

## Analiza stanu technicznego przepustów w stanie przed awaryjnym

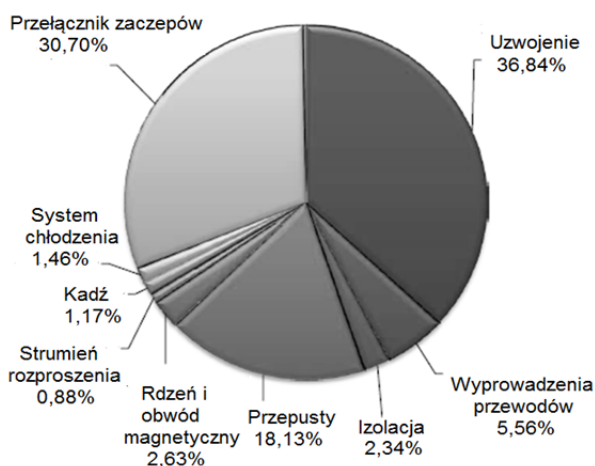
**Streszczenie.** Badania diagnostyczne wykonano na przepustach typu OIP oraz RBP ze sztucznie wytwarzanymi defektami w izolacji. Zasymulowano przypadki zanieczyszczenia oraz wycieku oleju. Podczas długoterminowych testów monitorowano takie parametry izolacji jak: pojemność elektryczną, współczynnik strat dielektrycznych oraz wyładowania niezupełne. Po badaniach napięciowych przeprowadzona inspekcja wewnętrzną poprzez pocięcie i oddzielenie poszczególnych warstw izolacyjnych.

**Abstract.** Comparative diagnostic tests were performed in the laboratory on oil-impregnated paper and resin-bonded paper bushings. The bushings have undergone long-term AC tests and insulation capacitance, dissipation factor and partial discharge were continuously monitored. After the tests, the bushing was opened and the capacitive layers were inspected individually. The results are presented in the paper. (**Analysis of the technical condition of bushings in the pre-emergency.**)

**Słowa kluczowe:** przepusty transformatorowe, monitoring, pojemność, współczynnik strat dielektrycznych  
**Keywords:** transformer bushing, monitoring, capacitance, dissipation factor.

### Wstęp

Uszkodzenia przepustów to jedno z podstawowych przyczyn uszkodzeń transformatorów energetycznych z udziałem około 14% w głównych awariach transformatorów. Ponadto poziom ten niezależny jest od rodzaju izolacji przepustu i jest podobny dla izolacji z papieru powlekanego żywicą (RBP), papieru impregnowanego żywicą (RIP) lub papierowo-olejowej (OIP) [1]. Jeżeli powyższą analizę ograniczymy do transformatorów o napięciu znamionowym  $U \geq 100 \text{ kV}$ , wyprodukowanych po 1980 roku to spośród 342 awarii w ponad 18% przyczyna była związana z przepustami (rys.1).



Rys.1. Analiza przyczyn awaryjności 342 transformatorów wyprodukowanych po 1980 ( $U \geq 100 \text{ kV}$ ) wg źródła [1]

Bazując na praktycznym doświadczeniu do głównych przyczyn powstawania awarii można zaliczyć: wyciek oleju 80%, elektryczna lub termiczna degradacja izolacji 13% i uszkodzenia mechaniczne 7% [2]. Powody awarii są bezpośrednio związane z procesem starzenia izolacji, na który wpływają wysokie temperatury, cykle obciążenia, chwilowe przebiegi, wycieki olejów, dostęp wilgoci i pęknięcia. Wczesna identyfikacja zapoczątkowania procesów degradacji izolacji, może być przeprowadzona dzięki stałemu monitorowaniu najważniejszych czynników diagnostycznych przepustu takich jak: współczynnik strat dielektrycznych ( $\text{tg}\delta$ ), pojemności (C) oraz poziomu wyładowań niezupełnych (WNZ).

Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie badań diagnostycznych przepustów różnego typu w stanie przed awaryjnym. Publikacja ta ma charakter przeglądowy nowoczesnej diagnostyki on-line (pomiaru WNZ za pomocą systemu Montrano firmy Omicron) w porównaniu do klasycznej metody off-line (pomiaru FDS – Frequency Domain Spectroscopy).

