

Urządzenia wykorzystywane w układach monitorowania stanu przepustów transformatorów najwyższych napięć

Streszczenie. Artykuł przedstawia opis urządzeń wykorzystywanych do monitorowania stanu przepustów transformatorowych. Przedstawione zostały układy pomiarowe, wykorzystywane do określania stanu przepustów, oraz metody pomiarowe, takie jak metoda współczynnika strat dielektrycznych, spektroskopia częstotliwościowa oraz metoda emisji akustycznej. Przedstawiony został opis układów monitorowania stanu przepustów transformatorów, opracowanych przez producentów takich, jak: Omicron, Qualitrol, Doble Engineering Company oraz Mikronika.

Abstract. The article presents a description of devices used for monitoring the condition of transformer bushings. There were presented the measurement systems used to determine the condition of bushings and measurement methods such as the method of dielectric losses, frequency spectroscopy and acoustic emission method. There was presented a description of monitoring systems used to determine the condition of transformer bushings, developed by manufacturers such as Omicron, Qualitrol, Doble Engineering Company and Mikronika. (Devices used for monitoring the condition of High Voltage transformer bushings).

Słowa kluczowe: izolator, przepust, transformator, wyładowania niepełne.

Keywords: insulator, bushing, transformer, partial discharges.

Wstęp

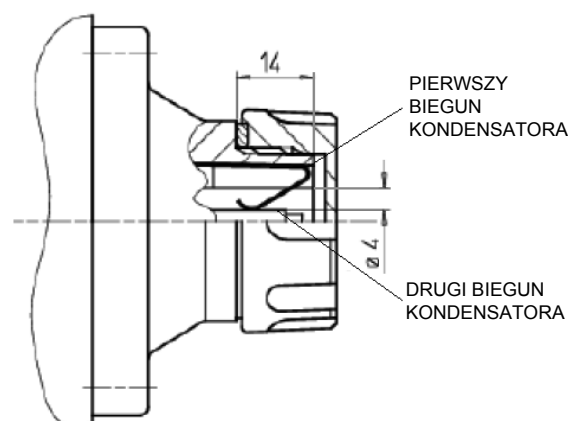
Krajowy System Elektroenergetyczny obejmuje rozbudowany układ urządzeń do wytwarzania, przesyłania i dystrybucji energii elektrycznej do odbiorców. W jego skład wchodzi elektrownie (w Polsce głównie opalane węglem kamiennym i brunatnym), linie oraz stacje elektroenergetyczne. Przesyłanie energii elektrycznej na duże odległości wiąże się ze znacznymi stratami. W związku z tym, w celu ich ograniczenia, istnieje konieczność stosowania wysokiego napięcia w przypadku elektroenergetycznych sieci przesyłowych. Podwyższanie napięcia prowadzi do obniżenia strat mocy, które są proporcjonalne do kwadratu wartości natężenia prądu elektrycznego. Stosowanie wysokiego napięcia pociąga za sobą konieczność wykorzystania izolatorów i przepustów, pozwalających na zapewnienie właściwej izolacji między torami prądowymi, mającymi wysoki potencjał w stosunku do ziemi. Izolatory i przepusty umożliwiają w związku z tym praktyczne i bezpieczne użytkowanie wysokiego napięcia. Ze względu na wysokie wartości napięć, czyli i natężeń pola elektrycznego (mogącego uszkadzać izolację przepustów i izolatorów), szczególnie ważnym zagadnieniem jest monitorowanie ich stanu.

Główną przyczyną występowania uszkodzeń przepustów transformatorowych jest nierównomierny rozkład pola elektrycznego w strukturze wewnętrznej materiału izolacyjnego. W celu ograniczenia występowania tego zjawiska, stosowane jest sterowanie rozkładem pola elektrycznego - dzięki zastosowaniu przewodzących ekranów. W przypadku sterowania pojemnościowego, nierównomierność rozkładu pola elektrycznego jest znacznie mniejsza niż w przypadku braku sterowania - co w znaczny sposób zmniejsza ryzyko występowania uszkodzeń izolatorów przepustowych.

Układy pomiarowe wykorzystywane do określania stanu przepustów – systemy wymagające zastosowania układu pomiarowego – sygnały z gniazda pomiarowego

Jednym z elementów wyposażenia przepustu (zwłaszcza przepustów transformatorowych) jest gniazdo pomiarowe. Schemat konstrukcyjny gniazda pomiarowego przedstawiony został na rysunku 1. Gniazdo pomiarowe umożliwia, przede wszystkim, pomiar pojemności i współczynnika strat dielektrycznych ($\tan\delta$) przepustu - które są parametrami charakterystycznymi, określającymi jego stan. Istnieje również możliwość ciągłej rejestracji napięcia

oraz monitorowania występowania wyładowań niepełnych. W celu ograniczenia napięcia, występującego na zaciskach gniazda pomiarowego, do dopuszczalnej wartości 1,5 kV (określonej jako wytrzymałość napięciowa), w przypadku braku wykorzystania przepustu w układzie pomiarowym, istnieje konieczność równoległego dołączenia impedancji.



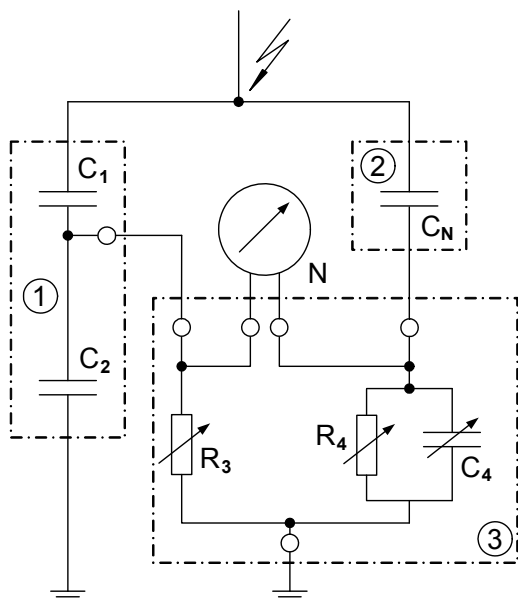
Rys.1. Schemat konstrukcyjny gniazda pomiarowego, wg [1]

Konstrukcja mechaniczna gniazda pomiarowego zapewnia automatyczne połączenie elektryczne pomiędzy kołnierzem a ekranem (czyli zwarcie obu wyprowadzeń pomiarowych w celu zmniejszenia napięcia pomiarowego do wartości 0), którego otwarcie następuje jedynie podczas wsunięcia wtyku sprzęgającego (o grubości 4 mm) lub konwertera wtykowego.

Przedstawiony na rysunku 2. układ pomiarowy wymaga wyłączenia badanego przepustu z eksploatacji i dołączenia dodatkowych elementów: kondensatora wzorcowego i mostka Scheringa. W skład przedstawionego układu pomiarowego wchodzi następujące elementy:

- pojemności C_1 i C_2 odwzorowują izolator przepustowy,
- pojemność C_N odwzorowuje kondensator wzorowy,
- mostek Scheringa składający się z elementów R_3 , R_4 , C_4 ,
- wskaźnik zera N.

Zarówno do badanego przepustu, jak i do kondensatora wzorcowego, przyłożone jest napięcie rzędu kilkuset volt, o częstotliwości sieciowej 50 Hz. W gałęziach mostka Scheringa występują równoważone spadki napięć na poszczególnych elementach, wskutek czego do gniazda pomiarowego dopływa obniżone napięcie.



