

Franciszek Mosiński  
Bogusław Bocheński  
Tomasz Piotrowski

## **NOWE TRENDY W DIAGNOSTYCE IZOLACJI TRANSFORMATORÓW ENERGETYCZNYCH**

*W referacie omówiono kompleks zagadnień związanych z diagnostyką izolacji transformatorów energetycznych w eksploatacji. Podano cele i pytania diagnostyki, wyszczególniono metody zarówno normatywne jak i będące na etapie badań naukowych. Zestawiono literaturę przedmiotu oraz zaprezentowano programy numeryczne zarówno do prowadzenia kartoteki eksploatacyjnej transformatora jak i programy ekspertowe.*

### **1. WSTĘP**

Od początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku śledzenie stanu urządzeń stacji elektroenergetycznych stało się pierwszoplanowym zagadnieniem technicznym i naukowym. Przyczyny tego są dwie, po pierwsze koszty awarii i koszty niedostarczenia energii odbiorcom są bardzo duże, a jednocześnie koszt samych urządzeń elektroenergetycznych na duże moce i wysokie napięcia jest także bardzo duży. Po drugie rozwinęły się techniki komputerowe, które stworzyły nowe możliwości diagnostyczne dla pojedynczych urządzeń i możliwości budowy kompleksowych, zautomatyzowanych systemów diagnostycznych, dla całych systemów stacji elektroenergetycznej. W tym obszernym zakresie zagadnień transformator stanowi problem pierwszoplanowy, gdyż ma najwyższe napięcia zgodne z napięciami przesyłu i największe moce, zgodne z mocami generatorów.

### **2. PODSTAWY DIAGNOSTYKI**

Śledzenie stanu urządzenia obejmuje: instalację czujników, akwizycję danych, detekcję uszkodzeń i diagnostykę.

Głównymi elementami transformatora, które gwarantują jego poprawną pracę są: uzwojenia, rdzeń, kadź, układ chłodzenia, olej i podobciążeniowy przełącznik zaczepów (On Load Tap Changer – OLTC). Statystyki uszkodzalności transformatorów wykazują, że głównymi przyczynami uszkodzeń są uszkodzenia uzwojeń i uszkodzenia OLTC. Zatem kluczowymi parametrami, które muszą być śledzone, są parametry OLTC, starzenie izolacji papierowo-olejowej oraz warunki obciążenia i warunki pracy transformatora.

W warunkach polskich, gdzie dla transformatorów blokowych nie stosuje się OLTC, najważniejszym elementem diagnostyki dla tego typu transformatorów jest

śledzenie stanu izolacji. W tym zakresie podstawowe są pomiary lub obliczenia temperatur izolacji, zawartości gazów rozpuszczonych w oleju, śledzenie wyładowań niezupełnych i badanie stanu zawilgocenia [1].

Zestawienie najnowszych wyników badań w zakresie diagnostyki transformatorów zawiera tabela 1, zacytowana za [1].

