

Józef Szuta

AKUSTYCZNA METODA DETEKCCJI I POMIARU WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH  
JAKO NOWE NARZĘDZIE DIAGNOSTYKI TRANSFORMATORÓW I URZĄDZEŃ  
ELEKTRYCZNYCH

Najskuteczniejszym narzędziem diagnostyki technicznej transformatorów i innych urządzeń o izolacji papierowo-olejowej jest w chwili obecnej analiza chromatograficzna gazów rozpuszczonych w oleju [1]. Problem jednoznacznej detekcji wyładowań niezupełnych staje się specjalnie ważny od czasu wprowadzenia do eksploatacji dużych transformatorów na napięcie 400 kV.

W praktycznych przypadkach wyładowania niezupełne w transformatorach najczęściej występują:

- w uszkodzonych mechanicznie lub silnie zanieczyszczonych materiałach dielektrycznych znajdujących się w silnym i niejednostajnym polu elektrycznym,
- na źle dopasowanych powierzchniach kontaktów /iskżenia/,
- między nieuziemionym elementem metalowym, ładowanym przez sprzężenie pojemnościowe a elementami uzziemionymi,
- między nieuziemionymi elementami metalowymi, w których indukuje się sem od strumienia rozproszenia [2].

Wyładowaniom towarzyszą efekty chemiczne, elektryczne, akustyczne i fotooptyczne. Każde z tych zjawisk może być wykorzystane do detekcji wyładowań.

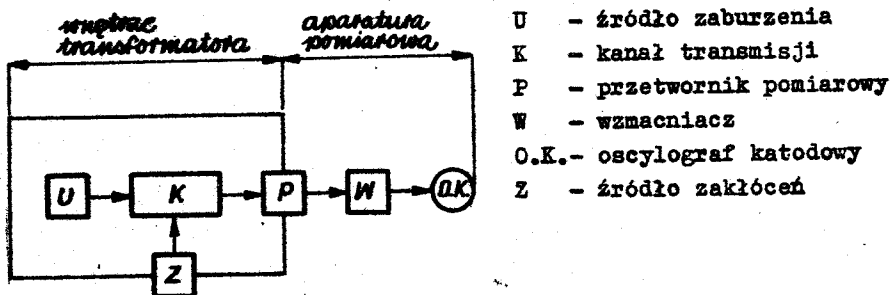
Zaburzenia w postaci drgań sprężystych ośrodka, przenoszące się w

postaci fal akustycznych, są wykorzystywane w metodach emisji akustycznej.

### Metody pomiaru wyładowań niezupełnych

Technikę wykrywania i pomiaru intensywności wyładowań niezupełnych zarówno metodą elektryczną, jak i akustyczną, można zilustrować schematem podanym na rysunku 1. Obie metody mają wiele wspólnych cech metrologicznych, a różnią się tylko rodzajem mierzonej wielkości fizycznej - mierzonego sygnału diagnostycznego.

Sygnałem diagnostycznym w metodzie elektrycznej są impulsy napięcia wysokiej częstotliwości na impedancji pomiarowej RLC. Sygnałem diagnostycznym w metodzie akustycznej są impulsy ciśnienia w oleju/albo drgania kadzi/, wywołane mikroeksplozjami gazów przy wyładowaniach niezupełnych.



Rys.1. Uproszczony schemat układu pomiarowego wyładowań.

W podanym na rysunku 1 układzie źródłem informacji są impulsy wyładowań, wywołujące zaburzenia zarówno akustyczne, jak i elektromagnetyczne. Różne są natomiast źródła szumów: w metodzie akustycznej szumem są drgania magnetostrykcyjne rdzenia i elektrodynamiczne uzwojeń oraz mechaniczne pomp i wentylatorów; w metodzie elektrycznej - wyładowania zewnętrzne na zaciaskach transformatora oraz w innych obiektach. Odpowiednio różne są też mechanizmy propagacji fal zaburzeń akustycznych i elektrycznych.