Rys.2. Schemat ideowy układu pomiarowego, wg [1]

Układ pomiarowy zawiera kondensator wzorcowy C_N , który stanowi wartość odniesienia dla pojemności izolatora C_1 . Regulując wartość rezystancji elementów R_3 i R_4 , dążymy do zrównoważenia mostka Scheringa. O fakcie tym informuje wskaźnik zera N . Jest to woltomierz, który w przypadku zrównoważenia mostka wskazuje wartość 0 - czyli informuje o zerowej różnicy potencjałów pomiędzy gałęziami mostka Scheringa. Wartość pojemności C_1 uzyskiwana jest przy wykorzystaniu wzoru:

$$(1) \quad C_1 = C_N \cdot \frac{R_4}{R_3}$$

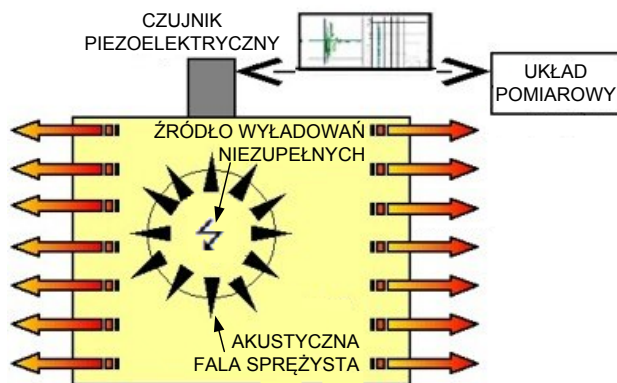
Współczynnik strat dielektrycznych $\text{tg} \delta$ określa stosunek natężenia składowej rzeczywistej do składowej urojonej prądu płynącego przez dielektryk (szczegółowy opis tej metody pomiarowej znajduje się w dalszej części artykułu). W przypadku analizowanego układu pomiarowego, wartość współczynnika $\text{tg} \delta$ wyznaczana jest na podstawie nastawionych wartości elementów mostka Scheringa, wśród których wartość pojemności kondensatora C_4 odwzorowuje wartość składowej pojemnościowej, natomiast wartość rezystora R_4 odwzorowuje wartość składowej rzeczywistej prądu płynącego w izolacji badanego przepustu. Wartość składowej rzeczywistej płynącego w izolacji prądu związana jest z prądem upływu, który pojawia się w rzeczywistych warunkach pracy przepustów transformatorowych. Wartość współczynnika strat dielektrycznych wyznaczana jest za pomocą wzoru:

$$(2) \quad \text{tg} \delta = R_4 \cdot 2\pi f \cdot C_4$$

Układy pomiarowe wykorzystywane do określania stanu przepustów – systemy monitorowania ciągłego – pomiar sygnałów akustycznych

Pomiar sygnałów akustycznych wyładowań niepełnych odbywa z wykorzystaniem metody emisji akustycznej, która polega na rejestrowaniu akustycznych fal

sprężystych, generowanych podczas występowania wyładowań niepełnych w izolacji przepustów transformatorowych. Na rysunku 3. przedstawiony został schemat układu pomiarowego, wykorzystującego metodę emisji akustycznej.

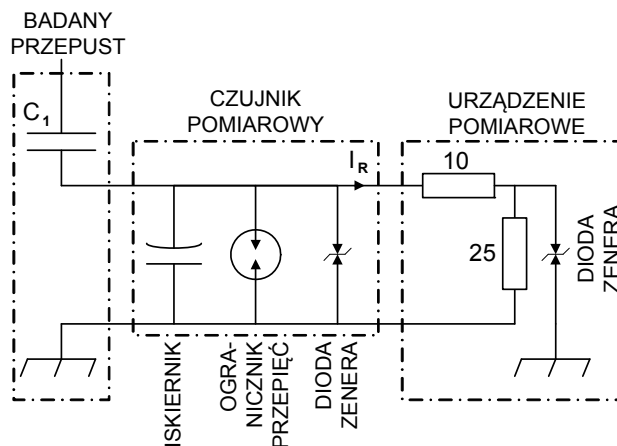


Rys.3. Schemat ideowy układu pomiarowego, wykorzystującego metodę emisji akustycznej, wg [2]

Akustyczne sygnały, towarzyszące występowaniu wyładowań niepełnych, rozchodzą się w sposób kulisty i są rejestrowane przez, przytwierdzone do badanego obiektu, czujniki piezoelektryczne - których zasada działania wykorzystuje zjawisko piezoelektryczne. Polega ono na indukowaniu ładunków elektrycznych podczas oddziaływania naprężeń mechanicznych na (wykonane z materiału o właściwościach piezoelektrycznych) czujniki pomiarowe. W ten sposób akustyczna fala sprężysta, towarzysząca występowaniu wyładowań niepełnych, przetwarzana jest do postaci sygnału napięciowego - który przesyłany jest następnie do układu pomiarowego i poddawany analizie. Pomiar sygnałów akustycznych, rejestrowanych podczas eksploatacji badanego izolatora przepustowego, dostarcza informacji o rozwoju uszkodzeń występujących w strukturze materiału izolacyjnego.

Układy pomiarowe wykorzystywane do określania stanu przepustów – systemy monitorowania ciągłego – pomiar sygnałów z gniazda pomiarowego

Gniazdo pomiarowe umożliwia (przede wszystkim) pomiar pojemności i współczynnika strat dielektrycznych przepustu, które są parametrami charakterystycznymi, określającymi jego stan. Wykorzystywane jest ono również w celu ciągłej rejestracji napięcia oraz monitorowania występowania wyładowań niepełnych.



Rys.4. Schemat układu pomiarowego, pozwalającego na pomiar sygnałów z gniazda pomiarowego, wg [3]

Na rysunku 4. przedstawiony został układ pomiarowy, pozwalający na pomiar sygnałów z gniazda pomiarowego.

Badany przepust transformatorowy odwzorowany jest za pomocą pojemności C_1 . Do gniazda pomiarowego przepustu podłączony jest czujnik pomiarowy. Składa się on z włączonych równolegle elementów, służących obniżeniu wartości napięcia pomiarowego, takich jak: iskiernik, ogranicznik przepięć i dioda Zenera.

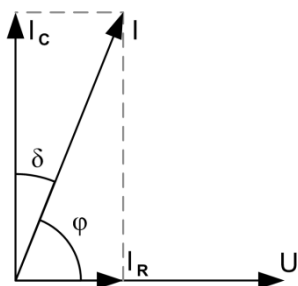
Zadaniem iskiernika jest ograniczenie (występującego na zaciskach gniazda pomiarowego) napięcia do wartości dopuszczalnej 1500 V, określonej jako wytrzymałość napięciowa. Po przekroczeniu tej wartości, określonej jako napięcie zapłonu, następuje gwałtowny spadek wartości rezystancji wewnętrznej iskiernika, wskutek czego zaczyna on przewodzić prąd i w układzie występuje doziemienie.

Ogranicznik przepięć stosowany jest w celu ochrony przed występującymi przepięciami łączeniowymi oraz atmosferycznymi. Jego zadaniem jest ograniczenie napięcia pomiarowego do wartości 150 V. Kolejnym elementem czujnika pomiarowego jest półprzewodnikowa dioda Zenera. Jej podstawowym parametrem jest napięcie przebicia, po przekroczeniu którego następuje gwałtowny wzrost płynącego przez diodę prądu. Zastosowanie diody Zenera pozwala na ograniczenie napięcia pomiarowego do wartości 13 V.

Wartość prądu roboczego I_R na wyjściu czujnika pomiarowego mieści się w przedziale od 1 do 100 mA. Urządzenie pomiarowe odwzorowane jest za pomocą połączonych szeregowo rezystorów, o wartościach rezystancji 10 Ω i 25 Ω , oraz diody Zenera, służącej zabezpieczeniu układu. Zasada działania urządzenia pomiarowego polega na pomiarze płynącego przez rezystory sygnału prądowego I_R .