### Monitorowanie przepustu transformatora

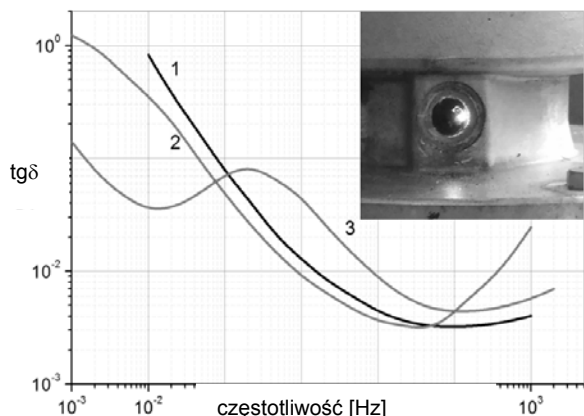
Najczęściej używana do oceny izolacji przepustów metoda monitoringu on-line oparta jest o sumę prądów, jednak zmiana kąta fazowego napięcia z powodu rozkładu dziennego obciążenia, może prowadzić do znaczących błędów w diagnostycznych. Aby zwiększyć wrażliwość pomiarów stosuje się coraz bardziej popularne metody referencyjne [3]. Zależnie od źródła sygnału referencyjnego, pomiary dzielimy na względne lub absolutnie [4].

Diagnostyka przepustu może być wykonywana na podstawie analizy zmian lub/i szybkości zmian współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$ . Kiedy wartość  $\text{tg}\delta$  osiągnie poziom alarmu dalsza praca z punktu widzenia eksploatacji nie jest wskazana [5]. Jednak zarządzanie ryzykiem w przypadku przepustów ze względnie wysoką wartością  $\text{tg}\delta$  (powyżej zdefiniowanego poziomu) i ze stabilnym trendem wzrostowym może polegać na warunkowym dopuszczeniu do ruchu danej jednostki. Natomiast kolejny aspekt praktyki eksploatacyjnej polega na dodatkowym kontrolowaniu off-line przepustów, których wartość zmian  $\text{tg}\delta$  podwoiła się w ciągu ostatnich 6 sześciu miesięcy.

Diagnostyka przepustu oparta o pomiar zmian pojemności C jest prowadzona poprzez porównywanie wartości z monitoringu on-line z wartościami z ostatnich pomiarów off-line. Różnice między nimi określa się jako parametr zmian pojemności  $\Delta C$ . Liczba ta powinna pozostać w pewnych granicach określanych w zależności od napięcia przepustu i liczby warstw izolacji [6]. Podobne relacje dotyczą zmian pola elektrycznego E. Według źródła [7] graniczne wartości pola elektrycznego nie powinny przekraczać  $2 \text{ kV/mm}$  dla izolacji RBP,  $3,6 \text{ kV/mm}$  dla izolacji RIP oraz  $4,5 \text{ kV/mm}$  dla izolacji OIP.

Identyfikacja obecności gazów i stałych produktów rozkładu wygenerowanych poprzez różne mechanizmy degradacji izolacji przepustu najlepiej jest przeprowadzać poprzez pomiary w stanie rzeczywistym. Jeżeli jednak taki system nie został zainstalowany pomiary off-line

pojemności  $C$  i  $tg\delta$  powinny być wykonane znacznie częściej. Przykładowe wyniki pomiarów za pomocą metody FDS (warunki normalne, zakres częstotliwości pomiarowej  $10^{-3} \div 10^3$  Hz) wykonanych na przepustach OIP z uszkodzonym zaciskiem pomiarowym, przedstawiono na rysunku 2. Przepust ten działał przez 3 godziny z zaciskiem pomiarowym nie uziemionym oraz widocznym iskrzeniem między zaciskiem pomiarowym a uziemioną flanszą. Brak uziemienia zacisku pomiarowego doprowadziło do pojawienia się potencjału rzędu 10-12 kV między zaciskiem pomiarowym a flanszą, który wzbudził elektryczne wyładowania niezupełne. W wyniku ich zapłonu nastąpiło uszkodzenie zacisku pomiarowego. Wyniki pomiarów  $tg\delta$  na uszkodzonym przepuście (krzywa 2) zostały porównane z wynikami na sprawnym przepuście z innej fazy tego samego transformatora (krzywa 1). Następnie krzywą nr 3 uzyskano po trwającym 50 godzin cyklowi normalnej pracy pod napięciem nominalnym przy uziemionym zacisku.



