

Dominik DUDA, Zbigniew GACEK, Krzysztof MAŻNIEWSKI, Marek SZADKOWSKI,  
Rafał SOSIŃSKI

Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, Politechnika Śląska w Gliwicach

## POMIARY WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W DIAGNOSTYCE UKŁADÓW IZOLACYJNYCH URZĄDZEŃ ELEKTROENERGETYCZNYCH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodykę pomiarów wyładowań niezupełnych oraz ich znaczenie w diagnostyce technicznej układów izolacyjnych. W szczególności opisano metodę elektryczną pomiaru wyładowań niezupełnych – jako metodę autonomiczną oraz jako część, opracowanej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej, zespolonej metody oceny wyładowań niezupełnych. Przedstawione zostały również wyniki pomiarów wyładowań niezupełnych w wybranych układach izolacyjnych oraz innowacyjna (opracowana w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów) metoda interpretacji uzyskiwanych wyników.

**Słowa kluczowe:** wyładowania niezupełne, metoda elektryczna, emisja akustyczna, diagnostyka

## MEASUREMENTS OF PARTIAL DISCHARGE IN THE DIAGNOSIS OF INSULATION SYSTEMS OF ELECTRICAL EQUIPMENT

**Summary.** The article presents the methods of partial discharge measurements and their importance in the diagnosis of technical insulation systems. In particular, the electrical method of the partial discharge measurement has been described. This is an autonomous method of measurement, but it also constitutes a part of the complex method of the partial discharge assessment, developed in Electrical Faculty of Silesian University of Technology. Results of partial discharge measurements in selected insulation systems are also presented as well as innovative method of result interpretation, which has been developed in the Institute of Power Systems and Control.

**Keywords:** partial discharge, electrical method, acoustic emission

### 1. WPROWADZENIE

W układach izolacyjnych wysokiego napięcia, w których występują oddziaływania silnego pola elektrycznego, może występować zespół zjawisk fizycznych o charakterze

nieciągłym (przerywanym), nazywanych wyładowaniami niezupełnymi. Wyładowania takie powodują określone skutki fizykochemiczne w materiałach izolacyjnych. W strukturze materiału izolacyjnego powstają procesy jonizacyjne, inicjujące lokalne przemiany w materiale – stanowiące zalążki degradacji chemicznej i fizycznej. Efektem końcowym tych przemian jest zwykle przebicie elektryczne (wyładowanie zupełne), wymagające jednak określonego czasu dla swojego rozwoju [1].

Według normy [13] wyładowanie niepełne definiowane jest jako lokalne wyładowanie elektryczne, które tylko częściowo zwiera izolację między elementami przewodnikami i które może być przyległe lub nie do przewodnika. Bardziej precyzyjną definicję podano w monografii [1], według której wyładowanie niepełne jest to lokalne wyładowanie elektryczne, które odbywa się tylko w części układu elektroizolacyjnego i nie powoduje bezpośrednio utraty przez ten układ własności izolacyjnych. Natomiast długotrwałe działanie wyładowań niepełnych prowadzi przez mikro- i makroskopowe zmiany w strukturze układów do wyładowania zupełnego.

Występowanie wyładowań niepełnych oraz związane w wyładowaniach parametry sprawdzane są dla bardzo wielu układów izolacyjnych na etapie produkcji, oddawania do eksploatacji oraz podczas samej eksploatacji. Badanie wyładowań niepełnych na etapie produkcji podyktowane jest najczęściej wymogami właściwych dla danego układu izolacyjnego norm. Badania eksploatacyjne nie mają tak ściśle określonych uregulowań normatywnych, a wynikają najczęściej z chęci poznania aktualnego stanu technicznego układu izolacyjnego i oceny jego przydatności do dalszej eksploatacji. Wyniki pomiarów eksploatacyjnych powinny możliwie szeroko opisywać intensywność i charakter wyładowań niepełnych oraz pozwolić na lokalizację źródeł wyładowań. Oznacza to, że opis wielkości związanych z wyładowaniami niezupełnymi powinien być możliwie wszechstronny, a ich identyfikacja i lokalizacja powinna pozwalać na określenie związanych z nimi defektów [4].