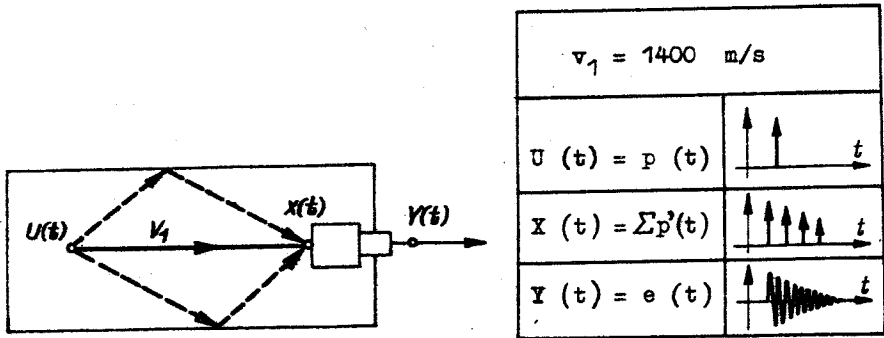
Miejsce odbioru sygnałów elektromagnetycznych są zaciski transfor-

matora, a odbiornikiem - opornik lub impedancja RLC, z której zbiera się i przetwarza napięcie wysokiej częstotliwości. Odbiornikiem sygnałów akustycznych jest przetwornik piezoelektryczny, umieszczony wewnątrz transformatora lub umocowany na kadzi transformatora, skąd odbiera sygnały poprzez stalową ściankę kadzi.

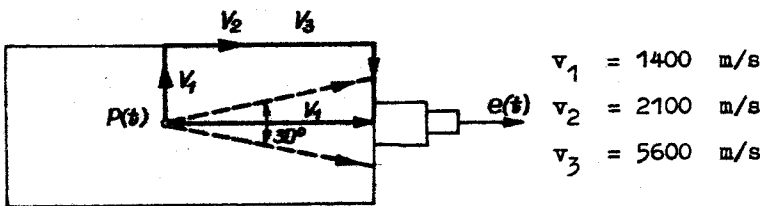
Wyładowania są źródłem emisji akustycznej. Analizę emitowanych sygnałów akustycznych można przeprowadzić śledząc łańcuch zjawisk fizycznych w torze pomiarowym /rys.1/. Przy rozpatrywaniu procesu tworzenia się obrazu akustycznego wyładowania, należy wyróżnić: źródło zaburzeń, kanał akustyczny i przetwornik z aparaturą pomiarową.

Odkształcenia sprężyste wywołane wyładowaniami powodują falę ciśnienia, rozprzestrzeniającą się w oleju i w materiałach stałych z określonymi prędkościami. Przestrzeń, w której jest przenoszony sygnał akustyczny od źródła do przetwornika, stanowi kanał akustyczny.

Wytworzone na wejściu zaburzenie  $p(t)$  jest przenoszone w oleju z prędkością 1400 m/s /rys.2/. W czasie propagacji fali ciśnienia następuje deformacja impulsu pierwotnego oraz odbicie fali od ścian elementów konstrukcyjnych i kadzi. W wyniku tego do przetwornika zanurzeniowego /hydrofonu/ dobiega nie pojedynczy impuls, a cały ciąg fal /zjawisko rewerberacji/. W ten sposób pierwotny sygnał na wejściu kanału zostaje przetworzony w ciąg impulsów, które są odbierane przez przetwornik. Zależność między sygnałem wejściowym  $p(t)$  a uzyskanym obrazem akustycznym  $e(t)$ , rejestrowanym na oscyloskopie, jest uwarunkowana własnościami przetwornika, a przede wszystkim własnościami kanału akustycznego, które posiadają charakter stochastyczny. Niezdeteminowane własności kanału akustycznego są przyczyną, że wartość zaburzenia w źródle nie może być mierzona dokładnie, a tylko w sposób szacunkowy. W przypadku stosowania przetworników stykowych, mocowanych na kadzi, przy analizie odbieranych sygnałów należy uwzględnić dodatkowe procesy /rys.3/:



Rys.2. Przebieg sygnału odbieranego za pomocą hydrofonu



Rys.3. Przebieg sygnałów odbieranych za pomocą przetwornika stykowego

- sygnał dobiegający bezpośrednio przez olej z  $v_1 = 1400$  m/s do kadzi ulega odbiciu i tylko część energii akustycznej przedostaje się do przetwornika,

- do przetwornika mogą dobiegać sygnały drogą pośrednią częściowo przez olej, a następnie wzdłuż ścianki kadzi w postaci fali poprzecznej w żelazie z  $v_2 = 2100$  m/s, a również w postaci fali podłużnej z prędkością  $v_3 = 5600$  m/s.

Należy znaleźć takie usytuowanie przetwornika, aby przyjmował on tylko sygnały bezpośrednie biegnące w oleju. Można założyć, że przetwornik umieszczony na podstawie stożka o kącie rozwarcia  $30^\circ$ , którego wierzchołek znajduje się w miejscu wyładowań, przyjmuje tylko fale bezpośrednią /rys.3/.

Porównując obie metody pomiarowe, a więc elektryczną i akustyczną, należy podkreślić następujące zalety tej ostatniej:

1. Badania można prowadzić bez wyłączania transformatora z ruchu, ponieważ sygnały akustyczne mogą być odbierane przez przetwornik lub kilka przetworników umocowanych na zewnątrz kadzi transformatora. Przetworniki można umieścić w miejscu, w którym wyładowania "słychać" najlepiej.

2. Odbiornik odbiera w zasadzie tylko wyładowania wewnętrzne /plus szum/, ponieważ sygnały akustyczne od wyładowań w powietrzu i hałas z otoczenia są odbijane przez metalową kadź transformatora.

3. Istnieje prosty sposób lokalizacji miejsca wyładowań niezapełnionych przez triangulację źródła emisji akustycznej za pomocą 3 przetworników lub przez pomiar opóźnienia czasowego między pojawieniem się sygnału elektrycznego i akustycznego w miejscu przytwierdzenia przetwornika.

Do wad metody akustycznej należy zaliczyć małą czułość przy wyładowaniach wewnątrz izolacji papierowej.

Reasumując należy stwierdzić, że metoda elektryczna lepiej nadaje się do pomiaru intensywności wyładowań, a specjalnie w warunkach labo-

ratoryjnych w czasie prób fabrycznych. Natomiast do detekcji i lokalizacji wylądowań zarówno w warunkach fabrycznych, jak i eksploatacyjnych, lepiej nadaje się metoda emisji akustycznej.

W celu poprawnej lokalizacji źródła wylądowań w warunkach silnych zakłóceń idealnym rozwiązaniem jest pomiar czasu przejścia sygnału akustycznego w transformatorze przy zastosowaniu obu metod. Sygnał elektryczny o odpowiedniej amplitudzie wyzwała podstawę czasu oscyloskopu z pamięcią, który rejestruje czas do pojawienia się sygnału akustycznego i przebieg tego sygnału [3].

Jeszcze lepszym rozwiązaniem byłoby zastosowanie wielokanałowego magnetofonu pomiarowego o dużej dynamice i górnej częstotliwości granicznej powyżej 100 kHz. Zarejestrowane sygnały można wtedy dowolnie przetwarzać i w zależności od potrzeb stosować najwłaściwszą metodę obróbki.

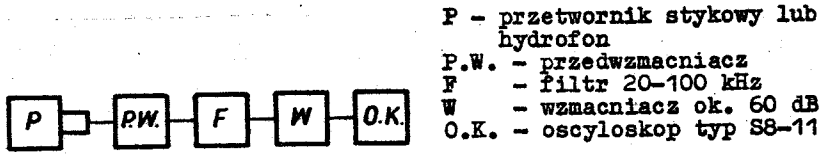
Lokalizacja miejsca uszkodzenia i ocena szkodliwości wylądowań nie jest zadaniem łatwym. Praktycznie każdy przypadek wylądowań w transformatorze musi być rozpatrywany indywidualnie, bo mimo dużego rozwoju techniki pomiarowej nie ma i nie będzie prostych metod i przyrządów, które to zagadnienie rozwiązywały by w sposób jednoznaczny.