Rys.2. Pomiary współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$  na: nieszkodzonym przepuście (1), po I trwającym 3 godziny cyklu pracy bez uziemionego zacisku pomiarowego (2), po II trwającym 50 godzin cyklu pracy przy uziemionym zacisku pomiarowym (3)

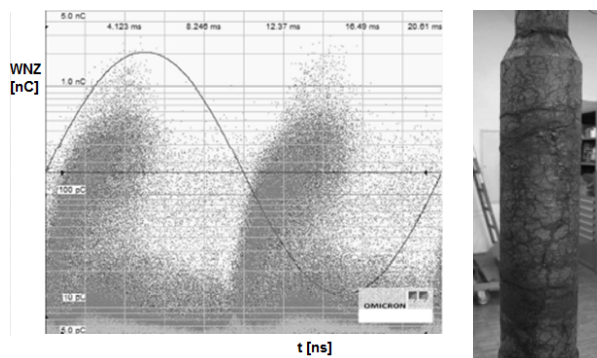
W uszkodzonym przepuście (rys.2, krzywa 2) zaobserwowano dwa typy procesów relaksacyjnych. Przy częstotliwościach powyżej 100Hz najprawdopodobniej trwałe produkty rozkładu zwiększyły wartość  $tg\delta$ . Natomiast relaksacja przy częstotliwościach poniżej 0,01Hz była obserwowana na skutek pojawienia się niewielkich ilości gazów.

Po drugim cyklu pomiarowym (rys.2, krzywa 3) w zakresie częstotliwości pomiędzy 0,1 a 1 Hz został zaobserwowany rozbudowany proces relaksacyjny ze stałą czasową wynoszącą około  $0,9 \div 1$  s. Zjawisko to należy tłumaczyć działaniem pola elektrycznego, które rozprzestrzeniło produkty rozkładu w objętości przepuścia, co znacząco zmniejszyło rezystancję warstw izolacji do wartości około  $50 \div 200M\Omega$  [8]. W tym przypadku charakterystyka  $tg\delta$  jest bliska charakterystyce 1. Ponieważ pomiary w szerokim zakresie częstotliwości mogą być wykonywane jedynie w trybie off-line, a z powodów technicznych i ekonomicznych z ograniczoną okresowością, stałe monitorowanie on-line może być zaproponowane do detekcji zmian  $tg\delta$  i  $C$  jedynie przy częstotliwości sieciowej we wczesnym stadium rozwoju uszkodzenia pod warunkiem zapewnienia wysokiej czułości pomiarów  $tg\delta$  i  $C$ . W celu zapewnienia wiarygodności diagnozy jako dodatkowy pomiar uzupełniający, można zaproponować detekcję WNZ.

### Monitorowanie wyładowań niezupełnych

WNZ w przepustach mierzone są w konfiguracji, która podobna jest do używanej podczas fabrycznych testów

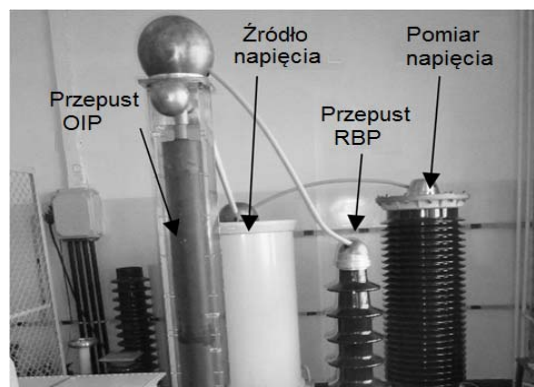
odbiorczych [9]. Generalnie, przepusty OIP oraz RIP, które przeszły rutynowe testy fabryczne posiadają poziom WNZ nieprzekraczający 10pC. W przypadku przepustów RBP, gdzie izolacja składa się z papieru powlekanego warstwą żywicy, występuje znaczna ilość powietrza rozproszonego w izolacji, a szczególnie w krańcowych warstwach. Dlatego też nawet nowe przepusty RBP posiadające poziom WNZ około 100pC, mogą pozytywnie przejść testy fabryczne. Sprzęt użyty do testów WNZ przedstawiony w tym artykule składał się z trzykanałowego systemu o maksymalnej częstotliwości 35 MHz z pasmem przepustowym o szerokości od 9kHz do 5MHz. Wyniki pomiarów są wizualizowane jako fazowo-rozdzielcze wzory (PRPD), które przedstawiają korelację między występowaniem czasu impulsu a fazą napięcia. Różne typy defektów generują wzory różnych kształtów. Zarówno pozorna wielkość wyładowania i szybkość powtarzania impulsów WNZ, muszą być wskazane w celu uzyskania pełnych informacji o rodzaju wady. Przykład takiego wzoru PRPD przedstawiony został na rysunku 3. Wzór PRPD uzyskano wykonując pomiar WNZ na przepuście RBP 220 kV z zainicjowanymi wyładowaniami powierzchniowymi pod wpływem wnikania wilgoci (rys. 3 – prawa strona).