Przy ocenie wyładowań niepełnych, obejmującej detekcję, pomiar i lokalizację źródeł, można wykorzystywać różne metody, wynikające z rozmaitych efektów i zjawisk fizycznych, towarzyszących wyładowaniom. Efektami i zjawiskami tymi są:

- występowanie impulsów prądowych i związanej z nimi emisji fal elektromagnetycznych (elektryczna metoda pomiaru),
- chemiczne przemiany materiałów izolacyjnych (metoda chromatografii gazowej),
- udarowe odkształcenia sprężyste i towarzysząca im emisja fal akustycznych (metoda emisji akustycznej),
- emisja promieniowania świetlnego (metoda spektrofotometrii optycznej),
- lokalny wzrost temperatury w kanale wyładowania (metoda termowizyjna),
- zmiany ciśnienia gazu w kanale wyładowania (pomiar zmian ciśnienia) [3].

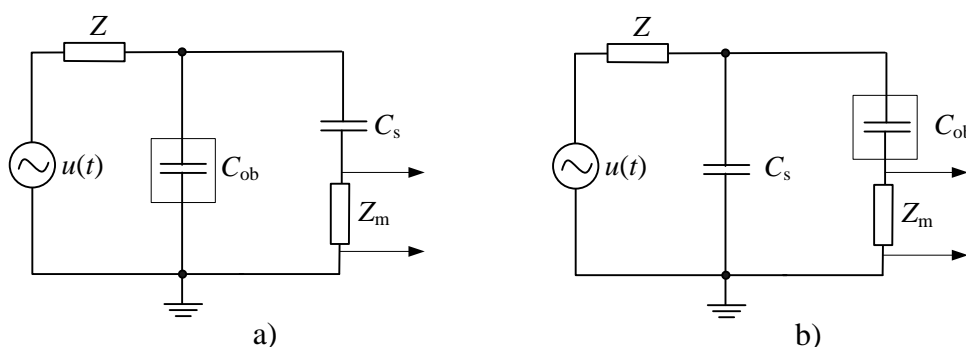
Praktyczne znaczenie mają obecnie cztery pierwsze metody oceny wyładowań niepełnych. Trzy pierwsze są metodami wykorzystywanymi standardowo, natomiast

metoda pomiaru światła emitowanego przez wyładowania niezupełne znalazła zastosowanie w monitoringu wyładowań niezupełnych w rozdzielnicach i przewodach szynowych izolowanych SF<sub>6</sub> [8]. Ze względu na fakt, że przedmiotowe normy najczęściej formułują wymagania odnośnie do dopuszczalnych wartości ładunku pozornego, pierwszoplanową metodą diagnostyczną jest obecnie metoda elektryczna.

## 2. METODA ELEKTRYCZNA

Metoda elektryczna jest metodą bardzo uniwersalną, którą można stosować do pomiarów wszystkich rodzajów wyładowań, zarówno w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych (terenowych). Metoda ta może służyć do identyfikacji form wyładowań, a w przypadku kiedy jeden z wymiarów geometrycznych układu izolacyjnego jest zdecydowanie dominujący, może również służyć do lokalizacji źródeł wyładowań (izolacja kabli). Niestety, metoda ta jest wrażliwa na zakłócenia zewnętrzne (występujące poza układem pomiarowym), jak i zakłócenia wewnętrzne, których źródłem może być niewłaściwie zbudowany układ pomiarowy. Wada ta stanowi pewne ograniczenie metody elektrycznej do wykonywania pomiarów w warunkach przemysłowych, gdzie eliminacja zakłóceń zewnętrznych jest bardzo trudna.

Podstawowe układy pomiarowe wykorzystywane przy stosowaniu metody elektrycznej przedstawiono na rys. 1. Układy te niezależnie od konfiguracji zawierają obiekt badany o pojemności  $C_{ob}$ , kondensator sprzęgający  $C_s$ , impedancję pomiarową  $Z_m$  oraz źródło przemiennego napięcia probierczego z impedancją wewnętrzną  $Z$ .



Rys. 1. Schematy zastępcze podstawowych układów pomiarowych metody elektrycznej: a) schemat z detekcją równoległą, b) schemat z detekcją szeregową wg [1]

Fig. 1. Basic measurement circuits in electrical method: a) parallel detection, b) serial detection, acc. [1]

Na rys. 1 przedstawiono schematy zastępcze układów pomiarowych służących do detekcji i pomiarów ładunku pozornego. W układach tych kondensator sprzęgający kompensuje zmiany ładunku w czasie trwania krótkiego wyładowania w obiekcie

o pojemności  $C_{ob}$ . Czas trwania takiego wyładowania wynosi ( $10^{-9}$ ÷ $10^{-6}$ ) s [1]. Można zatem stwierdzić, że ma ono charakter impulsowy. W obwodach o charakterze indukcyjnym (a taki charakter mają zwykle wysokonapięciowe źródła zasilania) ładunek nie może zmienić się w sposób skokowy, zatem ładunek kompensujący dopływa z kondensatora sprzęgającego.