Metoda współczynnika strat dielektrycznych

Współczynnik strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ określa stosunek natężenia składowej rzeczywistej do składowej urojonej prądu płynącego przez dielektryk w zmiennym polu elektrycznym. Zmiana wartości tego współczynnika informuje o procesach starzenia izolacji oraz degradacji pod wpływem temperatury, informuje o uszkodzeniach mechanicznych izolatora (takich jak pęknięcia) oraz o zabrudzeniu i zawilgoceniu izolacji.



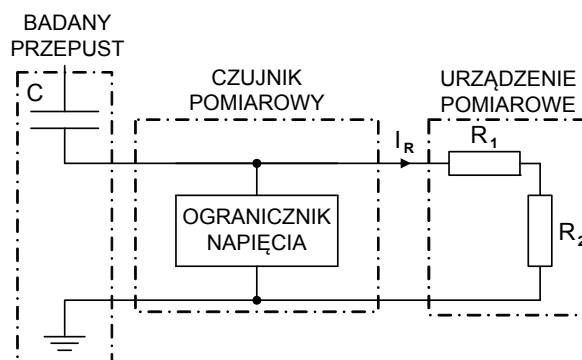
Rys.5. Wykres wskazowy systemu izolacji, wg [4]

Na rysunku 5. przedstawiony został wykres wskazowy systemu izolacyjnego. W idealnych warunkach pracy, wektory przyłożonego napięcia U i płynącego prądu I są do siebie prostopadłe - w izolacji płynie jedynie prąd pojemnościowy I_C . W rzeczywistych warunkach pracy, oprócz prądu pojemnościowego, występuje również prąd upływu I_R - którego wektor jest równoległy do przyłożonego napięcia. Współczynnik strat dielektrycznych określa relacje pomiędzy składowymi prądu płynącego przez dielektryk i określony jest za pomocą wzoru:

$$(3) \quad \text{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C}$$

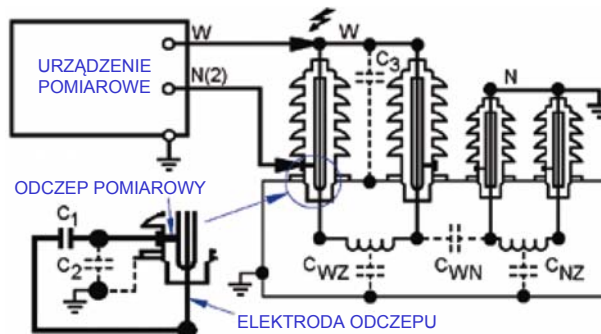
Pomiaru parametru współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ można dokonać w stanie normalnej pracy transformatora, korzystając z odpowiedniego układu pomiarowego, wykorzystującego gniazdo pomiarowe lub (po wyłączeniu transformatora) przy wykorzystaniu zewnętrznego źródła i odpowiedniego układu pomiarowego.

Na rysunku 6. pokazano układ pomiarowy wykorzystywany w przypadku pomiarów wykonywanych podczas normalnej pracy transformatora. Układ ten wykorzystuje sygnały z gniazda pomiarowego badanego przepustu, do którego przyłączony jest czujnik pomiarowy. W swojej budowie zawiera on włączony równolegle element ograniczający napięcie, którym może być iskiernik lub ogranicznik przepięć. Następnie zmierzone sygnały prądowe wpływają do urządzenia pomiarowego, które jest odwzorowane w postaci dwóch rezystorów o rezystancji R_1 i R_2 . Wielkością mierzona przez urządzenie pomiarowe jest wartość prądu I_R , płynącego przez rezystory R_1 i R_2 .



Rys.6. Schemat układu pomiarowego, wykorzystywany w przypadku metody współczynnika strat dielektrycznych, wg [3]

Na rysunku 7. przedstawiony został schemat prezentujący układ pomiarowy, stosowany w przypadku pomiarów współczynnika $\text{tg}\delta$ dla przepustów transformatorowych.



Rys.7. Schemat ideowy układu pomiarowego, wg [4]

Do gniazda pomiarowego podłączony jest przewód niskonapięciowy, natomiast do zacisku (w górnej części przepustu) podłączony jest przewód wysokonapięciowy. Pojemność pomiędzy zaciskami wysokiego i niskiego napięcia oznaczono jako C_{WN} , natomiast pojemności pomiędzy poszczególnymi zaciskami a ziemią oznaczono jako C_{WZ} i C_{NZ} . Pojemność pomiędzy zaciskiem wysokiego napięcia a gniazdem pomiarowym izolatora oznaczona została jako C_1 , natomiast C_2 odwzorowuje pojemność pomiędzy gniazdem pomiarowym a ziemią. Pomiary dokonywane są przy uziemionej kadzi transformatora.

Metoda spektroskopii częstotliwościowej

Pomiar stratności dielektrycznej jest standardową metodą diagnostyczną, jednak w praktyce okazuje się ona niewystarczająca - ze względu na to, iż pomiar wykonywany jest w warunkach różniących się od rzeczywistych warunków pracy (przy znacznie niższym napięciu i temperaturze), wskutek czego czułość pomiaru nie jest wystarczająca i nie pozwala na zidentyfikowanie początkowego etapu degradacji izolatora przepustowego.

W związku z tym, stosowane są metody polaryzacyjne (takie jak spektroskopia częstotliwościowa), które dają doskonałe rezultaty w wykrywaniu degradacji i zawilgocenia izolacji.

Znaczącą ich wadą jest jednak to, że wymagają one wyłączenia badanego urządzenia z ruchu, co niejednokrotnie jest niemożliwe. Dlatego w pierwszej kolejności stosowane są metody bezwyłączeniowe.

Spektroskopia częstotliwościowa polega na pomiarze pojemności i współczynnika strat dielektrycznych w szerokim zakresie częstotliwości, dzięki czemu, w odróżnieniu od standardowej metody pomiaru współczynnika $\tan\delta$, daje ona znacznie lepsze rezultaty w diagnostyce przepustów transformatorowych.

Na rysunku 8. pokazano schemat układu pomiarowego, wykorzystywany w przypadku pomiarów wykonywanych podczas normalnej pracy transformatora z użyciem metody spektroskopii częstotliwościowej. W skład układu pomiarowego wchodzi wzmacniacz wysokiego napięcia, który jest połączony z gniazdem pomiarowym badanego przepustu transformatorowego. Umożliwia on pomiary współczynnika strat dielektrycznych, przy napięciu pomiarowym o wartości szczytowej do 30 V, w zakresie częstotliwości od 0,001 Hz do 100 Hz. Następnie, zarejestrowane sygnały prądowe przesyłane są do systemu pomiarowego, gdzie poddawane są analizie i interpretacji.



Rys.8. Schemat ideowy układu pomiarowego, wykorzystywanego w przypadku spektroskopii częstotliwościowej, wg [5]

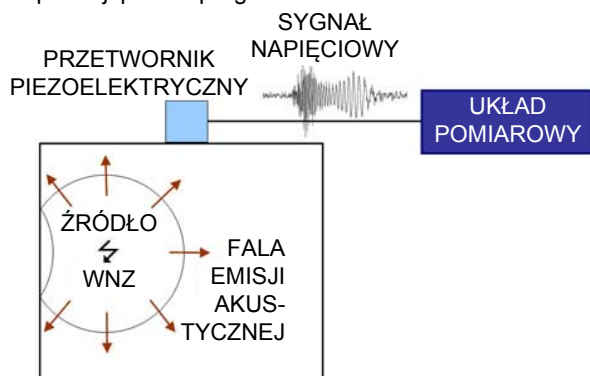
Metoda emisji akustycznej

Metoda emisji akustycznej wykorzystuje fakt, iż podczas występowania wyładowań niezupełnych generowane są akustyczne fale sprężyste. Niewielka część energii wyładowania ulega zamianie na energię akustyczną. Z wielu miejsc generacji rozchodzą się, w sposób kulisty, fale akustyczne, których impulsy są względem siebie przesunięte czasowo i przestrzennie. Pozwala ona na stwierdzenie oraz lokalizację miejsca występowania źródeł wyładowań niezupełnych ze względu na czas propagacji impulsów i amplitudę drgań, które prowadzą do uszkodzenia struktury izolacji. Stosowanie tej metody jest coraz bardziej skuteczne. Problemem pozostaje jednak ocena stopnia zagrożenia izolacji.