Rys.3. Przykład PRPD dla przepuścia RBP z defektami

### Ustawienia testowe i testy wykonane

Sposób podłączenia przepustów OIP i RBP w celach testowych zaprezentowano na rysunku 4. Należą do nich przepust OIP 110 kV (osłona porcelanowa usunięta) i przepust RBP 52 kV. Użyto przekładnika napięciowego o wysokiej klasie dokładności (0,2), który zapewniał stabilny sygnał odniesienia dla kalkulacji WNZ przepustów.



Rys.4. Stanowisko pomiarowe WNZ w przepustach OIP i RBP

Ze względu na dużą różnicę między ich napięciami znamionowymi badanych przepustów, kolejno podłączano je do systemu monitorowania. Kalibrację systemu WNZ dla szerokiego zakresu częstotliwości przeprowadzono dla każdego przepuścia oddzielnie przed inicjacją sesji monitorowania.

Zachowania przepustów związanych z kontrolowanymi defektami zostały zbadane poprzez wykonanie pomiarów on-line i off-line dla parametrów wskazanych w tabeli 1.

Tabela 1. Symulowane defekty i parametry pomiarowe

Przepust	Testy	Parametry	
		on-line	off-line
OIP	Olej Suchy i odgazowany	C, WNZ	--
	Olej z zawartością powietrza atmosferycznego i produktami rozkładu		
	Obniżony poziom oleju		
RBP	Defekty technologiczne	C, tgδ, WNZ	C, WNZ

### Przepust z izolacją papierowo-olejową

Procedura pomiarowa pojemności (C) i wyładowań niezupełnych (WNZ) została wykonana przy wartości napięcia  $1,05 U_m/\sqrt{3}$  (88 kV) - według [10]. Pomiary WNZ zostały wykonane według [9] a czułość pomiaru wynosiła około 2 pC.

Porcelanowa osłona przepustu OIP 110 kV przed pomiarami została usunięta, a w jej miejsce została umiejscowiona osłona wykonana z pleksi. Następnie przestrzeń powstałą wypełniono olejem mineralnym. Powstała kuweta wypełniona została taką samą ilością oleju, jaka zwykle występuje w tego rodzaju przepuście. Wyładowania niezupełne i pojemność były monitorowane dla przepustu w trzech kolejnych etapach:

- Olej wysuszony i odgazowany,
- Olej zagazowany powietrzem atmosferycznym i zanieczyszczony osadem olejowym,
- Usunięcie połowy oleju.

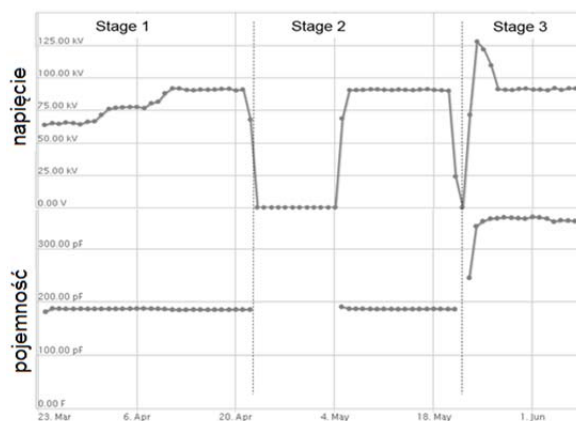
W etapie 1 napięcie testowe było stopniowo zwiększane od  $0,75 U_m/\sqrt{3}$  do  $1,05 U_m/\sqrt{3}$  (rysunek 5 – wykres powyżej). Wartość pojemności C przepustu była stała i wynosiła około 190 pF (Rysunek 5 – wykres poniżej), podczas badania nie wykryto zmian sygnału WNZ ze względu na poziom napięcia testowego (rys. 6).

