

# Wpływ morfologii kompozytu RBP na odpowiedź dielektryczną

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano rozpoznanie efektów procesu starzeniowego w izolacji głównej przepustów RBP na podstawie odpowiedzi dielektrycznych poszczególnych warstw izolacji. Skupiono się na metodzie FDS w celu określenia możliwych zmian morfologicznych izolacji w zależności od miejsca pobrania próbek.

**Abstract.** The paper presents the recognition of effects of aging in isolation bushings RBP mainly based on the dielectric response of the individual layers of insulation. The focus is on the method of FDS to identify possible morphological changes of insulation, depending on the place of sampling. (The influence of the morphology of the composite RBP to the dielectric response).

**Słowa kluczowe:** relaksacja, FDS, RBP, izolacja główna, warstwa  
**Keywords:** relaxation, FDS, RBP, main insulation, layer

doi:10.12915/pe.2014.10.18

## Wstęp

Przepusty są jednym z najważniejszych elementów wyposażenia transformatorów energetycznych. Stosuje się je do wyprowadzenia końców uzwojeń w sposób zapewniający odizolowanie od dostępnych części metalowych tj. kadzi transformatora [1].

Transformatory energetyczne projektowane są na okres eksploatacji wynoszący 30 lat, jednak w latach 60, 70 i 80 ubiegłego wieku, produkowane były jednostki, znacznie przewymiarowane. Głównym wyznacznikiem produkcji nie była ekonomia, ale wysoka niezawodność. Z tego powodu jednostki te, mimo przekroczenia przewidywanego czasu eksploatacji, znajdują się w stosunkowo dobrej kondycji. W związku z tym wiele spółek podjęło decyzje o dalszej eksploatacji. Jest to uzasadnione wymiernymi korzyściami ekonomicznymi, ponieważ należy pamiętać, że wymiana transformatora wiąże się z wysokimi kosztami inwestycyjnymi, które obejmują takie dodatkowe elementy jak budowa misy olejowej, systemu przeciwpożarowego oraz często wiąże się z ogólną przebudową pola zasilającego [2, 3, 4].

Eksploatacja transformatorów ponad projektowany czas związana jest z podwyższonym ryzykiem wystąpienia awarii. Z danych literaturowych wynika, że jedną z głównych przyczyn uszkodzenia transformatorów są przepusty [5, 6, 7]. Według różnych źródeł stanowią one od 20 do 40 procent przyczyn uszkodzenia transformatorów. Ponadto większość z nich przypada między 15 a 25 rokiem eksploatacji, zatem przepusty mają nieco krótszy czas eksploatacji [7]. Z danych statystycznych wynika, że pomimo prowadzenia systematycznych kontroli stanu technicznego przepustów ich awarie zdarzają się zbyt często, co świadczy o zbyt małej skuteczności stosowanych metod diagnostycznych [8].

Do głównych przyczyn uszkodzenia przepustów można zaliczyć:

- uszkodzenie izolacji głównej;
- uszkodzenie zewnętrznej osłony;
- wadliwy zacisk pomiarowy;
- rozszczelnienie osłony zewnętrznej.

Natomiast powstawanie defektów w izolacji głównej spowodowane jest następującymi narażeniami związanymi z procesem produkcyjnym i eksploatacyjnym:

- chemiczne i termiczne procesy starzeniowe;
- poprodukcyjne naprężenia termo-mechaniczne;
- źle dobrany proces technologiczny;
- wyładowania niepełne wewnątrz rdzenia;
- efekt bąblowania na skutek migracji wzdłużnej wilgoci [9, 10].

Degradacja izolacji na skutek oddziaływania czynników starzeniowych przebiega na przestrzeni wielu lat, a stosowanie standardowych metod diagnostycznych pozwala na wykrycie zagrożenia dopiero w końcowych stadiach życia izolacji. Aby poprawić wykrywalność zagrożeń związanych z izolacją główną, konieczne jest opracowanie efektywniejszych technologii oceny stanu technicznego. Do takich metod możemy zaliczyć: badania termowizyjne, pomiary wnz, testy napięciem skokowym oraz metody oparte na spektroskopowej analizie procesów polaryzacyjnych (RVM, PDC, FDS).