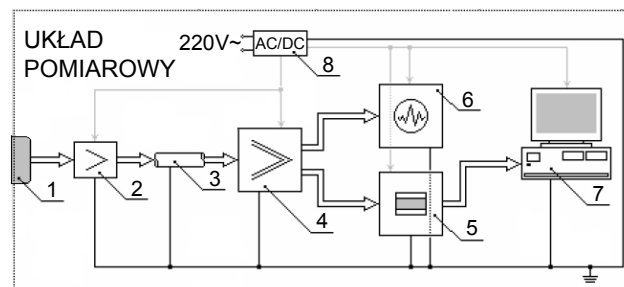
Na rysunku 9. przedstawiony został schemat ideowy układu pomiarowego, wykorzystującego metodę emisji akustycznej. Fale akustyczne, generowane podczas występowania wyładowań niezupełnych, rejestrowane są przez czujniki (przetworniki) piezoelektryczne, których zasada działania opiera się na zjawisku piezoelektrycznym. Polega ono na indukowaniu ładunków elektrycznych podczas oddziaływania naprężeń mechanicznych na czujniki pomiarowe, wykonane z kryształu o właściwościach piezoelektrycznych. W ten sposób fala emisji akustycznej,

towarzysząca występowaniu wyładowań niezupełnych, przetwarzana jest do postaci sygnału napięciowego - który następnie przesyłany jest do układu pomiarowego, gdzie poddawany jest analizie i interpretacji.

Na rysunku 10. przedstawiony został schemat elektronicznego układu pomiarowego. Akustyczne sygnały wyładowań niezupełnych (o częstotliwości rzędu kilkuset MHz), zarejestrowane przez czujnik piezoelektryczny, są wzmacniane i przesyłane do oscyloskopu, gdzie są wyświetlane w postaci rzeczywistych przebiegów, oraz do karty pomiarowej, za pomocą której sygnały pomiarowe przetwarzane są z postaci analogowej do postaci cyfrowej i przesyłane do komputera, w celu dalszej analizy i interpretacji przez oprogramowanie.



Rys.9. Schemat ideowy układu pomiarowego, wykorzystującego metodę emisji akustycznej, wg [6]



Rys.10. Schemat elektronicznego układu pomiarowego, wykorzystującego metodę emisji akustycznej: 1 - czujnik piezoelektryczny, 2 - przedwzmacniacz, 3 - przewód transmisyjny, 4 - wzmacniacz, 5 - karta pomiarowa, 6 - oscyloskop, 7 - komputer, 8 - zasilanie; wg [7]

Mikronika SMT-101

Jest to rejestrator służący do identyfikacji przebiegów występujących na przepustach transformatorowych. Urządzenie znajduje zastosowanie we wszystkich typach transformatorów sieciowych i blokowych, które są wyposażone w przepusty z gniazdami pomiarowymi. Rejestrator może pracować w ramach systemu eksperckiego bądź też bez systemu nadrzędnego.

Wielkościami monitorowanymi przez urządzenie są:

- przebiegi łączeniowe i atmosferyczne,
- wartości skuteczne i chwilowe napięć zarejestrowanych przez sondy pomiarowe,
- upływ prądu w izolacji przepustu.

Urządzenie zainstalowane jest w szafce transformatora i połączone z sondami pomiarowymi, przyłączonymi do gniazd pomiarowych przepustów izolacyjnych badanego transformatora.

Działanie rejestratora SMT-101 polega na:

- wykrywaniu i zliczaniu przebiegów występujących na liniach zasilających,
- rejestrowaniu wartości skutecznych napięć oraz przebiegu napięcia na przepustach, w postaci

oscyllogramu uzyskiwanego z wysoką częstotliwością próbkowania,

- wyznaczeniu względnej zmiany współczynnika stratności dielektrycznej,
- wyliczaniu dynamicznych i długookresowych zmian pojemności przepustu.

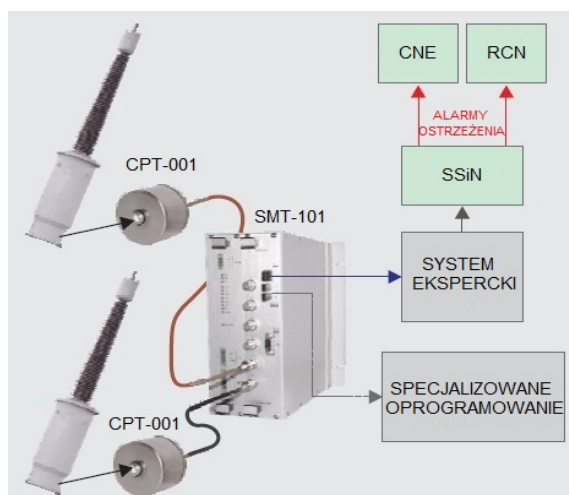
Wszystkie pomiary i rejestracje są realizowane przez oprogramowanie analityczne, zaimplementowane w urządzeniu SMT-101. W celu realizacji szybkiej akwizycji próbek wykorzystane zostało oprogramowanie FPGA Cyclone II, natomiast w celu konfiguracji komunikacji, obliczeń i archiwizacji zastosowany został system RTMS, działający w trybie czasu rzeczywistego. W celu generacji raportów, alarmów i ostrzeżeń wykorzystane zostały protokoły 61850 oraz DNP3.0. Dostęp do plików zrealizowany jest przy użyciu serwera FTP.

Pobudzenie urządzenia następuje wskutek:

- przekroczenia progu napięciowego,
- wystąpienia szybkiej zmiany wartości napięcia,
- zwiększenia licznika przepięć.

Urządzenie komunikuje się z oprogramowaniem diagnostycznym. Przykładem może być zewnętrzny system monitoringu SYNDIS ES firmy Mikronika, który pobiera sygnały z urządzenia nadzorującego SMT-101 i, na ich podstawie, realizuje funkcje analityczne, takie jak:

- identyfikacja gwałtownej zmiany pojemności przepustu,
- wyznaczenie zmian współczynnika stratności dielektrycznej,
- wyznaczenie długotrwałej zmiany pojemności.



Rys.11. Schemat aplikacji SMT-101, wg [8]

Na rysunku 11. przedstawiony został schemat aplikacji SMT-101. Generowane przez system ekspercki spostrzeżenia i alarmy przekazywane są do Systemu Sterowania i Nadzoru (SSiN), centrów nadzoru ruchu (RCN) oraz centrów nadzoru eksploatacji (CNE).