#### Wyniki praktycznych zastosowań metody akustycznej

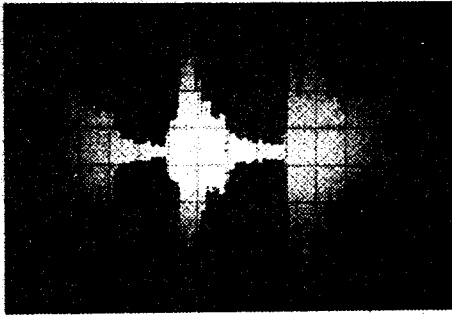
Badania wylądowań niezupełnych przeprowadzono w bazie remontowej na transformatorach po remoncie oraz w Zakładach "Erg" na przepustach transformatorowych. Detekcję i pomiar intensywności wykonano zestawem aparatury /rys.4/.

Pomiary wylądowań wykonano na wyremontowanych transformatorach w trakcie prób napięciowych [4]. Ze względu na duże trudności instalowania hydrofonu w kadzi transformatora i grożące niebezpieczeństwo zniszczenia aparatury, pomiary wykonywano za pomocą przetwornika stykowego /akcelerometru/, mocowanego na ściance kadzi. Z punktu widzenia metrologii nie jest to rozwiązanie optymalne, gdyż przetwornik pracuje

w warunkach rezonansu i praktycznie jego czułość nie jest określona. Układ taki jest jednak bardzo czuły i doskonale nadaje się do detekcji wyładowań.



Rys.4. Tor pomiarowy do pomiaru emisji akustycznej.



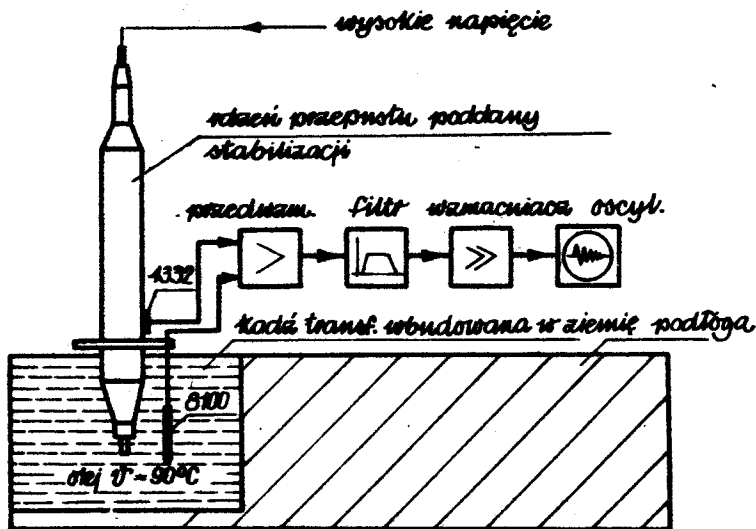
Rys.5. Obraz akustyczny wyładowań niezupełnych w izolatorze przepustowym przy  $U = 140$  kV - przetwornik stykowy. Skala napięć  $Y = 0,2$  V/dz., skala czasów  $X = 2,5$  ms/dz.

Typowy oscylogram wyładowań pokazano na rysunku 5. W wyniku podjętych prób lokalizacji obszaru wyładowań metodą największej "głośności" stwierdzono, że w transformatorach najczęściej występują wyładowania na przepustach. Za pomocą metody akustycznej udało się również wykryć i zlokalizować wyładowania w transformatorze, który przeszedł wszystkie próby napięciowe z wynikiem pozytywnym. Po zdemontowaniu tego transformatora odnaleziono miejsce wyładowań na śrubach ściągających belki jarzmowe. Po wzmocnieniu izolacji, usunięto szkodliwe wyładowania. Transformator został zainstalowany i pracuje.