W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki pomiarów odpowiedzi dielektrycznej izolacji przepustów długotrwale starzonych w warunkach eksploatacyjnych. Badania wykonano w dziedzinie częstotliwości (metoda FDS) na próbkach pobranych z różnych obszarów objętości rdzenia przepustu RBP 245 kV. Głównym zamierzeniem pracy jest poznanie odpowiedzi dielektrycznej poszczególnych warstw izolacji przepustu RBP o różnym stopniu zesterzenia. Zdaniem autora, określenie wpływu lokalnego przegrzania kompozytu RBP na charakterystyki częstotliwościowe współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$ , może poprawić jakość diagnostyki przepustów przy stosowaniu pomiarów FDS całego rdzenia.

## Obiekt i metodyka badań

Obiektem badań były próbki pobrane z różnych obszarów izolacji głównej przepustu RBP typu CTF 245 kV. Uzyskano je poprzez mechaniczne rozdzielanie poszczególnych warstw izolacji rdzenia RBP wzdłuż ekranów sterujących. W ten sposób otrzymano kilkanaście próbek o różnym stopniu zesterzenia (rys. 1). Bowiern warstwy położone bliżej sworzni prądowego wykazywały cechy kompozytu z wyraźnym przegrzaniem termicznym, podczas gdy warstwy zewnętrzne wykazywały cechy materiału wolnego od procesów starzeniowych.

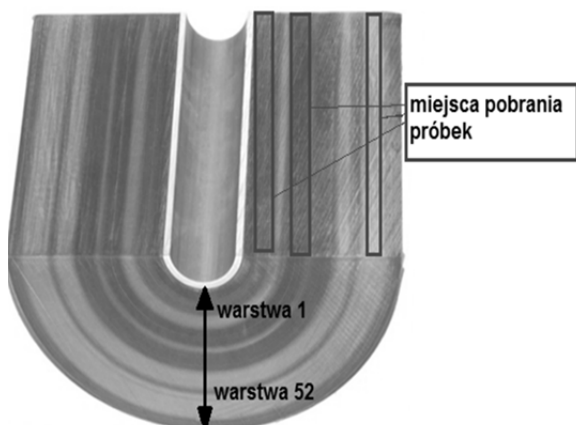
Wyselekcjonowano dwa rodzaje próbek:

- I. próbki o mniejszej grubości pobrane z warstwy izolacji zawartej między ekranami sterującymi;
- II. próbki o większej grubości, które złożone były z dwóch warstw izolacji rozdzielonych oryginalnym ekranem sterującym.

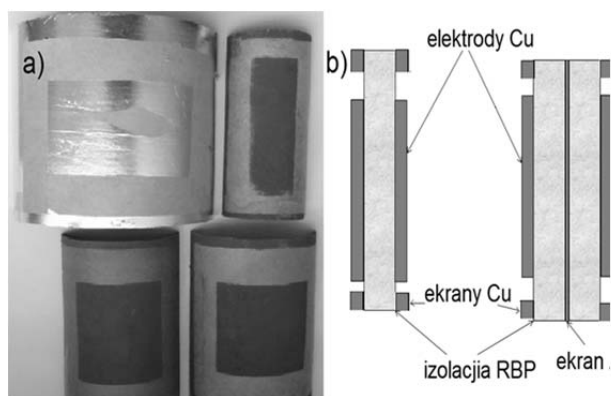
Przy preparacji próbek kierowano się dwiema przesłankami:

- możliwość określenia wpływu zmian strukturalnych w kompozycie RBP na zależności  $(tg\delta, C) = f(\omega)$  (próbki I rodzaju);
- możliwość określenia wpływu zmian morfologii granicy faz „kompozyt – ekran sterujący” na zależności  $(tg\delta, C) = f(\omega)$ .

Na powierzchni próbek naniesiono elektrody miedziane wraz z ekranami (rys. 2). Do tego celu użyto preparatu EMI 35. Przed wykonaniem pomiarów FDS, próbki poddano suszeniu w komorze próżniowej w temperaturze 40 C przez okres 14 dni. Na czas pomiaru próbki umieszczono w komorze klimatycznej typu Feutron KPK 100, w której utrzymywano temperaturę  $T = 20\text{ C}$  przy wilgotności względnej powietrza  $RH = 20\%$ . Zmiany współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$  oraz pojemności próbek mierzono w zakresie częstotliwości  $10^{-4} \div 10^3$  Hz. Pomiary FDS wykonane zostały miernikiem Dirana z dedykowanym oprogramowaniem Dirana 1.5. Dane pomiarowe opracowano za pomocą programu Origin v. 8.1.