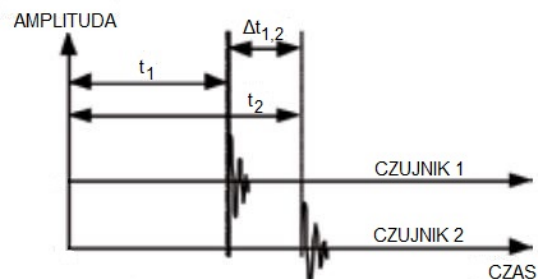
Adaptory CPT-001 wykorzystywane są w celu połączenia urządzenia Mikronika SMT-101 z badanymi przepustami transformatorowymi. Zasada działania polega na metodzie względnej napięciowej. W swojej budowie zawierają one odpowiednio zabezpieczony dzielnik pojemnościowy. Połączenie z urządzeniem SMT-101 stanowi przewód ekranowany RG400, wyposażony w dodatkową osłonę.

Omicron PDL 650

Jest to akustyczny lokalizator wyładowań niepełnych w urządzeniach wysokiego napięcia. Urządzenie lokalizuje

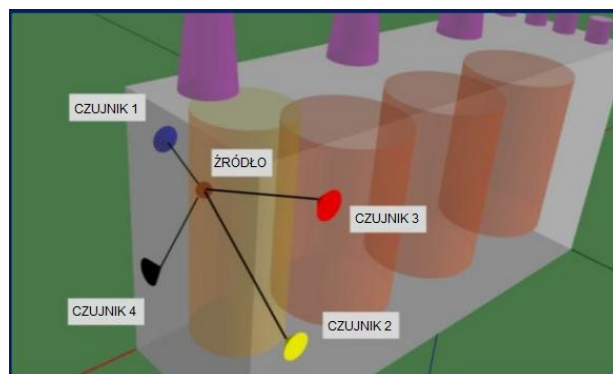
sygnały akustyczne, spowodowane przez występowanie wyładowań niepełnych metodą emisji akustycznej. Zastosowane zostały czujniki piezoelektryczne, dokonujące pomiarów w zakresie częstotliwości od kilkudziesięciu do kilkuset kHz.

Na rysunku 12. przedstawiona została zasada działania urządzenia PDL 650. Dane z wielu sensorów są porównywane i przetwarzane przez oprogramowanie w model geometryczny, bazując na różnicy czasu pomiędzy przychodzącymi sygnałami. Następnie powstaje trójwymiarowy widok transformatora, który może być obracany w dowolnym kierunku. Obrazuje on miejsce występowania uszkodzenia, co pozwala na precyzyjną lokalizację.



Rys.12. Zasada działania urządzenia PDL 650, wg [9]

Lokalizacja miejsca występowania źródła wyładowań niepełnych odbywa się w oparciu o dostępne czasy oraz szybkość propagacji. Na podstawie tych danych, system dokonuje obliczeń odległości pomiędzy źródłem zakłóceń a poszczególnymi czujnikami. Na podstawie obliczonych odległości i umiejscowienia czujników następuje lokalizacja miejsca występowania wyładowań niepełnych. Na rysunku 13. przedstawiony został sposób lokalizacji miejsca występowania wyładowań niepełnych przez urządzenie PDL 650.

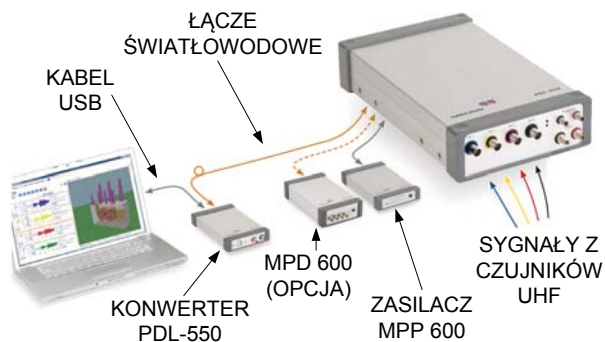


Rys.13. Lokalizacja miejsca występowania wyładowań niepełnych, wg [9]

Dokładność analizy zależy od szeregu czynników, takich jak:

- miejsce występowania źródła wyładowań niepełnych,
- struktura wewnętrzna transformatora - jej znajomość ma znaczący wpływ na odpowiednie umiejscowienie czujników,
- możliwość występowania wielu dróg przenoszenia się sygnałów pomiędzy źródłem a czujnikiem,
- zależność prędkości dźwięku od drogi przenoszenia sygnałów, częstotliwości oraz temperatury.

Na rysunku 14. przedstawiony został schemat połączeń urządzenia PDL 650. Czujniki, przytwierdzone magnetycznie do części zewnętrznej transformatora, połączone są z urządzeniem za pomocą kabli koncentrycznych. Urządzenie PDL 650 komunikuje się z komputerem PC, przysyłając wszystkie dane za pomocą przewodów światłowodowych do konwertera, a następnie za pomocą portu USB. Zastosowanie łącza światłowodowego zapewnia całkowitą izolację elektryczną oraz eliminację przenoszenia się zakłóceń spowodowanych przez pole magnetyczne i elektryczne. W celu przeprowadzenia dokładniejszej analizy, rejestrator PDL-650 może być połączony z urządzeniem MPD 600 i konwerterem PDL-550. Istnieje również możliwość współpracy urządzenia PDL 650 z litowo – polimerową baterią MPP 600, która zapewnia pracę niezależnie od źródła zasilania. Urządzenie posiada 16 kanałów pomiarowych. Wszystkie pomiary mogą być zapisywane i odtwarzane do późniejszej analizy.



Rys.14. Schemat połączeń urządzenia PDL 650, wg [10]

Omicron MPD 600

Jest to urządzenie lokalizujące wyladowania niepełne na podstawie pomiarów pojemności, z wykorzystaniem gniazda pomiarowego. Na rysunku 15. przedstawiony został widok połączenia jednostki pomiarowej z gniazdem pomiarowym badanego przepustu. Połączenie wykonane jest przy użyciu konwertera wtykowego, podłączonego do gniazda pomiarowego izolatora przepustowego.

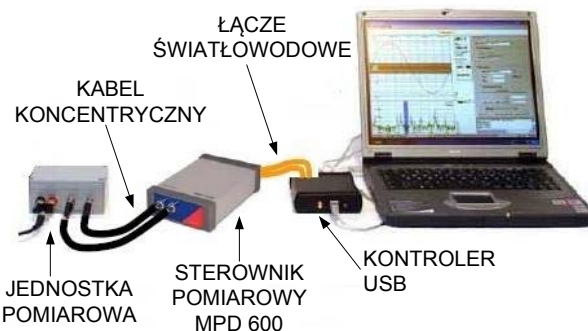


Rys.15. Widok połączenia jednostki pomiarowej z gniazdem pomiarowym przepustu, wg [11]

W skład systemu wchodzi jednostka pomiarowa, sterownik pomiarowy, kontroler USB i komputer klasy PC z oprogramowaniem mtronix. Zastosowanie łącza światłowodowego zapewnia bezpieczeństwo operacji, dzięki całkowitej izolacji galwanicznej od pola elektrycznego i magnetycznego. Wpływa to na redukcję zakłóceń, wysoką czułość oraz wartość współczynnika stosunku sygnału do szumu. Cyfrowe przetwarzanie oraz filtrowanie sygnałów

pomiarowych zapewnia wysoką dokładność analizy badanych przepustów transformatorowych. Zasilanie akumulatorowe pozwala na eliminację zakłóceń generowanych przez zasilacz sieciowy, a niewielki pobór mocy zapewnia pracę przez ponad 20 godzin.

Schemat systemu MPD 600 przedstawiony został na rysunku 16. W jego skład wchodzi jednostka pomiarowa, która jest połączona ze sterownikiem pomiarowym MPD 600 za pomocą kabli koncentrycznych oraz złącz typu BNC. Dane ze sterownika pomiarowego przesyłane są, za pomocą łącza światłowodowego, do kontrolera USB, a następnie do komputera klasy PC (za pomocą portu USB). Współpraca urządzenia MPD 600 z konwerterem UHF 608 lub UHF 620 pozwala na rozszerzenie zakresu pomiarowego oraz redukcję zakłóceń poprzez zmianę częstotliwości środkowej. Zastosowanie czujników UHF umożliwia dokładną analizę badanych przepustów w szerokim zakresie częstotliwości.