**Tab. 1. Przegląd literatury na temat śledzenia stanu transformatorów energetycznych**

Uszkodzenie	Obiekt badań i motyw	Metoda śledzenia on-line lub przyrząd	Ostatnio opublikowane wyniki badań	Nowy punkt widzenia lub nowa technika badań
Izolacja uzwojeń i izolacja główna	Temperatura gorącego punktu może warunkować czas życia transformatora i jego obciążalność	Tradycyjne termopary, czujniki światłowodowe model termiczny, obraz termiczny, podczerwień (IR), termografia	Indykator temperatury uzwojeń *	Monitor i alarm
			Zastosowanie modelu termicznego w systemie śledzenia *	Śledzenie oparte o model. Doświadczenie wskazuje, że istniejący model cieplny IEC lub IEEE nie oddaje dobrze stanów nieustalonych temperatury otoczenia
	Gaz w oleju to tradycyjna droga śledzenia stanu izolacji;	Analiza gazów rozpuszczonych w oleju (DGA), czujnik wodoru (HYDRAN), analiza zawartości furanów (furfuraldehydów) (FFA)	Nowy czujnik optoelektroniczny dla określenia FFA *	Na miejscu określa koncentrację FFA bez udziału eksperta
			Diagnoza uszkodzenia oparta o inteligentny system wspierania decyzji dla DGA *	Algorytm wnioskowania w oparciu o logikę rozmytą, system ekspertowy i sieci neuronowe
	Objawy wyładowań niezupełnych (PD) dla wszystkich uszkodzeń elektrycznych na wstępnych etapach	Zakłócenia radioelektryczne (RFI), metoda cewki Rogowskiego, emisja akustyczna (AE), metoda światłowodowa, detekcja gazów w oleju	On-line skalowanie i monitoring *	Stosuje się różne metody dla usunięcia zakłóceń, opisano metodę skalowania on-line
			Model symulacyjny dla badania propagacji impulsów PD *	Zastosowanie częstotliwości rezonansowej oszynowania podstacji jako częstotliwości monitoringu może zwiększyć czułość śledzenia
Lokalizacja źródeł PD w oparciu o AE *			Przyrządy AE z oprogramowaniem dla trójwymiarowej lokalizacji źródeł PD	
Przełącznik zaczepów pod obciążeniem (OLTC)	Większość uszkodzeń transformatora jest powodowanych przez uszkodzenie przełącznika zaczepów	Śledzenie temperatury oleju przełącznika mocy, model zużycia styków, pomiar parametrów ruchu, pozycja przełącznika, śledzenie wibracji	Przenośny indykator przerw OLTC *	Może wykrywać obwody otwarte związane z uszkodzeniami lub złymi stykami w OLTC usytuowanym w punkcie gwiazdowym
			System monitoringu przełącznika mocy i selektora *	Śledzenie kondycji kompletnego przełącznika mocy i detekcja tego czy wszystkie styki selektora są w prawidłowej pozycji

\*UWAGA: Odpowiednie odsyłacze do źródeł literaturowych można znaleźć w [1].

W świecie opracowano kilka kompleksowych systemów śledzenia stanu transformatora. Te, które były opisywane w literaturze, są zestawione w tabeli 2.

**Tab. 2. Wybrane systemy monitoringu on-line dla transformatorów energetycznych**

Nazwa i wytwórca	Wielkości monitorowane	Funkcja diagnostyczna	Komentarz
System modelu MIT (Massachusetts Institute of Technology) *	Gazy w oleju, temperatura	Podaje zidentyfikowane przypadki i propozycje decyzji eksploatacyjnych	Model termiczny zamierza się ulepszyć
Oprzyrządowanie monitoringu i diagnostyki, ABB * System TEC (Trafostar Electronic Control)	Wiele gazów, poziom PD, właściwości OLTC, temperatury obciążenia i kluczowe	Off-line interpretacja DGA, lokalizacja PD, prognoza uszkodzenia OLTC za pomocą analizy wibracji	Wspomina się o oszacowaniu przewidywanego czasu życia, nie ma jednak szczegółowego opisu metody.
System monitoringu SIEMENSA *	Gazy w oleju, temperatury, prądy i napięcia, pozycja OLTC, zawilgocenie, poziom oleju itp.	Alarmuje gdy niektóre wielkości przekraczają wartości graniczne	
System monitoringu ALSTOM MS2000 *	Gazy w oleju, temperatura gorącego punktu, informacje o układach chłodzenia, pozycja OLTC i prąd itp.	Alarmuje, wizualizuje dane, zdalnie diagnozuje	Wykorzystuje magistralę przesyłu danych (Field Bus Technology)

\***UWAGA:** Odpowiednie odsyłacze do źródeł literaturowych można znaleźć w [1].

### 3. PROGRAMY NUMERYCZNE OFEROWANE PRZEZ ZWN PŁ

#### 4.1. Program do prowadzenia kartoteki transformatora we współpracy z programem ekspertowym

Program DINO (Diagnostyka Instrumentów Napelnionych Olejem) przeznaczony jest do diagnozowania stanu izolacji papierowo-olejowej transformatorów oraz przekładników. Funkcjonalnie podzielić można go na dwa moduły. Pierwszy z tych modułów stanowi zestaw narzędzi do tworzenia, zarządzania i wizualizacji bazy danych pomiarowych uzyskiwanych podczas eksploatacji i badań okresowych transformatora energetycznego lub przekładnika. Drugi z modułów pozwala zaś na przeprowadzanie diagnostyki izolacji, w oparciu o dane z pomiarów chromatograficznych przeprowadzanych na pobranych próbkach oleju.