Napięcie w etapie 2 było stałe i równe  $1,05 U_m/\sqrt{3}$  (88 kV), a pojemność przepustu pozostała stabilna przez całe badanie. W pomiarach WNZ zaobserwowano charakterystyczne wzory defektów, pojawiających się w sztucznie wprowadzonych pęcherzykach powietrza (rys. 6 - środkowe PRPD). Dlatego też można wyciągnąć wnioski, że dla przepustów OIP zanieczyszczenie izolacji może być ocenione na podstawie analizy WNZ.

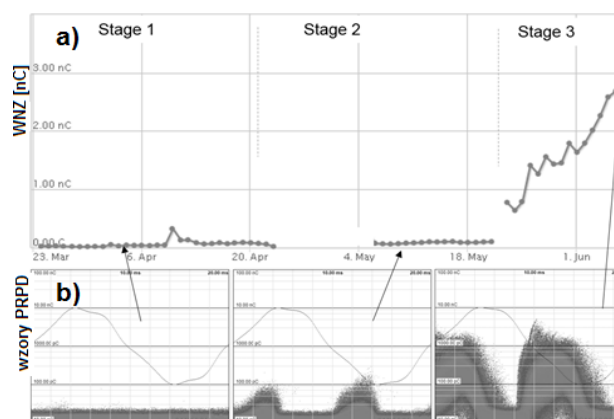
W etapie 3 symulowano wyciek oleju poprzez usunięcie połowy oleju z kuwety przepustu. Napięcie testowe pozostało stałe (88kV) przez większość trwania tego etapu. W tym przypadku zaobserwowano wzrost pojemności przepustu z 190 pF do 350 pF. Wzrost ten może być wyjaśniony na podstawie wprowadzenia równoległej pojemności po usunięciu oleju. Następuje zjawisko zawilgacania się z otaczającego powietrza ilości papieru pozostawionego powyżej. A zatem wzrost pojemności elektrycznej został zarejestrowany w mokrym papierze jako dodatkowym dielektryku. Stała dielektryczna (zawilgoconego papieru)  $\epsilon_r$  papieru jest czynnikiem, który prowadzi przede wszystkim do zwiększenia pojemności.

Zauważono również wzrost poziomu WNZ po zredukowaniu poziomu oleju w przepuście (rys. 6 - etap 3). Można zauważyć to przy analizie zarówno trendu WNZ jak i analogicznym wzorze PRPD. Jednakże porównanie PRPD otrzymanych z etapu 2 i 3 nasuwa oczywiste wnioski o obecności dwóch różnych typów defektów. Podsumowując wyciek oleju, który może się pojawić podczas działania

przepustu OIP, może być wykryty przez stałe monitorowanie zarówno C i WNZ.



Rys.5. Napięcie próby i zmiany pojemności w czasie trwania pomiarów



Rys.6. Tendencja zmian poziomu WNZ (a) i wzory fazowo-rozdzielcze PRPD w całym zakresie testów przepustu OIP (b)

