

Piotr MUSZYŃSKI¹, Jerzy SKUBIS²

¹TELEKOMUNIKACJA POLSKA S.A.

²POLITECHNIKA OPOLSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI

Wykorzystanie reflektometru do badania oleju transformatorowego

Mgr inż. Piotr MUSZYŃSKI

Od 1990 roku pracuje w firmie telekomunikacyjnej. Obecnie na stanowisku głównego specjalisty. W 1998 roku ukończył studia zawodowe na kierunku elektrotechnika, w zakresie automatyka i metrologia elektryczna, na Politechnice Opolskiej. W 2001 roku ukończył studia podyplomowe w zakresie zarządzania, marketingu i teleinformatyki, na Wyższej Szkole Informatyki Stosowanej i Zarządzania w Warszawie. W 2006 roku ukończył magisterskie studia uzupełniające w zakresie elektroenergetyka, na Politechnice Opolskiej.



Prof. dr hab. inż. Jerzy SKUBIS

Studia, doktorat i habilitacja w Politechnice Śląskiej w Gliwicach. Tytuł profesora uzyskał w 1997 roku w Politechnice Opolskiej. Obecnie jest Rektorem Politechniki Opolskiej (2005-2008) oraz Dyrektorem Instytutu Elektroenergetyki Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Specjalizuje się w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych w tym nieniszczących metod detekcji pomiaru i lokalizacji wyladowań niepełnych.



e-mail: skubis@po.opole.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania reflektometru do badania oleju transformatorowego. Scharakteryzowano metrologiczne właściwości reflektometru optycznego. Przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów zmian współczynników Fresnela na końcu włókna światłowodowego dla olejów izolacyjnych o różnym stopniu zesterzenia. W konkluzji określono perspektywy wykorzystania optycznej techniki pomiarowej do określenia stopnia zesterzenia olejów izolacyjnych.

Słowa kluczowe: reflektometr, oleje izolacyjne, badania diagnostyczne.

Use of a reflectometer for transformer oil testing

Abstract

In the article, possibilities of using a reflectometer for transformer oil testing have been presented. Metrological properties of the optical reflectometer have been characterized. Exemplary measurement results of Fresnel factor changes at the end of an optical fibre for insulating oil of various ageing degree have been presented. The conclusion points out numerous perspectives of using optical measurement technique to determine the ageing degree of insulation oils.

Keywords: reflectometer, insulating oils, diagnostic tests.

1. Wprowadzenie

Efektami niepożądanymi w dużych układach elektroenergetycznych jest ciepło, wytwarzane między innymi podczas pracy kondensatorów i transformatorów oraz łuk elektryczny, który powstaje w wyłącznikach. W celu zminimalizowania skutków powyższych zjawisk w elektrotechnice wysokonapięciowej stosuje się ciekłe materiały elektroizolacyjne. Oleje mają za zadanie polepszenie własności dielektrycznych i przenoszenie z układu ciepła do powierzchni obudowy oraz gaszenie łuku elektrycznego.

Oleje stosowane w elektrotechnice można podzielić na: kablowe, kondensatorowe i transformatorowe. Pod względem chemicznym wszystkie oleje izolacyjne zawierają grupy podstawowe związków węgla i wodoru. Ze względu na surowiec, oleje izolacyjne dzieli się na:

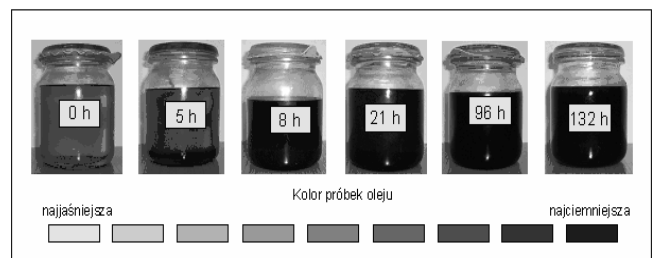
- oleje mineralne, które wytwarza się z ropy naftowej przez destylację, rafinację i oczyszczenie. Ich struktura chemiczna zależy w dużej mierze od pochodzenia ropy i sposobu przetworzenia w rafineriach;
- oleje syntetyczne, wytwarzane są sztucznie i mają ściśle określony skład chemiczny, dzięki czemu ich parametry z różnych wytwórni mogą być porównywalne;

- oleje roślinne, których przykładem stosowania w elektrotechnice może być olej rycynowy, wykorzystywany do kondensatorów specjalnych.