Różnica w układach pomiarowych polega na lokalizacji impedancji pomiarowej  $Z_m$ . Impedancja ta może być włączona szeregowo w gałęzi zawierającej obiekt badany  $C_{ob}$  (rys. 1b) lub w gałęzi zawierającej kondensator sprzęgający  $C_s$  (rys. 1a). Jeżeli w układzie nie występują pojemności pasożytnicze – równoległe do pojemności  $C_{ob}$  i  $C_s$ , a prąd wyładowania nie zamyka się przez źródło zasilania, wówczas układy te są równoważne. W rzeczywistości układ z rys. 1b charakteryzuje się większą czułością, gdyż w tym przypadku cały prąd wywołany przez wyładowanie przepływa przez impedancję  $Z_m$ . Jednak ze względów praktycznych (np. uziemienie jednej z elektrod badanego obiektu) układ ten nie zawsze może być stosowany, ustępując w większości przypadków układowi z rys. 1a [1].

Mierniki wyładowań niezupełnych nie są skalowane w wartościach bezwzględnych ładunku, a każdy pomiar jest pomiarem porównawczym. Operacją, która umożliwia odniesienie wskazań miernika wyładowań do znanych wartości ładunków odniesienia, jest kalibracja. Polega ona na podaniu ładunków o znanej wartości, w postaci impulsów prądowych o odpowiednio krótkim czasie, z kalibratora dołączanego równoległe do badanego obiektu. Szczegóły procedury kalibracji oraz wymagania stawiane kalibratorom podaje norma [13]. Wykorzystując standardowe (niskonapięciowe) kalibratory, procedurę kalibracji wykonuje się w stanie beznapięciowym.

Oprócz ładunku pozornego, jako podstawowego parametru wyładowań niezupełnych, odpowiednie mierniki oferują zwykle dodatkowo pomiar napięcia zapłonu i gaśnięcia wyładowań, ilości wyładowań w jednostce czasu, a także wielkości pochodnych, takich jak prąd wyładowań, wskaźnik D (kwadrat zmierzonych ładunków w jednostce czasu) oraz moc wyładowań. Zaawansowane mierniki wyładowań niezupełnych umożliwiają rejestrowanie zarówno amplitud następujących po sobie impulsów wyładowań niezupełnych, jak również momentów ich wystąpienia w kolejnych okresach napięcia probierczego. Taki rodzaj rejestracji wyładowań niezupełnych umożliwia jednoczesną analizę amplitudową i czasową, co pozwala na tworzenie skumulowanych rozkładów amplitudowych i fazowych.

### 3. POMIARY WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W KABLACH

Kable elektroenergetyczne są obiektami, w przypadku których możliwe jest lokalizowanie źródeł wyładowań niezupełnych przy wykorzystaniu metod elektrycznych. Jest to możliwe dzięki dominacji jednego z wymiarów gabarytowych (długości) nad pozostałymi wymiarami tych obiektów. Każde wyładowanie niezupełne jest źródłem fali

elektromagnetycznej propagowanej wzdłuż żyły roboczej kabla. Wykorzystując różnice w czasie, po jakim do detektora docierają fale wygenerowane w źródle (fala docierająca bezpośrednio i fala docierająca po odbiciu od drugiego końca kabla) oraz znając czas transmisji tego typu fal w danym kablu, ustalany na etapie kalibracji, można określić położenie źródła wyładowań. Szczegółowy opis lokalizacji źródeł wyładowań w izolacji kabli przedstawiono m.in. w [1].

Taki sposób lokalizacji wykorzystuje system pomiarowy stosowany w jednym z koncernów energetycznych, przy wdrożeniu którego brali udział Pracownicy Instytutu Elektroenergetyki i Sterowania Układów. System ten wykorzystuje napięcie probiercze o częstotliwości 0,1 Hz, co jest związane z możliwością obniżenia mocy znamionowej źródeł napięcia probierczego, a tym samym masy przewoźnej aparatury pomiarowej. W odróżnieniu od innych systemów wykorzystujących zjawiska rezonansowe do wytworzenia napięcia probierczego, gdzie częstotliwość napięcia probierczego jest uzależniona od pojemności badanego kabla, systemy o stałej częstotliwości gwarantują powtarzalność warunków próby, a tym samym ułatwiają interpretację i porównywanie wyników.