Stosując metodę akustyczną bardzo łatwo rozróżnić wyładowania

w oleju wewnątrz transformatora od wyładowań w powietrzu. Wyładowania w oleju dają na oscyloskopie przebieg o kształcie zanikającej sinusoidy, natomiast wyładowania w powietrzu - ostre piki.

Z uwagi na największą podatność izolatorów przepustowych na wyładowania, przeprowadzono szereg badań na izolatorach przepustowych na stacji prób w zakładach wytwórczych w czasie prób napięciowych napięciem przyłożonym 50 Hz i napięciem udarowym 1,2/50  $\mu$ s. Przeprowadzono również badania na samych rdzeniach przepustów w czasie ich stabilizacji, jako ewentualną kontrolę międzyoperacyjną w procesie produkcyjnym. Uformowane rdzenie przepustów przed zamontowaniem w izolatorze porcelanowym poddaje się stabilizacji polegającej na zanurzeniu części olejowej rdzenia w kąpieli olejowej o temperaturze 90°C przy pełnym napięciu roboczym w ciągu 5 godzin, aż do ustalenia się tg $\delta$  izolacji. Schemat stanowiska pomiarowego podaje rysunek 6.



Rys.6. Schemat układu do badań rdzeni przepustów w czasie ich stabilizacji



Przeprowadzone badanie wykazało, że pomiar wyładowań niezupełnych w rdzeniu w trakcie próby stabilizacji jest możliwy za pomocą metody akustycznej. Wyładowania niezupełne w papierze bakelizowanym są mierzone przetwornikiem stykowym. Wyładowania w dolnej części przepustu mogą być wykrywane za pomocą hydrofonu zanurzonego w kąpielii olejowej. Na gotowych przepustach przeprowadzono również detekcję wyładowań podczas prób napięciem udarowym  $1,2/50 \mu\text{s}$ . Pomiar poziomu wyładowań niezupełnych metodą elektryczną nie jest możliwy przy tego rodzaju próbie. Jest natomiast możliwy za pomocą metody akustycznej, ponieważ istnieje różnica czasu rzędu milisekund między chwilą przyłożenia udaru napięciowego a chwilą dojścia fali akustycznej od wyładowania wewnętrznego do przetwornika pomiarowego. Przeprowadzone badanie przepustu 110 kV falą udarową 420 kV o kształcie  $1,2/50 \mu\text{s}$  wykazało, że metoda nadaje się do wykrywania wyładowań niezupełnych w czasie prób udarowych. Należy jednak liczyć się z koniecznością ekranowania toru pomiarowego od zaburzeń elektromagnetycznych oraz zaburzeń akustycznych powstałych przy zapalaniu się iskierników w generatorze udarowym.

#### Problem oceny szkodliwości wyładowań niezupełnych

Wiadomo z literatury, że wyładowanie o małej intensywności nie wywołuje destrukcji izolacji olejowo-papierowej. Autorzy publikacji [5] rozróżniają pierwszy stopień wyładowań /first corona/ do 750 pC i drugi stopień wyładowań /second corona/ powyżej 2500 pC. Na podstawie własnych obserwacji mógł autor zauważyć, że wyładowania rzędu do 300 pC w oleju nie wywołują efektów obserwowalnych wzrokiem, ani rozkładu oleju, stwierdzalnego analizą chromatograficzną.

Przeprowadzone pomiary intensywności wyładowań niezupełnych przekładników napięciowych 110 kV typu U-110a wykazały, że przy napięciu znamionowym poziom wyładowań waha się w przedziale 200-300 pC. W celu stwierdzenia skutków takich wyładowań na izolację papierowo-olejową, wykonano analizy chromatograficzne gazów rozpuszczonych w oleju tych przekładników. Z sześciu przekładników, pracujących w sieci ponad 10

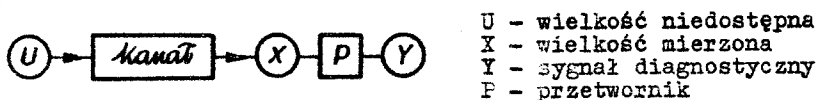
lat, pobrano próbki oleju i wykonano analizy chromatograficzne. Należało się spodziewać, że analiza wykaże obecność wodoru i metanu w oleju. Wyniki zestawiono w tabeli 1.