Rys.1. Przekrój poprzeczny rdzenia przepustu CTF 245 kV z oznaczonymi miejscami poboru próbek materiałowych



Rys.2. Próbki kompozytu RBP: a) widok ogólny; b) budowa próbek I i II rodzaju

### Wyniki badań

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiarów charakterystyk częstotliwościowych  $tg\delta$  próbek I rodzaju pobranych z warstw 6 i 35 rdzenia przepustu (rys.1). W przypadku próbki pobranej z warstwy 6, która położona jest w głębi rdzenia w pobliżu sworznia prądowego, analiza wykazała w zakresie średnich częstotliwości występuje wyraźny proces relaksacyjny o dominującej stałej czasowej rzędu kilku sekund. Ponadto w zakresie ULF wzrost  $tg\delta$  spowodowany był głównie zwiększającym się przewodnictwem elektrycznym. Jak wynika z pracy [2] tego rodzaju odpowiedź dielektryczna jest charakterystyczna dla kompozytów żywic termoutwardzalnych o dużym zaawansowaniu procesu termicznego starzenia. W takich przypadkach w objętości kompozytu zawarte są małowielocząstkowe polarne produkty rozkładu żywicy i celulozy, których stałe czasowe relaksacji zawierają się w zakresie od kilku do kilkudziesięciu sekund. Procesowi relaksacji towarzyszy wzrost przewodnictwa związanej z

obecnością jonowych produktów rozkładu. W rezultacie obserwuje się znaczny wzrost współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$  w całym zakresie częstotliwości. W przypadku próbki pobranej z warstwy 6 wartości  $tg\delta$  były większe od sugerowanych wartości dopuszczalnych dla kompozytów tego typu (np. dla  $f = 0,1$  Hz  $tg\delta_{dop} \approx 0,12$ ). Zespół tych czynników dowodzi, że podczas długoletniej eksploatacji przepustu CTF 245 w przylegających do sworznia prądowego warstwach izolacji nastąpiła degradacja termiczna kompozytu RBP. Natomiast dla próbki pobranej z warstwy 35 zmiany  $tg\delta$  w zakresie ULF były typowe dla kompozytów charakteryzujących się brakiem rozbudowanej fazy amorficznej bez obecności małowielocząstkowych substancji polarnych. W takich przypadkach wzrost  $tg\delta$  w zakresie ULF spowodowany jest przede wszystkim przez relaksację niskoczęstotliwościową oraz przewodnictwo zmiennoprądowe. Należy podkreślić, że procesy te są dominującym składnikiem strat w kompozytach o słabym zaawansowaniu procesów starzeniowych. Stąd nasuwa się stwierdzenie, że w próbce pobranej z warstwy 36, pomimo wieloletniej eksploatacji, nie wystąpiły objawy istotnych procesów starzenia.

Na rysunku 4 pokazano częstotliwościowe zmiany  $tg\delta$  próbki zawierającej wewnętrzny ekran Al., która została pobrana ze zestarzonej termicznie warstwy 8 i 9 (krzywa 1). W odpowiedzi dielektrycznej próbki można wyróżnić dwie struktury relaksacyjne:

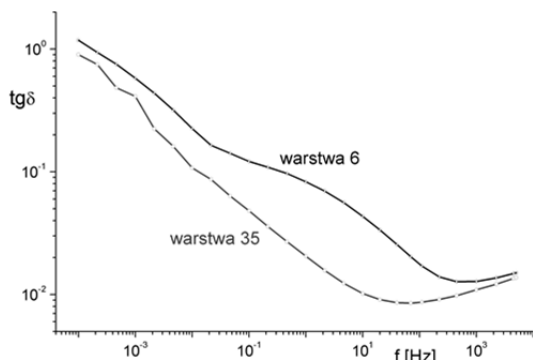
- pierwszą w zakresie MF o stałej czasowej  $1 \div 2 \cdot 10^{-3}$  sekundy,
- drugą w zakresie LF o stałej czasowej  $10 \div 20$  sekund.