Podczas wdrażania diagnostyki wyładowań niezupełnych do strategii eksploatacji linii kablowych SN, z uwagi na liczbę linii kablowych (kilka tysięcy), istotnym problemem było ustalenie kolejności linii kablowych, w jakiej mają zostać poddane badaniom. Kolejność badań poszczególnych linii kablowych powinna być taka, aby jak najszybciej zbadać linie kablowe, które najbardziej pogarszają i będą pogarszać wskaźniki niezawodnościowe całej populacji kabli, a na podstawie wyników tych badań móc podjąć działania naprawcze (wymiana całego kabla, jego części, mufy itp.).

Aby wyznaczyć kolejność badań poszczególnych linii kablowych, zaproponowano wykorzystać matematyczną metodę wielokryterialnej oceny porównawczej, w której kryteriami są parametry (znane przed wykonaniem badań diagnostycznych linii kablowych), pozwalające ocenić zagrożenie tej relacji wskutek potencjalnego uszkodzenia. Szczegółowo procedura wyznaczania kolejności badań poszczególnych linii kablowych została przedstawiona w [1].

Do gromadzenia wyników pomiarów zaproponowano i wdrożono odpowiednią postać bazy danych. Z racji dużej ilości wyników, jakie generuje system pomiarowy, w bazie tej gromadzone są jedynie wyniki uprzednio opracowane (w postaci uporządkowanego wektora [odległość; ładunek] dla poszczególnych napięć pomiarowych i faz) oraz wybrane wskaźniki, będące pochodną surowych wyników pomiarowych. Do gromadzenia w bazie danych (oprócz danych związanych z identyfikacją linii, datą wykonania badania, badaną fazą kabla) jako wskaźniki wybrano następujące parametry:

- napięcie probiercze, przy jakim wykonano pomiar,
- liczba źródeł wyładowań niezupełnych,
- procentowa długość kabla objęta występowaniem wyładowań niezupełnych,

- ładunek maksymalny zarejestrowanych wyładowań,
- ładunek średni zarejestrowanych wyładowań,
- średnia intensywność zarejestrowanych wyładowań,
- liczba skupisk wyładowań niezupełnych,
- długość największego skupiska.

Powiązanie tej bazy z bazami gromadzącymi dane techniczne majątku sieciowego pozwala na powiązanie wyników np. z rodzajem izolacji kabli i wykonywanie oddzielnych analiz dla różnych jej rodzajów. Tak zebrane i przedstawione dane umożliwiają przeglądanie, sortowanie, selekcję i analizę wyników pomiarów wyładowań niezupełnych, a tym samym ułatwiają podejmowanie decyzji o dalszych działaniach eksploatacyjnych dla poszczególnych linii kablowych.

Po przebadaniu licznej grupy linii kablowych wytypowano 511 linii jednorodnych pod względem rodzaju izolacji. Były to linie o izolacji papierowej oraz polietylenowej eksploatowane w różnych przedziałach lat. Szczegółowy podział pod względem rodzaju izolacji i grup wiekowych przedstawia tabela 1.

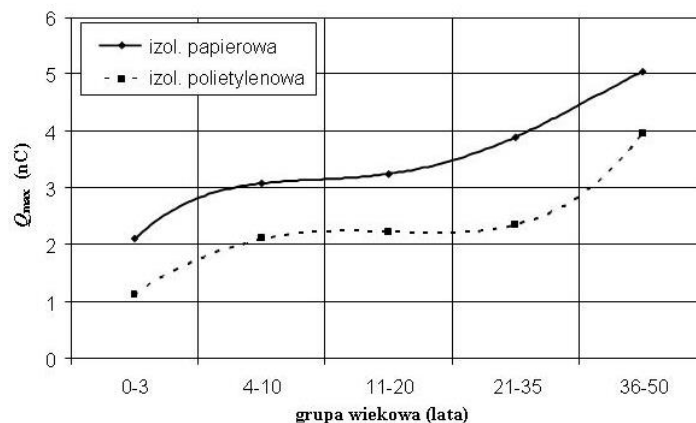
Tabela 1

Zestawienie liczności populacji kabli w poszczególnych grupach wiekowych

<b>Grupa wiekowa</b>	<b>Izolacja papierowa</b>	<b>Izolacja polietylenowa</b>
Łącznie	286	225
0 – 3	45	56
4 – 10	53	52
11 – 20	55	45
21 – 35	60	39
36 – 50	73	33