Jak widać z zestawienia, próbki oleju nie zawierają ani wodoru, ani metanu. Wyładowania rzędu 200 - 300 pC nie powodują rozkładu izolacji, nie stanowią więc zagrożenia.

#### Wnioski ogólne dotyczące diagnostyki uszkodzeń

Problem diagnostyki rozwijających się uszkodzeń w pracujących urządzeniach jest bardzo złożony. Procedurę diagnostyki uszkodzeń przedstawiono na rysunku 7.

a/ tor pomiaru sygnałów diagnostycznych



b/ procedura identyfikacji uszkodzenia i optymalnej decyzji



Y - wynik przetworzenia  
sygnałów

+ wyłączyć - niebezpieczeństwo  
uszkodzenia  
o przygotowanie do wyłączenia  
- nie wyłączać - stan normalny

Rys.7. Schemat problemu diagnostyki uszkodzeń.



Podstawą diagnostyki jest pomiar dostępnej dla pomiaru wielkości fizycznej /np. intensywności wyładowań w miejscu zabudowania przetwornika/. Na podstawie dłuższej obserwacji i pomiarów można estymować wielkość niedostępną do bezpośredniego pomiaru /a więc wartość wyładowań w miejscu uszkodzenia, lokalizację źródła wyładowań/, a na tej podstawie szacować rozmiar uszkodzenia.

Ostateczny wynik pomiaru powinien prowadzić do identyfikacji uszkodzenia zupełnego. W praktyce użytkownik urządzeń elektrycznych jest mało zainteresowany technologią pomiaru, a interesuje go wynik ostateczny w postaci decyzji o konieczności wyłączenia urządzenia z ruchu. Tak więc ostatnim etapem problemu diagnostyki jest problem decyzji o przekazaniu transformatora do przeglądu i naprawy. Każda decyzja, zarówno o wyłączeniu z ruchu, jak i nie wyłączeniu, jest związana z ryzykiem. Dlatego też w celu zmniejszenia ryzyka decyzje muszą opierać się nie tylko na wynikach pomiaru, ale również na informacjach apriorycznych. Problemy związane z poprawą identyfikacji uszkodzeń od wyładowań niezupełnych oraz optymalną decyzją są przedmiotem dalszych badań.

#### LITERATURA

1. Szuta J.: Diagnostyka techniczna transformatorów na podstawie analizy chromatograficznej gazów wydzielonych zoleju. Energetyka nr. 7/8, 1976.
2. Szuta J.: Detekcja i lokalizacja rozwijających się uszkodzeń elektrycznych w transformatorach metodą badań emisji akustycznej wyładowań niezupełnych. Energetyka nr.8, 1978.
3. Harrold R.T.: The Relationship Between Ultrasonic and Electrical Measurements of Under-Oil Corona Sources. IEEE - electr.insulation, no.1, march 1976.
4. Szuta J., Skubis J.: Detekcja i lokalizacja wyładowań niezupełnych

w izolacji transformatorów, kabli i przekładników. Praca Z.P.B.E.  
Energopomiar, etap III, 1978.

5. Yakov, Honey, Madin, Keil: Corona in Power Transformers. CIGRE  
1968, ref. 12-06.

#### Summary

#### ACOUSTIC METHOD OF PARTIAL DISCHARGES DETECTION AND MEASUREMENT AS A NEW MEANS FOR POWER TRANSFORMER AND ELECTRICAL EQUIPMENT DIAGNOSTICS

Presented is a comparison of the electrical and acoustic method of partial discharges measurement and how the acoustic method is used for transformer and bushing inspection. Presented is also a general outline of the incipient electrical defects diagnostics of transformers in operation.