Wydaje się, że wysokoczęstotliwościowy proces relaksacyjny można tłumaczyć obecnością w kompozycie produktów rozkładu o wysokiej zawartości cząstek węgla. Biorąc dodatkowo wykonane analizy w podczerwieni ujawniły, że w interfejsie kompozyt-ekran obecne są aglomeraty zawierające związki węgla. Należy przy tym dodać, że takich aglomeratów nie stwierdzono w obszarach oddalonych od ekranu. Istnienie przy powierzchni ekranów monowarstw o wysokim przewodnictwie i dużej przenikalności elektrycznej powinno skutkować powstaniem ładunku Maxwella-Wagnera na granicy faz. Wydaje się, że właśnie ten efekt odpowiedzialny jest za widoczną w zakresie LF relaksację o stałej czasowej rzędu  $10 \div 20$  sekund. Potwierdzeniem tego przypuszczenia jest odpowiedź dielektryczna próbki II rodzaju pobranej z niezdegradowanych warstw 42-43 (rys. 4 - krzywa 2). Przed pomiarami została ona dodatkowo zawilgocona i zawierała ok 1,5% cz. wag. wody. Ponieważ sorpcja wody odbywa się głównie na granicy faz, wzdłuż ekranów stąd kształt zależności  $tg\delta = f(\omega)$  w zakresie LF był niemal identyczny, jak dla próbki zawierającej w interfejsie węgiel. Należy zwrócić uwagę, że w tym przypadku nie obserwowano relaksacji w zakresie MF, gdyż odpowiedź dielektryczna dipoli wody widoczna jest w częstotliwościach rzędu  $10^4 \div 10^7$  Hz. Wpływ ładunku Maxwella-Wagnera na kształt  $tg\delta = f(\omega)$  można pokazać na przykładzie próbki I rodzaju pobranej ze zdegradowanej warstwy nr 10 rdzenia, która charakteryzowała się wyraźną delaminacją pomiędzy poszczególnymi zwojami papieru impregnowanego żywicą.

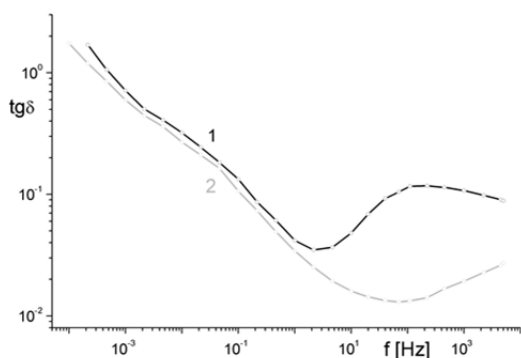
Na pokazanej na rysunku 5 odpowiedzi dielektrycznej tej próbki widoczna jest relaksacja w zakresie  $10^{-3} \div 10^2$  Hz (krzywa 1), która jest w istocie superpozycją relaksacji produktów starzenia ( $10^{-1} \div 10^2$  Hz) oraz ładunku Maxwella-Wagnera ( $10^{-3} \div 10^0$  Hz). W tym przypadku obecność wody w próbce (zawilgoconie około 1,5÷2%) powoduje wzrost konduktywności kompozytu RBP, co skutkuje przyrostem wartości współczynnika strat w całym zakresie częstotliwości z godnie z zależnością:

$$(1) \quad \operatorname{tg} \delta \in \left( \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} \right)^N$$

gdzie:  $\sigma_0$  – przewodność stałoprądowa,  $\varepsilon_0$  – przenikalność próżni,  $\omega$  – pulsacja,  $N$  – współczynnik.

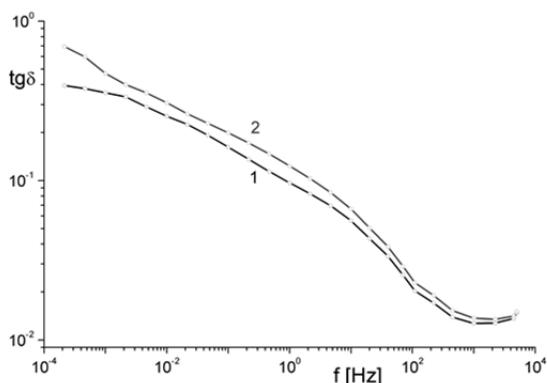


Rys.3. Częstotliwościowa charakterystyka  $\operatorname{tg} \delta$  warstwy 6 oraz 35 pobranych z rdzenia przepustu CTF 245