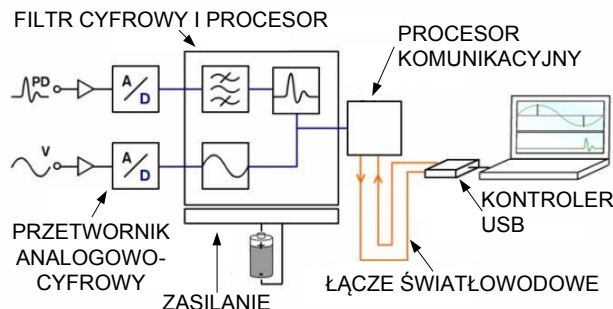
Rys.16. Schemat systemu MPD 600, wg [11]

Urządzenie pozwala na analizę w kilku wariantach:

- tryb podstawowy – w którym parametry i ustawienia są automatycznie zdefiniowane przez oprogramowanie,
- tryb kabel – wariant umożliwiający analizowanie wyladowań niepełnych w kablach wysokonapięciowych,
- tryb ekspercki – w przypadku którego użytkownik ręcznie definiuje wszystkie ustawienia i parametry analizy oraz dostępne są możliwości wizualizacji.

W przypadku trybu eksperckiego istnieje możliwość wizualizacji analizowanych danych pomiarowych w postaci wykresów:

- trójfazowych wykresów relacji amplitudy,
- synchronicznych wielopasmowych pomiarów częstotliwości,
- charakterystyk $Q(U)$ i $H(Q)$,
- oscyloskopowego widoku sygnałów wejściowych wyladowań niepełnych.



Rys.17. Schemat systemu MPD 600, wg [11]

Zasada działania systemu przedstawiona jest na rysunku 17. Sygnały z gniazd pomiarowych przepustów poddawane są procesowi filtracji i wzmocnieniu, a następnie przetwarzane do postaci cyfrowej za pomocą konwertera analogowo-cyfrowego. Detekcja wyłączeń jest uzyskiwana przy użyciu filtrów pasmowo-przepustowych. Sygnały analizowane są przy użyciu metody częstotliwości środkowej, regulowanej w zakresie od 0 Hz do 20 MHz, natomiast pasmo pomiarowe zawiera się w przedziale od 9 kHz do 3 MHz. Pozwala to na wybór odpowiedniego pasma częstotliwości, w celu ograniczenia wpływu zakłóceń i osiągnięcia wysokiej wartości współczynnika SNR (ang. *Signal to Noise Ratio*). Następnie sygnały przesyłane są w celu dalszej analizy przez oprogramowanie za pomocą łącza światłowodowego do kontrolera USB, który jest połączony z komputerem PC.

System MPD 600 działa na zasadzie wielokanałowej. Pozwala to na kontrolowanie wielu jednostek pomiarowych (do 960 przy użyciu łącza światłowodowego). Dzięki temu istnieje możliwość synchronicznego analizowania sygnałów mierzonych na zaciskach wszystkich uzwojeń i punktów gwiazdowych transformatora.

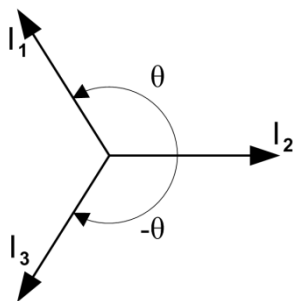
Intelligent Diagnostic Device

Urządzenie służy do zdalnego monitorowania stanu przepustów izolacyjnych i przekładników prądowych (w sposób ciągły) podczas ich pracy, co pozwala na wykrywanie uszkodzeń we wczesnym stadium i ogranicza potrzebę wykonywania kontroli rutynowych badanych urządzeń. IDD jest to zestaw zawierający moduł przetwarzania sygnału, panel kontrolny, wskaźniki kontrolne oraz port RS-232 do lokalnej i zdalnej komunikacji z komputerem klasy PC.

Zasada działania urządzenia polega na:

- pomiarze sygnału elektrycznego w gniazdach pomiarowych przepustów,
- pomiarze prądów upływu, mierzonych w każdym gnieździe pomiarowym.

Stosowana jest metoda składowych symetrycznych. Pomiarów prądów upływu dokonywane są w układzie trójfazowym. Uzyskiwany jest zestaw trzech punktów pomiarowych, po jednym dla każdej z faz. Wartość odniesienia stanowi pomiar dla środkowej fazy. W każdym z tych punktów odnotowywane są wartości trzech fazorów prądów, poddawanych następnie procesowi superpozycji, w celu oceny zmian zachodzących w każdym z przepustów. Na rysunku 18. przedstawiona została ilustracja metody pomiarów względnych.



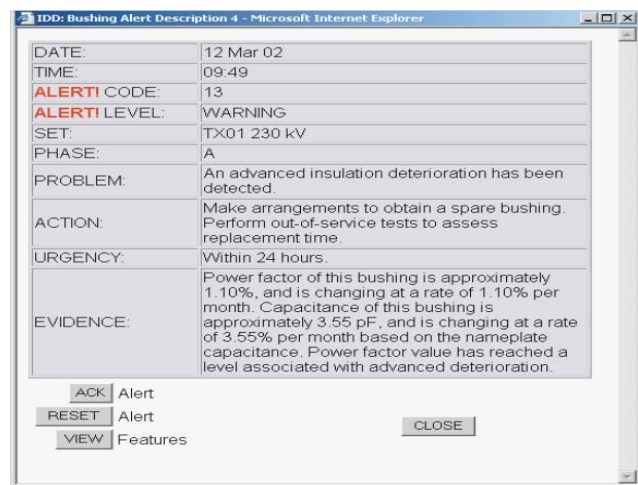
Rys.18. Ilustracja metody pomiarów względnych, wg [12]

Informacja ta pozwala na ustalenie bieżących wartości znormalizowanych pojemności i współczynnika mocy dla poszczególnych przepustów. Działanie systemu polega na pomiarach względnych. Analizowane są zmiany

zachodzące w systemie izolacyjnym. W przypadku wykrycia znaczących zmian, system ekspercki dokonuje identyfikacji przepustu i sugeruje zalecane czynności korygujące.

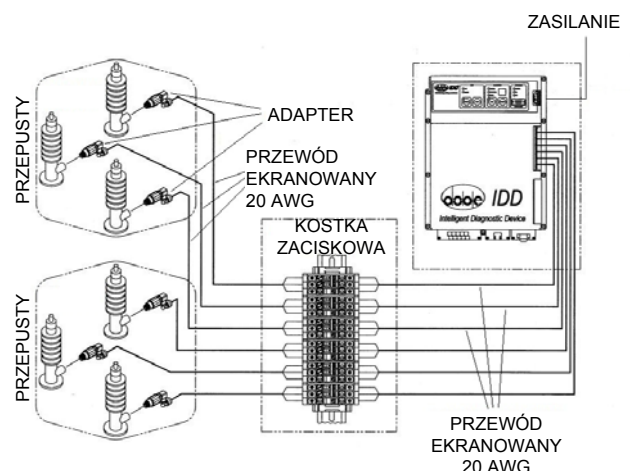
Po wykryciu problemu, system ekspercki dokonuje obliczeń wartości i zmian współczynnika mocy oraz pojemności badanego przepustu, które dostarczają informacji o skali nasilenia problemu. Analiza stanu izolatorów odbywa się poprzez porównanie bieżących wartości z wartościami wzorcowymi.

