put.poznan.pl; prof. dr hab. inż. Hanna Mościcka-Grzesiak, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, E-mail: hanna.moscicka-grzesiak@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] CIGRE Brochure nr 436, Experiences in Service with New Insulating Liquid, 2010
- [2] Fofana I., Arakelian V.G., Water in Oil-Filled High-Voltage Equipment. Part I: States, Solubility, and Equilibrium in Insulating Materials, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 23 (2007), n.4, 15-27
- [3] Przybyłek P., Water Saturation Limit of Insulating Liquids and Hygroscopicity of Cellulose in Aspect of Moisture Determination in Oil-Paper Insulation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, zaakceptowane do druku

- [4] Przybyłek P, Siodła K. Application of Capacitive Sensor for Measuring Water Content in Electro-Insulating Liquids, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 18 (2016), n.2, 181-185
- [5] Vasovic V., Lukic J., Perrier C. and Coulibaly M.L., Equilibrium Charts for Moisture in Paper and Pressboard Insulations in Mineral and Natural Ester Transformer Oils, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 30 (2014), n.2, 10-16
- [6] Koch M. and Tenbohlen S., Diagnostic Application of Moisture Equilibrium for Power Transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25 (2010), n.4, 2574-2581
- [7] Jovalekic M., Kolb D., Tenbohlen S., Bates L., Szewczyk R., A Methodology for Determining Water Saturation Limits and Moisture Equilibrium Diagrams of Alternative Insulation Systems, *IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, June 2011, 1-5
- [8] Du Y., Zahn M., Lesieutre B.C., Marnishev A.V., Lindgren S.R., A Review of Moisture Equilibrium in the Paper-Oil Systems, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 15 (1999), n.1, 11-20.
- [9] CIGRE Brochure nr 349, Moisture Equilibrium and Moisture Migration within Transformer Insulation Systems, 2010
- [10] Przybyłek P., The Influence of Temperature and Aging of Cellulose on Water Distribution in Oil-Paper Insulation", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20 (2013), n.2, 552-556
- [11] Jezierski E., Gogolewski Z., Kopczyński Z., Szmit J., *Transformatory – budowa i projektowanie*, Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa, 1956