Największy wpływ na starzenie olejów ma temperatura. Powoduje ona zmiany właściwości fizyko-dielektrycznych: następuje odparowywanie, przyśpieszone starzenie i w końcu rozkład termiczny. Zmiany temperatury oleju wpływają szczególnie na lepkość, gęstość, napięcie przebicia, własności dielektryczne oleju oraz na rozpuszczalność wody i gazów [1].

Metoda starzenia oleju w warunkach laboratoryjnych została przedstawiona w normie [2]. Dotyczy ona badania odporności na utlenianie mineralnych olejów izolacyjnych stosowanych do napełniania transformatorów, łączników i przekładników olejowych. Metodę stosuje się do badania olejów świeżych, nieinhibowanych. Polega ona na utlenianiu sprawdzanego oleju tlenem o natężeniu przepływu $1 \text{ dm}^3/\text{h}$ w temperaturze 100°C przez 164h, w obecności katalizatora, którym jest drut miedziany i oznaczeniu liczby kwasowej oraz zawartości osadów [2].

Rys. 1. przedstawia zdjęcie próbek tego samego oleju, o różnym czasie zesterzenia w warunkach laboratoryjnych zgodnie z normą [2]. Widać wyraźnie różnice w barwie poszczególnych próbek, które ciemnieją wraz ze wzrostem czasu starzenia. Można więc spodziewać się, że każda próbka winna mieć inny współczynnik załamania i rozproszenia światła.



Rys. 1. Przykład sześciu próbek oleju zesterzonego metodą laboratoryjną
Fig. 1. Example of six samples of oil aged by means of the laboratory method

2. Reflektometr optyczny

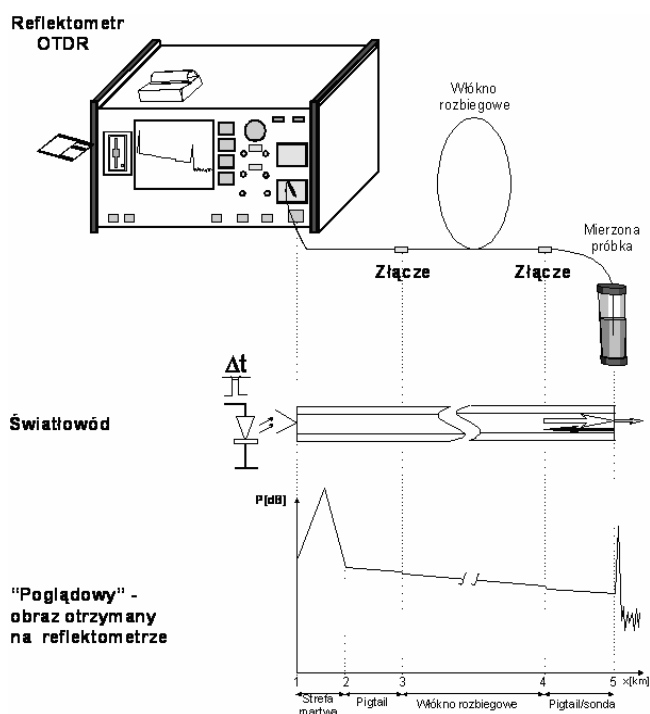
W celu zbadania ewentualnych różnic między próbkami posłużono się reflektometrem optycznym. Jest to urządzenie wykorzystywane w telekomunikacji do pomiarów kabli światłowodowych. Jego działanie polega na wstrzykiwaniu impulsów optycznych do rdzenia mierzonego włókna światłowodowego, które odbijają się od wszelkiego rodzaju niejednorodności rdzenia na poziomie

molekularnym i zanieczyszczeń, powstałych w wyniku produkcji oraz wad spowodowanych montażem kabla. Wszystkie te defekty powodują odbicia wsteczne impulsu, w stronę urządzenia. Sygnał zwrotny kierowany jest poprzez sprzęgacz optyczny na diodę lawinową, która zamienia impuls świetlny na elektryczny. Następnie sygnał jest wzmacniany, zamieniany na sygnał cyfrowy, uśredniany i przeliczany na skalę logarytmiczną. Sygnał wyświetlany jest w układzie współrzędnych, przy czym na osi y wyświetlany jest poziom sygnału w dB, a na osi x odległość w km.