Oprogramowanie diagnostyczne, po wykryciu nieprawidłowości, generuje odpowiednie powiadomienie. Wyróżniamy trzy kategorie powiadomień: informacja, ostrzeżenie i akcja. Określają one stopień zagrożenia, z których największy priorytet posiada alarm „akcja” i wymaga on zastosowania natychmiastowych czynności naprawczych. Na rysunku 19. przedstawione zostało okno powiadomienia o zagrożeniu, zawierające informacje o lokalizacji uszkodzenia, opis wykrytej nieprawidłowości i sugerowanych czynności naprawczych.



Rys.19. Okno powiadomienia o zagrożeniu, wg [13]

W celu ograniczenia możliwości wystąpienia niewłaściwej oceny stanu przepustów transformatorowych i generowania fałszywych alarmów, stosowane są algorytmy przetwarzania sygnałów eliminujące wpływ zakłóceń i innych czynników środowiskowych. W celu zminimalizowania wpływu zakłóceń, wyznaczane są wartości trendów w okresie dziennym, tygodniowym i miesięcznym.



Rys.20. Schemat konfiguracji połączeń urządzenia IDD, wg [12]

Ochrona przepustów jest realizowana przez zastosowanie zabezpieczenia przeciwprzepięciowego, zawierającego ograniczniki przepięć i iskiernik o napięciu znamionowym 1500 V, oraz dwóch ograniczników napięcia o wartości szczytowej 13 V, przy warunkach pracy normalnej.

Do konfiguracji urządzenia oraz wyświetlania danych oraz alarmów wymagana jest jedynie standardowa przeglądarka internetowa. Oprogramowanie automatycznie wykrywa zainstalowany sprzęt i dokonuje aktywacji odpowiedniej analizy.

Urządzenie może być skonfigurowane z następującymi rozwiązaniami komunikacji zdalnej:

- Ethernet TCP/IP,
- port RS-485,
- modem,
- port RS-232,
- wejście/wyjście.

W ramach nadzoru, urządzenie posiada cztery wyjścia, sygnalizujące powiadomienia i status, oraz dwa wejścia - potwierdzające i resetujące powiadomienia.

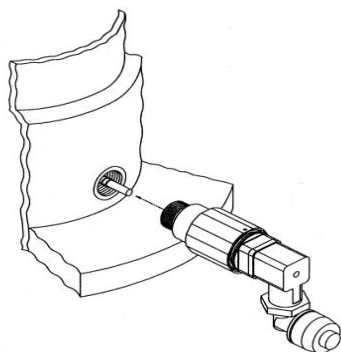
Schemat konfiguracji połączeń urządzenia IDD przedstawiony został na rysunku 20. Urządzenie połączone jest z badanym przepustem transformatorowym za pośrednictwem specjalnie zaprojektowanych adapterów, montowanych na zaczepekach przepustów i pozwalających na pomiar prądów upływu. Połączenie pomiędzy adapterami a urządzeniem jest zrealizowane przy użyciu kostki zaciskowej oraz przewodu ekranowanego 20 AWG.

AWG (ang. *American Wire Gauge*) to znormalizowany system średnic przewodów ekranowanych, stosowany w Stanach Zjednoczonych. Przekrój przewodu bezpośrednio przenosi się na maksymalny prąd, jaki może bezpiecznie przewodzić przewód. W tabeli 1. przedstawione zostały podstawowe parametry techniczne przewodu 20 AWG.

Tabela 1. Dane techniczne przewodu 20 AWG

Parametry techniczne	
Typ przewodu	20 AWG
Średnica	0.812 mm
Liczba zwojów cewki	12.3 na cm
Przekrój	0.518 mm ²
Rezystancja	33,31 Ω/km
Odpowiednik w systemie metrycznym	16/0.2

Adaptory, służące do pomiaru prądów upływu, montowane są na izolatorach przepustowych. Dostosowane są one do producenta i typu przepustu oraz klasy napięcia. W przypadku braku dostępności odpowiedniego adaptera, istnieje możliwość dostosowania go przez producenta do potrzeb użytkownika. Widok zewnętrzny adaptera przedstawiony został na rysunku 21.



Rys.21. Schemat instalacji adaptera, wg [12]

Qualitrol 609 PDM

Jest to urządzenie służące do monitorowania wyladowań niepełnych w transformatorach za pomocą metody emisji akustycznej. Rejestrator pozwala na ciągłe, zdalne monitorowanie stanu przepustów transformatorowych, bez konieczności wyłączenia urządzenia z ruchu. 609 PDM jest kompletnym zestawem zawierającym: czujniki, przewody, konwerter, jednostkę centralną i oprogramowanie.

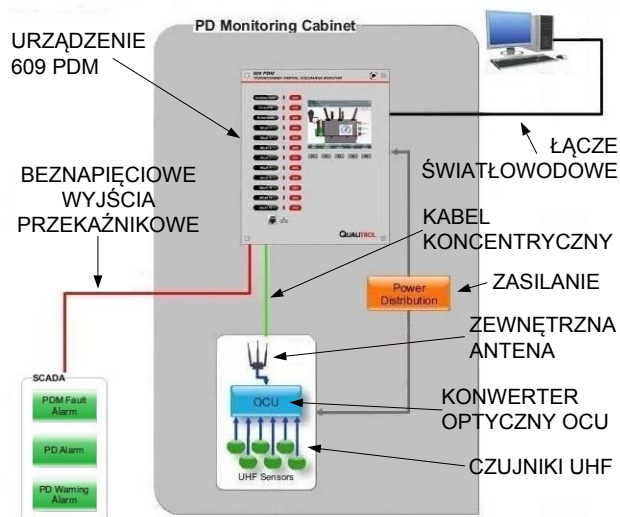
W skład kabiny sprzętowej urządzenia 609 PDM firmy Qualitrol wchodzi:

- jednostka centralna CPU,
- wejście do połączenia z konwerterem,
- wejście sygnału prądowego 4 – 20 mA.

Zastosowane zostały czujniki UHF (ang. *Ultra High Frequency*), które charakteryzują się wysoką czułością i dokładnością pomiaru - większą niż w przypadku popularnie stosowanych rodzajów czujników, np. akustycznych czy DGA. Dodatkowo pomiary dokonywane są w szerokim paśmie pomiarowym z wysoką rozdzielczością. W celu dokładnej lokalizacji miejsca występowania uszkodzenia zastosowano porównywanie amplitudy mierzonych sygnałów. Pozwala to na dokładną analizę stanu badanych przepustów.

Sygnały akustyczne, generowane przy występowaniu wyladowań niepełnych, mierzone są przez czujniki UHF i przesyłane w celu weryfikacji do konwertera OCU, w którym następuje filtracja sygnału i redukcja zakłóceń. Następnie sygnały przesyłane są do kabiny sprzętowej, w której znajduje się jednostka centralna. CPU otrzymuje sygnały do analizy przez oprogramowanie i wysyła sygnały kontrolne z powrotem do konwertera. Sygnały zgromadzone przez czujniki są automatycznie analizowane przez oprogramowanie i wyświetlane na ekranie, w postaci wykresów. Jednocześnie następuje redukcja zakłóceń.

Schemat systemu 609 PDM przedstawiony został na rysunku 22. Połączenie pomiędzy konwerterem a urządzeniem 609 PDM stanowi kabel koncentryczny. Istnieje możliwość podłączenia do konwertera zewnętrznej anteny przeciwzakłóceńowej. Transmisja danych pomiędzy rejestratorem a jednostką centralną CPU odbywa się za pośrednictwem łącza światłowodowego.