### Przepust z izolacją z papieru powlekanego żywicą

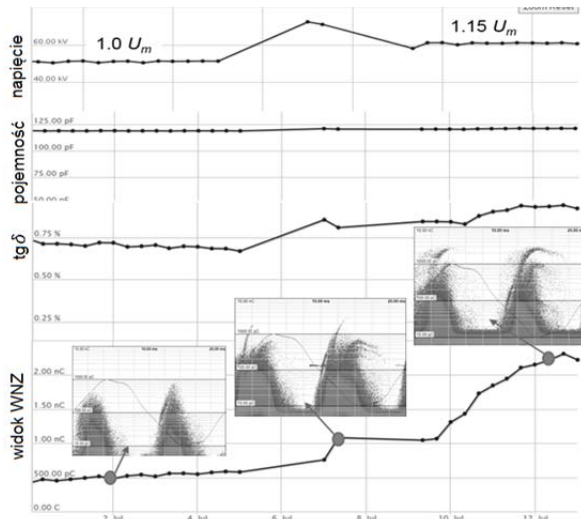
Procedura badań C, tgδ i WNZ została wykonana, przy początkowym poziomie napięcia  $1,05 U_m/\sqrt{3}$  (32 kV) a następnie zwiększana do  $U_m$  (52 kV) ( $U_m$  – wartość nominalnego napięcia międzyfazowego pracy), jak wskazano w [10]. Zostały wykonane również pomiary przy poziomie napięcia  $1,15 U_m$ .

Przeprowadzono badania przepustu RBP 52 kV po wprowadzeniu wad we wnętrzu izolacji. Według [10], test WNZ jest pozytywny jeśli poziom WNZ nie przekracza wartości 300 pC podczas badania przepustów przy napięciu pomiędzy  $1,05$  a  $1,5 U_m$ . Natomiast w prezentowanym przepuście poziom wyładowań niezupełnych wynosił 500 pC przy  $U_m$ .

Podczas testów przeprowadzonych w laboratorium, napięcie testowe wynosiło  $1,0 U_m$  i  $1,15 U_m$  przez czas trwania badania. Przy  $1,0 U_m$  zarówno C i tgδ wykazują stabilne wartości, podczas gdy poziom WNZ wzrasta z niewielkim nachyleniem (rys. 7). Przy wzroście napięcia do  $1,15 U_m$ , zaobserwować można dynamiczny wzrost wartości tgδ i WNZ. Natomiast pojemność C przepustu pozostaje stała, ponieważ nie wystąpiło zwarcie żadnej warstwy izolacji. Ewolucję wzoru PRPD wyładowań w gazowej kawernie izolacji, można zaobserwować na rysunku 7 jako stale wzrastającą amplitudę i wskaźnik powtarzalności impulsów WNZ.

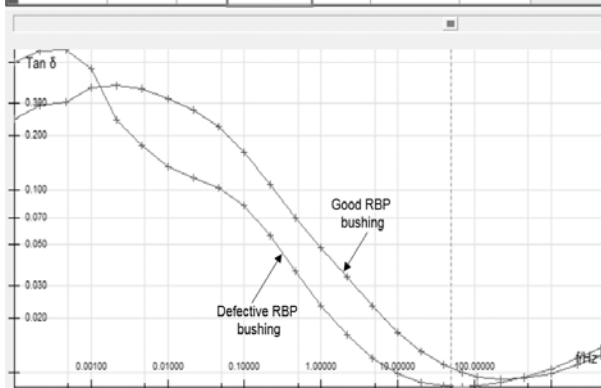


Pomiary off-line C i tgδ zostały wykonane w szerokim zakresie częstotliwości na przepuście RBP (rys.8). Otrzymane wyniki są skorelowane z wynikami monitorowania on-line przy  $1,0 U_m$ . Poziom napięcia zastosowany dla badań off-line to 100V i dlatego też było ono za niskie aby zainicjować WNZ w istniejących kawernach gazowych (rys. 8). W następnym kroku przepust został pocięty w celu dokonania szczegółowej inspekcji wewnętrznej i zostały znalezione ślady aktywności WNZ rys. 9.

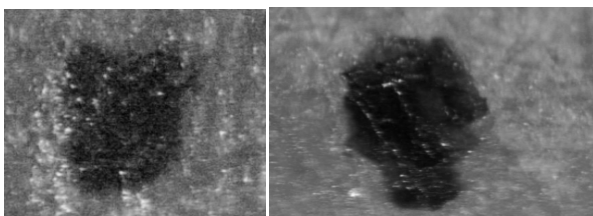


Rys.7. Zmiany pojemności, współczynnika strat dielektrycznych i wylądowań niepełnych w przepuście RBP

Measurement	Frequency	Tan δ	Capacitance (C)	Resistance	Impedance (Z)	Power Factor	C(10mHz) /
przepust RBP p...	50 Hz	0,008415	121,3691 pF	3,117 GΩ	26,226 MΩ	0,008414	1,2572
RBP z kolnie be...	50 Hz	0,010602	123,0486 pF	2,44 GΩ	25,867 MΩ	0,010601	1,5929