Rys.4. Zależność współczynnika strat  $\operatorname{tg} \delta$  od częstotliwości próbek pobranych z rdzenia przepustu CTF-245:

- 1) próbka II rodzaju pobrana z warstw nr 8 i 9,
- 2) próbka II rodzaju pobrana z warstw nr 42 i 43



Rys.5. Zależność współczynnika strat dielektrycznych  $\operatorname{tg} \delta$  od częstotliwości dla próbki I rodzaju pobranej z warstwy nr 10 rdzenia przepustu CTF-245:

- 1) próbka I rodzaju zdelaminowana,
- 2) próbka I rodzaju zdelaminowana z zawartością 1,5±2% cz. wg. wody

## Podsumowanie

W warunkach eksploatacyjnych starzenie izolacji RBP przebiega w sposób wysoce nierównomierny, co powoduje że warstwy izolacji w pobliżu sworzni starzeją się dużo szybciej.

Analiza odpowiedzi dielektrycznej wykazała, że w zestarzonej izolacji w zakresie niskiej częstotliwości występują dodatkowe procesy relaksacyjne, które spowodowane są zmianami morfologii kompozytu RBP. Ponadto na granicy faz „kompozyt-ekran Al” możliwa jest relaksacja Maxwella – Wagnera, która jest skutkiem tworzenia się przewodzącej warstwy węgla (sadzy), lub w pewnych przypadkach migracją wilgoci z zewnątrz. Możliwy jest również proces związany z utratą adhezji między kompozytem RBP a ekranem. Całkowita odpowiedź dielektryczna rdzenia jest wypadkową odpowiedzi dielektrycznych poszczególnych warstw, z tym że główną rolę odgrywają obszary izolacji położone w pobliżu sworzni (o wysokim stopniu zestarzenia) oraz relaksacja Maxwella-Wagnera na granicy faz między kompozytem a ekranami.

## LITERATURA

- [1] Norma PN-EN-60137: „Izolatory przepustowe na napięcia przemienne powyżej 1 000 V”
- [2] Subocz J., Szrot M., Płowucha J., Mrozik A. : Nowe metody oceny przepustów transformatorowych. XVII Konferencja Energetyki, Jachranka 7-9.09.2011, 178-188
- [3] Subocz J., Zenker M., Mrozik M.: „Wpływ temperatury na odpowiedź dielektryczną przepustów transformatorowych wysokiego napięcia z izolacją stałą”, Pomiary Automatyka Kontrola, nr.4 (2011), 376 – 380.
- [4] Subocz J., „Transformatory w eksploatacji 2007” wyd. EnergoComplex
- [5] Jagers J., Tenbohlen S. „Differences Approaches for Acquisition of Reliability Statistics” Cigre Regional conference Paris 2009
- [6] Kruger M., Kraetge A., Koch M., Rethmeier K., Putter M. Hulka L., Muhr M., Summereder C. „New Diagnostic Tools For High Voltage Bushing” Workop On Power Transformers Foz do Iguacu - 25 A 28 De Aberil De 2010 Cigre
- [7] Zink M., Klipfel V., Berger F., „Ageing – condition Assessment of Generator Transformer Buhings by means of Dielectric Simulation Models” IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 23-27 September 2012, Bali, Indonesia, 137-140
- [8] Subocz J., Zenker M., Mrozik A., „Wpływ temperatury na odpowiedź dielektryczną przepustów transformatorowych wysokiego napięcia z izolacją stałą” Pomiary Automatyka Kontrola 2011 nr 04, 376-379
- [9] Smith D., McMeekin S., Stewart B., Wallace P., „Modelling the Effects of Temperature and Moisture Ingress on Capacitance and Dissipation Factor Measurements within Oil Impregnated Paper Transformer Bushings” Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2010 Paris
- [10] Przybyłek P., Morańda H., Mościcka-Grzesiak H. „Bubble effect w izolatorach przepustowych o izolacji wykonanej z różnych materiałów” Pomiary Automatyka Kontrola PAK vol. 57, nr 4/2011

**Autorzy:** mgr inż. Andrzej Mrozik, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: [amrozik@zut.edu.pl](mailto:amrozik@zut.edu.pl).