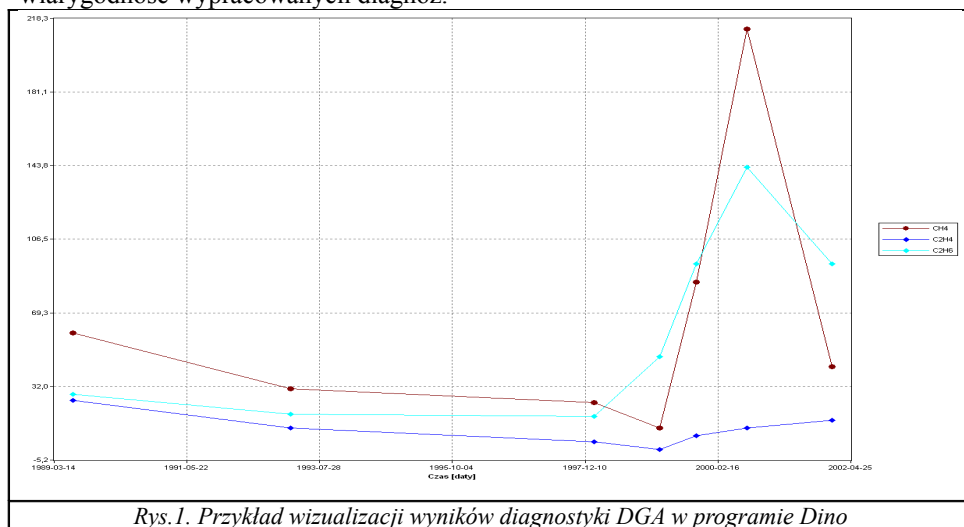
Zestaw informacji gromadzonych w bazie danych został podzielony na trzy grupy, którymi są: dane ogólne pozwalające na identyfikację oraz określające parametry znamionowe i cechy konstrukcyjne urządzenia; dane uzyskane na podstawie badań okresowych oleju obejmujące parametry elektryczne i fizykochemiczne oleju oraz stężenia gazów w nim rozpuszczonych (w tym obliczanego automatycznie TCG) oraz dane opisujące zdarzenia jakie wystąpiły podczas eksploatacji urządzenia.

Użytkownik programu posiada możliwość pełnej edycji zgromadzonych danych, która obejmuje ich uzupełnianie, poprawianie i usuwanie. Pewne ograniczenia zostały jedynie nałożone na tak zwane dane kluczowe, które wprowadzane są podczas tworzenia bazy danych, a których zmiana mogłaby wpływać na zmianę struktury bazy, spójność gromadzonych danych lub poprawność przeprowadzonych procesów diagnostycznych. Dane pomiarowe i wyniki przeprowadzonych diagnoz, które są

skojarzone ze stosownymi pomiarami, ale przechowywane w oddzielnych plikach, mogą być drukowane.

Zasadniczy moduł programu DINO przeznaczony jest do wspomagania diagnozowania stanu izolacji urządzenia na podstawie danych z analizy chromatograficznej oleju. Założenia tego programu ekspertowego są następujące: (1) Analiza danych uzyskanych z oznaczeń chromatograficznych daje pełniejszą informację jeśli jest dokonana za pomocą kilku (wszystkich dostępnych) metod wnioskowania; (2) Żadna z metod analizy wyników nie daje wniosków w każdym przypadku; przy braku diagnozy trud wykonania badań jest bez efektu; (3) Koszt analiz komputerowych jest znikomy w porównaniu z kosztem niedostarczenia energii, kosztem transformatora, a nawet w porównaniu z kosztem pojedynczego badania chromatograficznego; (4) Niektóre z metod diagnostycznych precyzyjnie określają tylko czasookres pomiędzy kolejnymi badaniami; (5) Inne z metod analizują następstwo uzyskiwanych wyników; (6) Wszystkie z powyższych zalet można wykorzystać jedynie za pomocą odpowiedniego programu ekspertowego.