W wyniku analizy stwierdzono, że dla kabli o izolacji papierowej mierzone parametry – w postaci ładunku średniego, maksymalnego, intensywności wyładowań – są większe w stosunku do kabli o izolacji polietylenowej. Bez względu na rodzaj izolacji, wartości ładunku średniego oraz intensywności wyładowań rosną w przybliżeniu liniowo wraz ze zwiększaniem się okresu ich eksploatacji. Inną zależność zaobserwowano dla ładunku maksymalnego. Zależność ta została przedstawiona na rys. 2. Podobną tendencję można również zauważyć w wynikach pomiarów wykonywanych cyklicznie dla tych samych linii. W związku z zauważoną tendencją zmian wartości maksymalnego ładunku pozornego w czasie, nasuwa się hipoteza o możliwości wyznaczenia krytycznego wieku linii kablowych, po przekroczeniu którego intensywność procesów związanych z wyładowaniami niezupełnymi znacząco narasta, zwiększając ryzyko przebicia izolacji. W dalszych badaniach należałoby zatem skupić się na określeniu przybliżonego krytycznego wieku kabli oraz

wartości ładunku maksymalnego, po przekroczeniu których procesy starzeniowe związane z wyładowaniami niezupełnymi są coraz bardziej intensywne. Do czasu osiągnięcia przez kabel wyznaczonego wieku krytycznego, badania diagnostyczne związane z pomiarem wyładowań niezupełnych można by wykonywać rzadziej, chyba że zmierzony ładunek maksymalny zbliży się lub przekroczy określoną wartość graniczną.



Rys. 2. Średnie wartości ładunku maksymalnego dla kabli w różnych przedziałach lat eksploatacji  
Fig. 2. The average values of maximum charge for cables in various ranges of exploitation years

#### 4. POMIARY WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W TRANSFORMATORACH

W transformatorach energetycznych badanie wyładowań niezupełnych metodą elektryczną wykonuje się najczęściej podczas prób odbiorczych. Pomiary takie przeprowadza się zgodnie z wymaganiami normy [13], podczas próby napięciem indukowanym, którego wartości i czas trwania określa norma [14]. Najczęściej stosuje się zasilanie jednofazowe, w odpowiednio skonfigurowanym układzie połączeń poszczególnych uzwojeń transformatora.

Do badań transformatorów energetycznych w warunkach eksploatacji stosuje się najczęściej metodę emisji akustycznej. Można wówczas stwierdzić występowanie źródeł wyładowań niezupełnych oraz oszacować ich lokalizację. W dalszym ciągu problem stanowi jednak ocena stopnia zagrożenia izolacji ze strony wykrytych źródeł. W tym przypadku bardzo przydatna staje się metoda elektryczna pomiaru wyładowań niezupełnych. Obecnie jednak ze względu na brak uregulowań prawnych i brak opracowanej metodyki stosowania metody elektrycznej w przypadku transformatorów będących w eksploatacji, metoda ta wykorzystywana jest najczęściej w przypadku transformatorów znajdujących się na stacjach prób firm produkujących i remontujących transformatory [7]. Ponadto, w przypadku transformatorów w stacjach elektroenergetycznych wyniki pomiarów wyładowań niezupełnych metodą elektryczną mogą być trudne do zinterpretowania ze względu na sporą ilość zakłóceń wpływających na jakość pomiaru i prawidłową ocenę badanego zjawiska. Jednym ze sposobów oddzielenia zewnętrznych zakłóceń od właściwych sygnałów

diagnostycznych wytwarzanych przez wyładowania niezupełne w izolacji transformatora jest zbadanie stopnia skorelowania sygnałów elektrycznych i sygnałów mierzonych metodą emisji akustycznej. Takie połączenie obu metod – zaproponowane i wdrażane na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej przez pracowników Instytutu Elektroenergetyki i Sterowania Układów oraz Katedry Optoelektroniki – zyskało nazwę *zespólonej metody elektryczno-akustycznej*. W metodzie tej:

- wykonywane są badania wyładowań niezupełnych równoległe – metodą elektryczną oraz metodą emisji akustycznej,
- obliczane są miary wielkości opisujących zjawiska wyładowań niezupełnych w ramach poszczególnych metod,
- uzyskane wyniki są wzajemnie weryfikowane w celu ustalenia opisu końcowego stanu układu izolacyjnego [6].