Rys.22. Struktura systemu 609 PDM, wg [14]

Urządzenie 609 PDM posiada również beznapięciowe wyjścia przekaźnikowe, służące do komunikacji z systemem nadzorującym SCADA (ang. *Supervisory Control and Data*

Acquisition), którego zadaniem jest wizualizacja i archiwizacja danych oraz generowanie sygnałów alarmowych, takich jak: informacja o nieprawidłowej pracy urządzenia, ostrzeżenie oraz alarm.

Niewątpliwą zaletą jest łatwy i szybki dostęp do dostarczanych przez urządzenie informacji. Generowane są raporty, zawierające wszystkie dane pomiarowe, zapisywane automatycznie w jednym dokumencie. Urządzenie wyposażone jest w wyświetlacz LCD z ekranem dotykowym. Istnieje kilka możliwości wizualizacji zdarzeń (z możliwością zapisu do późniejszej analizy), takich jak: charakterystyka częstotliwościowa wyładowania niezupełnego, charakterystyka częstotliwościowa odpowiedzi impulsowej, krótkoterminowa linia trendu.

W zależności od lokalizacji transformatora i zastosowanych czujników, dostępnych jest od 1 do 24 kanałów pomiarowych. Każdy kanał wyposażony jest w funkcję auto-test, co pozwala na zaoszczędzenie czasu w przypadku wystąpienia usterki.

Zaletą jest również zastosowanie oprogramowania diagnostycznego, kompatybilnego z popularnymi systemami operacyjnymi, zawierającego w sobie wszystkie wymagane funkcje i moduły.

Wnioski i spostrzeżenia

Transformatorowe przepusty izolacyjne najwyższych napięć są istotnym elementem Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, ponieważ ich zastosowanie pozwala na wykorzystywanie wysokiego napięcia w przypadku elektroenergetycznych sieci przesyłowych - co prowadzi do ograniczenia strat związanych z przesyłem energii elektrycznej na duże odległości.

Izolatory przepustowe są szczególnie narażonymi na uszkodzenia elementami budowy transformatorów. Wynika to ze znacznych napiężeń [15] oraz nierównomiernego rozkładu pola elektrycznego w strukturze wewnętrznej materiału izolacyjnego. Uszkodzenia przepustów transformatorowych wiążą się z poważnymi konsekwencjami, zarówno związanymi z kwestiami bezpieczeństwa, jak i ekonomicznymi - wynikającymi z przerw w dostawie energii elektrycznej do odbiorców.

Systemy służące do monitorowania stanu przepustów transformatorowych stanowią ważny element towarzyszący transformatorom najwyższych napięć. Wśród nich wyróżniamy rozwiązania starsze, wykorzystujące sygnały prądowe pochodzące z gniazda pomiarowego badanego przepustu w celu określenia współczynnika stratności dielektrycznej. Pomiar stratności dielektrycznej jest standardową metodą diagnostyczną, jednak w praktyce, w wielu przypadkach, okazuje się ona niewystarczająca - ze względu na to, iż pomiar wykonywany jest w warunkach różniących się od rzeczywistych warunków pracy (przy znacznie niższym napięciu i temperaturze), wskutek czego czułość pomiaru nie jest wystarczająca i nie pozwala na zidentyfikowanie początkowego etapu degradacji izolatora przepustowego. Do nowszych rozwiązań zaliczamy natomiast metody akustyczne, których zasada działania polega na pomiarze akustycznych fal sprężystych, towarzyszących występowaniu wyładowań niezupełnych w izolacji przepustu. Metoda emisji akustycznej jest obecnie najchętniej stosowaną metodą diagnostyczną, ponieważ umożliwia precyzyjną lokalizację miejsca uszkodzenia podczas normalnej pracy badanego izolatora przepustowego.

Zastosowanie systemów monitorowania ma na celu jak najdłuższe utrzymanie sprawności transformatorów. Pozwala na wykrywanie uszkodzeń izolacji już we

wczesnym ich stadium oraz zastosowanie odpowiednich czynności korygujących - co umożliwi uniknięcie kosztownych skutków awarii transformatorów sieciowych. Wydaje się zatem, że instalowanie systemów monitorowania stanu izolatorów przepustowych, w celu skutecznej diagnostyki zachodzących w izolacji zmian, jest uzasadnione.

Autorzy: inż. Marcin Kieliszek, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, e-mail: kielisz@ee.pw.edu.pl;

dr inż. Ryszard Kowalik, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, Gmach Mechaniki, 00-662 Warszawa, e-mail: Ryszard.Kowalik@ien.pw.edu.pl;

dr inż. Marcin Januszewski, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, Gmach Mechaniki, 00-662 Warszawa, e-mail: Marcin.Januszewski@ien.pw.edu.pl;

mgr inż. Emil Bartosiewicz, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, Gmach Mechaniki, 00-662 Warszawa, E-mail: Emil.Bartosiewicz@ien.pw.edu.pl.

LITERATURA

- [1] ABB, *Izolatory przepustowe i złącza konektorowe*, 2010
- [2] Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Laboratorium Badań Stosowanych, *Metoda AE*, <http://www.arlab.com.pl/index.php?podstrona=metoda&lang=pl&naglowek=metoda>
- [3] Doble Engineering Company, *IDD Instalation*, <http://www.doble.com>
- [4] Koczorowicz T., *Pomiary współczynnika strat dielektrycznych tgδ*, http://www.tomtronix.pl/prasa/ElektroInstalator/2007_09%20Pomiary%20wsp%C3%B3%B3%C5%82czynnik%C5%82strat%20dielektrycznych%20tangens%20delta.pdf
- [5] Mobilne Laboratorium Diagnostyki Transformatorów, *Wysokonapięciowa spektroskopia dielektryczna*, <http://mldt.pl/spektroskopia.html>
- [6] Mobilne Laboratorium Diagnostyki Transformatorów, *Pomiar wyładowań niezupełnych metodą emisji akustycznej*, http://mldt.pl/emisja_akustyczna.html
- [7] Dąbrowski A., *Analiza zakłóceń występujących podczas pomiarów wyładowań niezupełnych metodą emisji akustycznej*, http://www.we.po.opole.pl/dmdocuments/autoreferat_dabrowski.pdf
- [8] MIKRONIKA, *SMT-101 - rejestrator do identyfikacji przebiegów na przepustach transformatora*, <http://www.mikronika.pl/pl/prod/ukty/urzadzenia/rejestratory-zaklocen/smt-101/>
- [9] Hoek S. M., Kraetge A., Hummel R., Kessler O., Winter P., Broniecki U., Kästner B., *Localizing partial discharge in power transformers by combining acoustic and different electrical methods*, *Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI)*, San Juan, Puerto Rico, 10-13 June 2012, 237-241
- [10] OMICRON electronics GmbH, *PDL 650 Brochure*, <https://www.omicronenergy.com/en/products/power-transformer/diagnosis/partial-discharge-analysis/pdl-650/>
- [11] Rethmeier K., *Partial Discharge Measurements on Power Transformers: Case studies*, *Diagnostic Measurements on Power Transformers*, OMICRON electronics GmbH, Austria 2007
- [12] Doble Engineering Company, *IDD Bushing User's Guide*, <http://www.doble.com/>
- [13] Doble Engineering Company, *IDD Intelligent Diagnostic Devices*, <http://www.doble.com>
- [14] Qualitrol, *Qualitrol 609 PDM Transformer partial discharge monitor*, http://www.qualitrolcorp.com/Products/QUALITROL_609_PDM_Transformer_partial_discharge_monitor/
- [15] Kolimas Ł., Kulas S., Piskała M.: *Electromagnetic Forces on Contacts*, *Proceedings of the 43rd International Universities Power Engineering Conference*, University of Padova, Italy, UPEC2008, Conference Proceedings – CD,