Użytkownik programu może przeprowadzić proces diagnostyczny, który jest powtarzalny, wszystkimi lub tylko wybranymi z zaimplementowanych metod. Wszystkie otrzymane wyniki są skojarzone z odpowiednim zestawem danych pomiarowych i przechowywane oddzielnych plikach. Po odpowiednim skonfigurowaniu programu, dla transformatorów, istnieje możliwość natychmiastowej sygnalizacji faktu przekroczenia przez dowolny z gazów wartości granicznych. Podobnie mogą być sygnalizowane te wartości stężeń gazów, które są mniejsze od analitycznej granicy wykrywalności zalecanej przez IEC 60599, co może wpływać na wiarygodność wypracowanych diagnoz.



Rys.1. Przykład wizualizacji wyników diagnostyki DGA w programie Dino

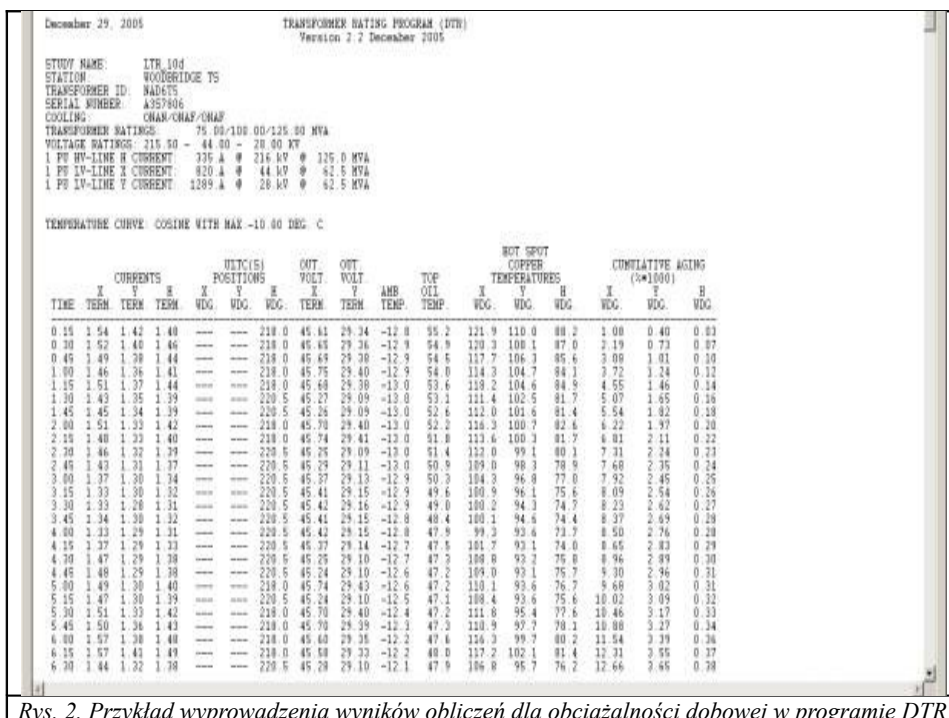
Istotnym uzupełnieniem metod diagnostycznych jest udostępniona w programie funkcja graficznej prezentacji wszystkich danych pomiarowych zgromadzonych w bazie. W przypadku gazów rozpuszczonych w oleju można śledzić zmienność ich stężeń, przyrostów i ilorazów charakterystycznych w czasie. Jeśli użytkownik

zdecyduje się na obserwację zmian stężeń gazów to może również przywołać przebiegi pokazujące zmienność powiązanych z nimi deskryptorów statystycznych, takich jak: średnia, odchylenie średnie, mediana, skośność i smukłość.

#### 4.2. Program do określania temperatur w izolacji i czasu życia

Program DTR (Dynamic Transformer Ratings) służy do zarządzania czasem życia izolacji transformatorów energetycznych z izolacją papierowo-olejową. Zakładając, że czas życia izolacji jest tożsamy z czasem życia transformatora, można uznać, że DTR jest programem do zarządzania czasem życia transformatora. Program rozpoznaje rodzaj transformatora (dwu- czy trójzwojeniowy, rdzeniowy czy płaszczowy, autotransformator, ława transformatorowa) oraz rodzaj przełącznika zaczepów. W przypadku podobciążeniowych przełączników zaczepów program uwzględnia sekwencje koniecznych dla utrzymania napięcia przełączeń. Program umożliwia wykonywanie obliczeń trzema metodami: (1) według PN-IEC 60354 [3]; (2) według IEEE Std C57.91-1995 rozdział 7 [2]; (3) według IEEE Std C57.91-1995 załącznik G [2].