Badanie próbek wcześniej zestarzonego oleju transformatorowego (rys. 1), polegało na podłączeniu do reflektometru sondy z włókna światłowodowego jednomodowego, obciążonego równoległe na końcu. Włókno było umieszczane w poszczególnych próbkach. Ze względu na strefę martwą urządzenia konieczne było włączenie między reflektometr a sondę włókna rozbiegowego o długości około 2 km, które zwiększa dystans i jednocześnie zapobiega przesterowaniu urządzenia. Pomiaru wszystkich próbek zostały wykonane w temperaturze otoczenia 22°C. Temperatura ma szczególne znaczenie przy pomiarze oleju transformatorowego, ponieważ wraz ze zmianą temperatury zmienia się gęstość oleju, a tym samym zmienia się współczynnik załamania światła. Dodatkowo w celu wyeliminowania zakłóceń światła z zewnątrz, próbki na czas pomiaru były umieszczane w zaciemnionym pojemniku. Pomiaru były wykonane dla dwóch długości fali:

- $\lambda=1310\text{nm}$ i czasie impulsu $\Delta t=500\text{ns}$, co daje dystans 50 km,
- $\lambda=1550\text{nm}$ i czasie impulsu $\Delta t=50\text{ns}$, co daje dystans 10 km.

Aby określić powtarzalność pomiarów, mimo uśrednień wykonywanych przez urządzenie, każda próbka była mierzona trzy razy, a wynik był uśredniany. Dana próbka oleju po każdym pomiarze była mieszana w taki sposób, aby nastąpiła jego wymiana przy końcówce sondy. Po trzykrotnym pomiarze następowala zmiana próbki i oczyszczenie końcówki poprzez spryskanie jej specjalnym środkiem poprawiającym kontakt czoła włókna z mierzonym olejem i jej osuszenie poprzez odczekanie kilku minut.



Rys. 2. Poglądowy schemat obrazujący sposób wykonywania pomiarów
Fig. 2. Pictorial diagram showing the way of performing measurements

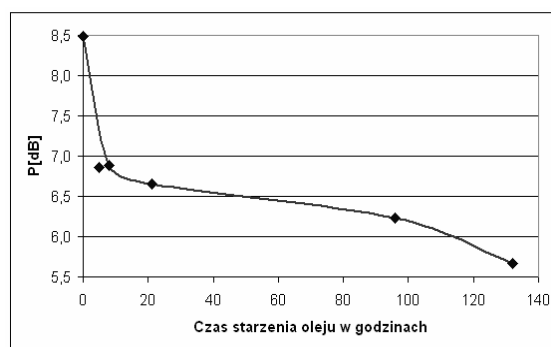
Na rys. 2 został poglądowo przedstawiony przebieg wykonywanych pomiarów. Impuls optyczny wprowadzony do światłowodu pod odpowiednim kątem dociera do końca sondy, umieszczonej w mierzonej próbce oleju. Ze względu na znaczną zmianę współczynnika załamania światła część energii zostaje pochłonięta przez próbkę, a część zostaje odbita wstecznie w kierunku reflektometru. Po przetworzeniu sygnału powrotnego, na monitorze była wyświetlana charakterystyka włókna.

Założenie, jakie przyjęto podczas wykonywania pomiarów dotyczyło stałości odległości, jaką pokonuje impuls optyczny od urządzenia do punktu przejścia ze światłowodu do mierzonego oleju. W związku z tym, badanie polegało na pomiarze mocy odbitej wstecznie w punkcie charakterystycznym, oznaczonym na rys. 2 jako „5”.

3. Przykładowe wyniki pomiarów odbicia na końcu włókna

W celu zobrazowania zmian współczynnika odbicia Fresnela, w zależności od stopnia zestarzenia oleju, zostały spisane wyniki pomiarów mocy odbitej z wszystkich zarejestrowanych przez reflektometr przebiegów. Po wpisaniu w arkusz kalkulacyjny pozwoliły one na wykreślenie poniższych charakterystyk.