Rys.8. Pomiary off-line pojemności i współczynnika strat dielektrycznych w szerokim spektrum częstotliwości



Rys.9. Wyniki aktywności WNZ w kawernach izolacji RBP

Powszechnie przyjęte jest, że zmiany pojemności są jednym z najważniejszych dielektrycznych wskaźników stanu izolacji przepustów. Jednakże w tym przypadku, ponieważ nie wystąpiło zwarcie żadnej z warstw, obecność kawern gazowych nie może być wykryta, gdyż wartość pojemności pozostała niezmienna w trakcie

przeprowadzania badań. Tym samym poprzez pomiar poziomu WNZ i analizowanie wzorów PRPD, początkowy stan rozwoju defektów może być zidentyfikowany przed wystąpieniem poważnej awarii.

## Podsumowanie

W przypadku przepustu OIP obecność pęcherzyzków powietrza i wyciek oleju zostały wykryte przez monitorowanie WNZ. Został określony typowy wzór PRPD tych defektów. Pojemność elektryczna przepustu wzrosła przy obniżonym poziomie oleju. Natomiast była względnie stała w przypadku, gdy olej został zanieczyszczony powietrzem atmosferycznym i osadem oleju transformatora.

Zaprojektowane wady badanego przepustu RBP przy  $U_m$  zostały wykryte podczas monitoringu WNZ. Przy napięciu testowym  $1,15 U_m$ , obecność tych defektów została również zidentyfikowana przez monitorowanie WNZ. Wartość pojemności elektrycznej przepustu była stała podczas badania, ponieważ w trakcie doświadczenia WNZ nie doprowadziły do zwarcia żadnej z warstw izolacji. Obecność symulowanych defektów została również wykryta podczas pomiarów off-line pojemności C i współczynnika strat dielektrycznych tgδ w zakresie częstotliwości poniżej 1 Hz.

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Jan Subocz, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, email: jan.subocz@zut.edu.pl mgr inż. Andrzej Mroziak, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, email: amrozik@zut.edu.pl, dr inż. Marek Zenker, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, email: marek.zenker@zut.edu.pl

## LITERATURA

- [1] CIGRE Technical Brochure 642 "Transformer Reliability Survey", CIGRE Working Group A2.37, December 2015.
- [2] L. Jonsson, H. Rudegard, "A manufacturer's view of bushing reliability, testing and analysis" Proceedings of TechCon Asia-Pacific 2014, pp. 259-268, April 1-2, 2014, Sydney, Australia.
- [3] L.V. Badicu, W. Koltunowicz, A. Piccolo, A. McGuigan, C. Feely, "Monitoring of a Distribution Transformer at Winchelsea Substation" Proceedings of TechCon Asia-Pacific 2014, pp. 259-268, April 1-2, 2014, Sydney, Australia.
- [4] L.V. Badicu, U. Broniecki, W. Koltunowicz, S. Körber, M. Krüger and E. Voegel, "Prevention of transformer failure through continuous monitoring", paper 274, in proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH) in Pilsen, 2015.
- [5] CIGRE Technical Brochure 445 "Guide for Transformer Maintenance" CIGRE Working Group A2.34, February 2011.
- [6] T. Stirl, R. Skrzypek, S. Tenbohlen, R. Vilaithong, "Online Condition Monitoring and Diagnosis for power Transformers their Bushings, Tap Changer and Insulation System" Paper? Proceedings of the International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis CMD 2006, Changwon, South Korea, April 2006.
- [7] H. M. Ryan, "High Voltage Engineering and Testing – 3<sup>rd</sup> Edition" printed by CPI Group Ltd, Croydon, UK, 2013, ISBN 978-1-84919-263-7.
- [8] J. Buchacz, "Analysis of the state of the OIP bushings' insulation by FDS method and oil tests", PhD thesis, Technical University of Opole, 2015
- [9] IEC 60270 (2000) „High-voltage test techniques - Partial discharge measurements" International Electrotechnical Commission, Publication 60270, 2000.
- [10] IEC 60137 – Insulated bushings for alternating voltage above 1000V