Różne metody szacowania czasów życia prowadzą do różnych wyników obliczeń czasów życia przy zadanej temperaturze uzwojeń lub temperatur uzwojeń przy zadanej wartości ubytku czasu życia, odpowiednio do wybranej opcji obliczeń. Metoda Montsingera według IEC [3], prowadzi do ostrożniejszych wyników niż metoda Arrheniusa według IEEE [2].



Rys. 2. Przykład wyprowadzenia wyników obliczeń dla obciążalności dobowej w programie DTR

Podstawowe opcje programu to: (1) **Obliczenia proste** (Simple) – wykonywane są obliczenia temperatur oleju w górnej i dolnej warstwie, temperatury najgorętszego punktu uzwojenia oraz zesterzenia izolacji bezwzględne i względem jednej doby w danym cyklu obciążenia; (2) **Obliczenia awaryjnych obciążeń dobowych** (Long Time Emergency – LTE) – wykonywane są obliczenia mające na celu dobranie możliwie największego obciążenia, przy czym nie mogą zostać przekroczone ograniczenia zadane przez użytkownika; (3) **Obliczenia krótkotrwałych dopuszczalnych obciążeń przy zadanym obciążeniu wstępnym** (Short Time Emergency - STE) – wyznaczane są krótkotrwałe przeciążenia (rzędu minut lub godzin); (4) **Zdefiniowane obciążenie awaryjne** (Load Emergency Calculation) to opcja, w której program ma zadane kilkudobowe zmiany obciążenia: doba przed obciążeniem awaryjnym, doba z obciążeniem awaryjnym dla której definiuje się godzinę i wartość obciążenia awaryjnego, oraz kilka dób po awarii.

Program DTR uwzględnia zmienność dobową obciążenia transformatora: rzeczywistą czytowaną w systemie on-line dla obliczeń bieżących lub prognozowaną dla obliczeń prognostycznych. Program pozwala na uwzględnienie zmian temperatury otoczenia: czytowanej w systemie on-line dla obliczeń bieżących lub prognozowaną w oparciu o różne wzory prognostyczne np. w oparciu o wzór podany w normie [3].

Na rys. 2 pokazano przykładowe obraz ekranu komputera dla wyników uzyskanych z programu DTR.

## 5. PODSUMOWANIE

Diagnostyka stanu transformatorów energetycznych dużej mocy i na wysokie napięcia jest dziedziną o dużej dynamice rozwoju. Doskonalone są głównie metody nie wymagające wyłączenia transformatora spod napięcia.

Najistotniejszym, z punktu widzenia niezawodności pracy, jest układ izolacyjny. Normy utożsamiają czas życia izolacji z czasem życia całego transformatora. W związku z tym metody śledzenia i diagnozowania układu izolacyjnego stanowią podstawę diagnostyki stanu transformatora. Wśród tych metod pierwszoplanową rolę odgrywa metoda analizy gazów rozpuszczonych w oleju i metody pomiaru wyładowań niezupełnych.

W ZWN PŁ prowadzone są prace w wyniku, których zaproponowano program numeryczny DINO stanowiący propozycję bazy danych i programu ekspertowego oraz opracowano oryginalną, statystyczną metodę analizy DGA wykorzystującą wszystkie wyniki badań DGA w całej historii życia transformatora. W trakcie testowania jest program do zarządzania czasem życia izolacji oparty o propozycje zawarte w normach IEEE i IEC. Program obejmuje wszystkie rodzaje transformatorów i możliwe schematy regulacji przekładni.

## 6. LITERATURA

- [1] Y. Han, Y.H. Song – „Condition Monitoring Techniques for Electrical Equipment – A Literature Survey”, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 18, No 1, January 2003, pp. 4-13
- [2] IEEE Std C57.91-1995, IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers, (1996).
- [3] PN-IEC 60354, Przewodnik obciążania transformatorów olejowych, (1999)