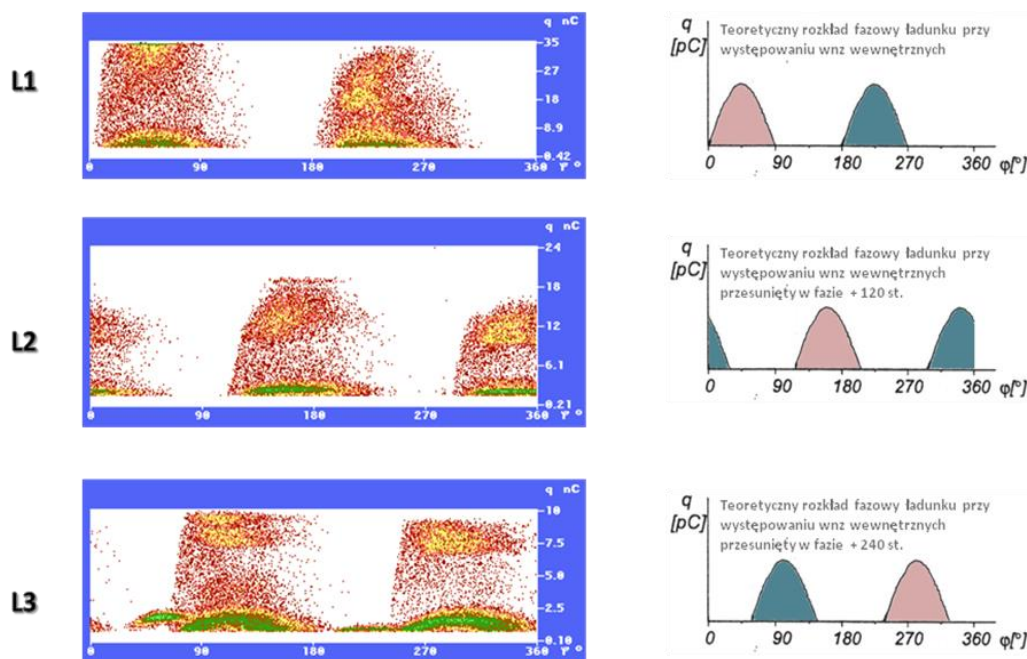
Zespóloną metodę elektryczno-akustyczną wykorzystano m.in. podczas badań transformatora o mocy 16 MVA i przekładni 110/15 kV/kV, zakwalifikowanego do remontu. W trakcie badań tego transformatora wykorzystano (podobnie jak w eksploatacji) zasilanie trójfazowe o częstotliwości sieciowej. Wyładowania niezupełne mierzono oddzielnie na każdej fazie, ale sygnał pomiarowy zawierał również sygnały z pozostałych faz. Poziom napięcia podczas prób był regulowany, nie przekraczał jednak napięcia znamionowego badanego transformatora. Do pomiarów metodą elektryczną wykorzystywano szerokopasmowy system pomiarowy TE-571 firmy Haefely-Trench, natomiast do pomiarów metodą emisji akustycznej – autorski układ pomiarowy opracowany w Katedrze Optoelektroniki EA DEMA-COMP, opisany w [5].

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że w badanym transformatorze występuje bardzo intensywne źródło wewnętrznych wyładowań niezupełnych (o poziomie ładunku pozornego ok. 35 nC) związane z fazą L3. Otrzymane dla tej fazy rozkłady amplitudowo-fazowe wykazują znaczące podobieństwo do teoretycznych rozkładów fazowych ładunku pozornego przy występowaniu wyładowań wewnętrznych [1].

Analiza analogicznych rozkładów otrzymanych w fazie L2 wykazała, że są one kształtem zbliżone do rozkładów w fazie L3, jednak ich zakresy fazowe są względem siebie przesunięte o 120°. Ładunek maksymalny jest w tym przypadku mniejszy i kształtuje się na poziomie 20 nC. Powyższe obserwacje wskazywały zatem, że zarejestrowane w fazie L2 sygnały wyładowań niezupełnych pochodzą z fazy L3.