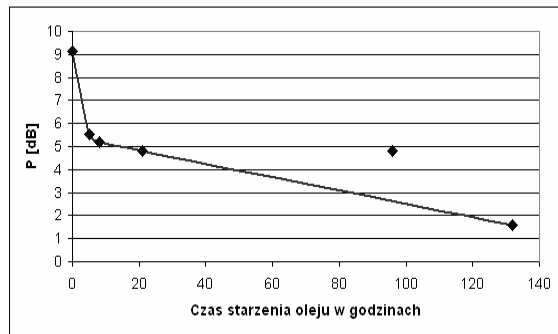
Na rys. 3 został przedstawiony przebieg zależności mocy odbitej wstecznie, od czasu zestarzenia poszczególnych próbek oleju transformatorowego, przy długości fali $\lambda=1550\text{nm}$. Pomiar był wykonany automatycznie dzięki wykorzystaniu odpowiedniej funkcji programu. Z otrzymanej charakterystyki można wywnioskować, że dla oleju nowego następuje duże odbicie energii wstecznie w kierunku urządzenia, co jednocześnie świadczy o małym rozproszeniu fali świetlnej na końcu sondy pomiarowej. W miarę zestarzenia oleju widać coraz większą stratę energii na końcu włókna, rejestrowaną jako zmniejszenie tłumienności układu. Przyczyną takiego stanu jest to, że do urządzenia dociera mniejsza ilość energii, która ulega coraz bardziej rozproszeniu na końcu sondy pomiarowej, w zależności od stopnia zestarzenia próbki. Tak więc, zmiany tłumienności mogą świadczyć o stopniu zestarzenia badanych próbek.



Rys. 3. Zależność mocy odbitej wstecznie, od czasu zestarzenia oleju transformatorowego dla $\lambda=1550\text{nm}$

Fig. 3. Dependence of reversely reflected power on transformer oil ageing time for $\lambda=1550\text{nm}$

Na rys. 4 został przedstawiony przebieg zależności mocy odbitej wstecznie, od czasu zestarzenia poszczególnych próbek oleju transformatorowego przy długości fali $\lambda=1310\text{nm}$. Pomiaru wykonano dla każdej próbki przy manualnych ustawieniach reflektometru, polegających na określeniu maksymalnej wielkości impulsu odbitego wstecznie przy wykorzystaniu dwóch kursorów. Wykres przedstawiony na rys. 4. charakteryzuje się większymi zmianami w stosunku do przebiegu przedstawionego na rys. 3.



Rys. 4. Zależność mocy odbitej wstecznie, od czasu starzenia oleju transformatorowego $\lambda=1310\text{nm}$

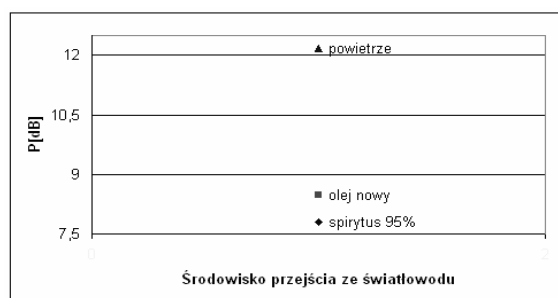
Fig. 4. Dependence of reversely reflected power on transformer oil ageing time for $\lambda=1310\text{nm}$

Powyższe analizy wykazały wystąpienie rozrzutu w wynikach pomiarów przy długości fali $\lambda=1310\text{nm}$, szczególnie dla próbek o czasie starzenia 96 godzin (próbka oznaczona jako „96h”) i przy $\lambda=1550\text{nm}$ dla próbki o czasie starzenia 5 godzin (próbka oznaczona jako „5h”).

Dla przeanalizowania przyczyn, rozrzutu wyników pomiarowych, dokonano dodatkowego porównania dla przykładowych środowisk przejścia impulsu optycznego.

Na rys. 5 przedstawiono wyniki pomiaru uzyskane przy wykorzystaniu opcji automatycznego ustawienia reflektometru, przeprowadzono dla przykładowych, trzech warunków przejścia impulsu pomiarowego z włókna światłowodowego. Określono:

- poziom odbicia impulsu pomiarowego przy przejściu ze światłowodu do powietrza,
- poziom odbicia impulsu pomiarowego przy przejściu ze światłowodu do oleju świeżego,
- poziom odbicia impulsu pomiarowego przy przejściu ze światłowodu do 95% spirytusu.



Rys. 5. Odbicie impulsów na końcu włókna, dla różnych środowisk przejścia ze światłowodu, przy długości fali $\lambda=1550\text{nm}$

Fig. 5. Reflection of impulses at the end of a fibre for various transition environments from the optical fibre, wave length $\lambda=1550\text{nm}$

Wszystkie pomiary były wykonane z dokładnością do trzech miejsc po przecinku. Porównanie otrzymanych wartości pozwala stwierdzić, że różne środowiska znacząco wpływają na poziom odbicia wstecznego, które jest rejestrowane przez reflektometr. Należy zatem sprawdzić, czy niektóre próbki poddane badaniu, wykazujące znaczne rozrzuty, nie zostały zanieczyszczone podczas przelewania do pojemnika pomiarowego przez zawiłocenie lub pęcherzyki powietrza.