Bardzo interesujące wyniki uzyskano również z pomiarów wykonanych w fazie L1. Stwierdzono tutaj superpozycję co najmniej dwu źródeł wzn. Podobnie jak w przypadku rejestracji w fazie L2, widoczne są tu wyładowania niezupełne z fazy L3 (o wartości maksymalnej nieprzekraczającej 10 nC i przesunięte o 240°), ale widoczne są także wyładowania niezupełne o mniejszej wartości maksymalnej ładunku (2,5 nC), których źródło związane jest z mierzoną fazą L1.



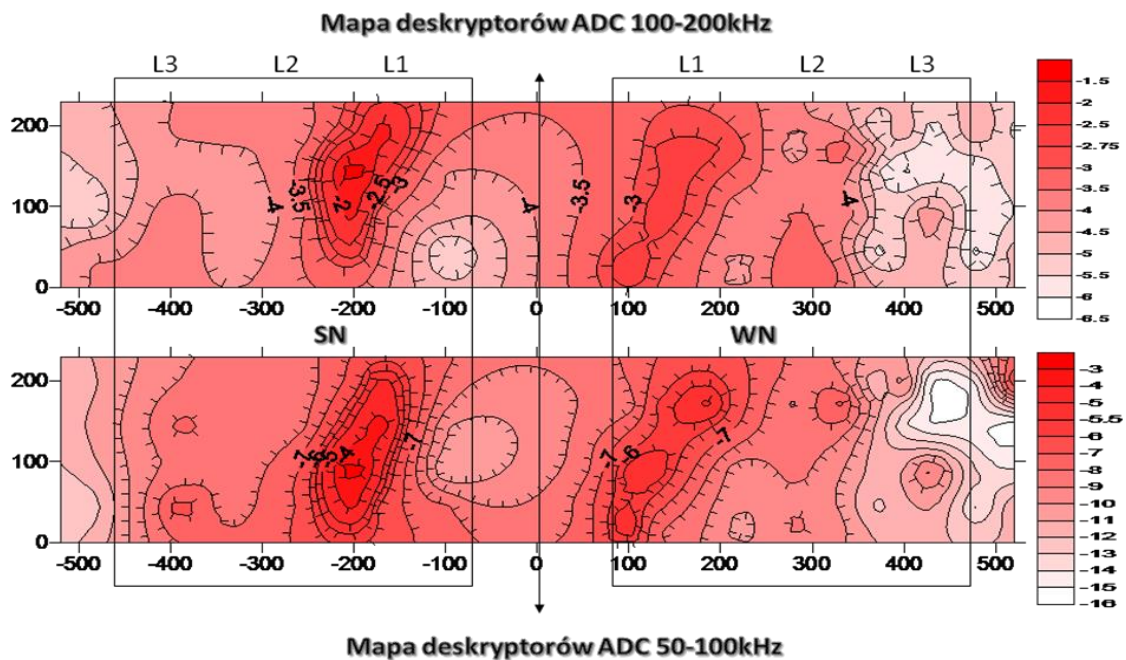


Rys. 3. Rozkłady amplitudowo-fazowe  $D(q, \varphi, n)$  i rozkłady fazowe  $q(\varphi)$  wyładowań niezupełnych w fazach L1, L2 i L3 diagnozowanego transformatora

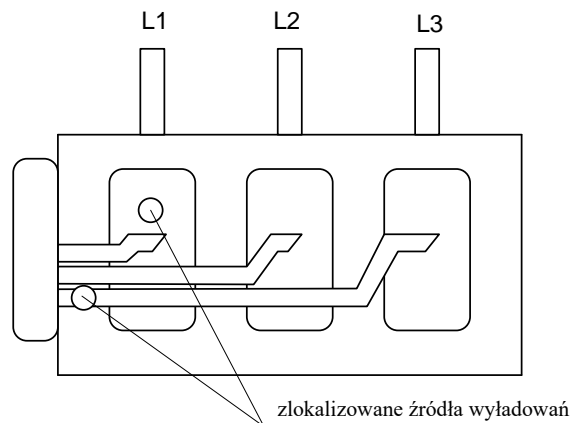
Fig. 3. The amplitude-phase  $D(q, \varphi, n)$  and phase  $q(\varphi)$  distributions of PD in L1, L2, L3 phases of tested transformer