4. Możliwości wykorzystania techniki optycznej

Metody pomiarowe opracowane w latach 60 ubiegłego wieku, diagnozujące uszkodzenia transformatorów, oparte są głównie na

badaniu oleju izolacyjnego. Wieloletnie doświadczenia pozwoliły na stworzenie tabel, które przez badanie stosunków różnych gazów i związków chemicznych znajdujących się w oleju, pozwalają na mniej lub bardziej dokładne określenie stopnia uszkodzenia transformatora. Podstawowe znaczenie ma w tym zakresie metoda chromatografii gazowej (DGA).

Szybka ocena degradacji oleju transformatorowego może być dokonana poprzez określenie jego koloru. Jednak oko ludzkie jest dość zawodne, szczególnie przy ocenie oleju o znacznym stopniu zesterzenia, gdzie są już niewielkie różnice między kolorami poszczególnych próbek i niezbędne są dlatego obiektywne wzorce. Wykorzystanie nowej techniki pomiarowej do szybkiej oceny stanu technicznego oleju poprzez określenie jego koloru, mogłoby przyczynić się do stworzenia nowych układów-czujników monitorujących pracę transformatorów olejowych.

Dzięki rozwojowi optoelektroniki w takich dziedzinach jak chemia, medycyna, telekomunikacja, elektronika i ogólnie w technice pomiarowej, coraz częściej wykorzystuje się podstawowe zjawiska optyczne do szybkiego diagnozowania. Przykładem mogą być badania spektralne związków chemicznych, mikroskopy elektronowe, urządzenia gastroskopowe, przekaźniki optyczne powodujące całkowite odseparowanie galwaniczne układów elektronicznych i elektrycznych. W telekomunikacji standardem jest wykorzystanie transmisji po torach optycznych, co umożliwia przeniesienie dużych ilości informacji na znaczne odległości (rzędu 150-200km). W technice pomiarowej coraz częściej, proste zjawiska optyczne, wykorzystywane są do budowy czujników, charakteryzujących się dużą niezawodnością i niską ceną. Wykonane pomiary i uzyskane rezultaty pokazały, że nowoczesna diagnostyka optyczna układów izolacyjnych może być równie niezawodna, jak klasyczne metody diagnostyczne.

5. Literatura

- [1] J. Hyncnar: „Oleje izolacyjne w eksploatacji.” WNT, Warszawa, 1969 r.
- [2] Polska Norma PN-74/C-04151 „Przetwory naftowe. Badanie odporności na utlenianie olejów izolacyjnych.”
- [3] J. Skubis: „Wybrane zagadnienia z techniki i diagnostyki wysokociągowej.” Oficyna Wyd. Pol. Op., 1998 r.
- [4] J. Zalewski: „Telekomunikacja światłowodowa – wykład.” Materiały szkoleniowe dla uczestników kursów organizowanych przez WTiE ATR Bydgoszcz, 1995 r.
- [5] Z. Siciński: „Materiały elektroizolacyjne.” WNT, Warszawa, 1965 r.
- [6] Z. Siciński: „Badanie materiałów elektroizolacyjnych.” WNT, Warszawa, 1968 r.
- [7] S. Kończak, J. Mazur: „Podstawy transmisji optycznej.” Wyd. Pol. Śl., Gliwice, 1997 r.
- [8] Instrukcja obsługi Tektronix „Reflektometr optyczny TFP2A FiberMaster 070-9189-01”, sierpień 1995 r.
- [9] Z. Szczepaniak: „Kierunki rozwoju transmisji optycznej”. Kursy informatyczne i techniczne. Instytut Łączności dla TPSA Warszawa – Instytut Łączności 27-29 sierpnia 2001 r.
- [10] TP S.A.: „Odbiór i utrzymanie kablowych linii optotelekomunikacyjnych”, Instrukcja T-01, maj 1994 r.
- [11] J. Dakin, B. Culshaw: “Optical Fiber Sensors Volume for Applications, Analysis and Future Trends”. Artech House, Boston and London, 1997 r.
- [12] A. Smoliński, A. Waksmundzki: „Kierunki rozwoju technologii i zastosowań światłowodów”, III Krajowa Szkoła Optoelektroniki, Kazimierz nad Wisłą, 1989 r.
- [13] Bellcore: “Generic Criteria for Optical Time Domain Reflectometers”. Tr-TSY-000196, 1989 r.
- [14] K.D. Bennett, L.R. McLaughlin: „Monitoring of Corrosion in Steel Structures Using Optical Fiber Sensors”. 1995 r.