Jednocześnie z metodą elektryczną do pomiarów wyładowań niezupełnych zastosowano metodę emisji akustycznej. Pomiary wykonano dla sieci punktów pomiarowych rozłożonych równomiernie na ścianach bocznych kadzi transformatora. Do analizy wykorzystano metodę obejmującą podstawowy i zaawansowany opis sygnałów emisji akustycznej, w tym tworzenie map deskryptorów [12]. W efekcie uzyskano mapy wartości deskryptorów ADP i ADC na ścianach bocznych kadzi transformatora. Mapę taką przedstawia rys. 4, gdzie na osi  $x$  oznaczono położenie bieżące wzdłuż kadzi transformatora w cm, na osi  $y$  – wysokość bieżącą na kadzi transformatora w cm, a oś  $z$  oznacza wartości deskryptorów ADP i ADC (przy czym większa wartość deskryptora odpowiada większemu „zaawansowaniu” sygnału emisji akustycznej, zarejestrowanego w punkcie pomiarowym).

Na rys. 4 widać, że największa intensywność sygnałów emisji akustycznej występuje w okolicach fazy L1, co nie pokrywa się z wynikami pomiarów uzyskanymi metodą elektryczną. Rozbieżność wyników uzyskanych obiema metodami została wyjaśniona po rewizji układu izolacyjnego transformatora. W wyniku rewizji ujawniono uszkodzenie na połączeniu fazy L3 z przełącznikiem zaczepów, zlokalizowane w obszarze uzwojenia fazy L1, co przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Mapa deskryptorów emisji akustycznej na ścianach bocznych badanego transformatora [6]  
 Fig. 4. Acoustic emission descriptors map on the side walls of the tested transformer



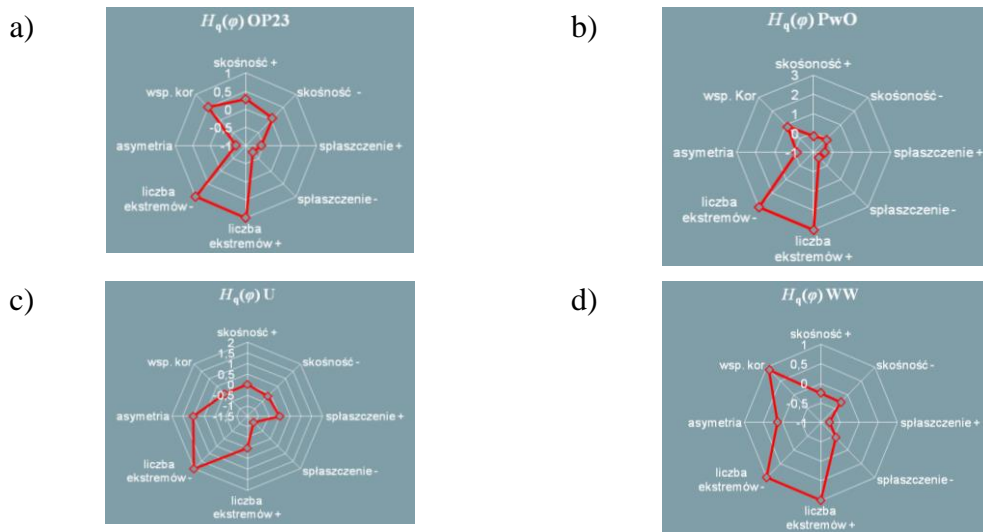
Rys. 5. Zlokalizowane podczas rewizji transformatora miejsca występowania wyładowań wg [6]  
 Fig. 5. Places of PD – located in the revision of the transformer

Wynik pomiaru metodą elektryczną dla fazy L3 jest zatem poprawny – źródło wyładowań występuje w obwodzie fazy L3, choć zlokalizowane jest w okolicy uzwojenia fazy L1. Podczas rewizji transformatora, w uzwojeniu fazy L1 wykryto również dodatkowe źródło wyładowań niepełnych potwierdzające prawidłowość pomiarów zarówno metodą elektryczną, jak i metodą emisji akustycznej.

## 5. METODA IDENTYFIKACJI FORM WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Opis wyładowań niezupełnych w postaci rozkładów amplitudowych i fazowych różnych parametrów związanych ze zjawiskiem wyładowań niezupełnych w badanym obiekcie pozwala na określenie ich rodzaju i charakteru. Każda z wielkości opisujących zjawisko zawiera jednak tylko część informacji jakościowej i ilościowej o charakterze zarejestrowanych wyładowań. Podstawą do identyfikacji wyładowań niezupełnych występujących w badanym układzie izolacyjnym jest jednoczesna analiza informacji zawartej w poszczególnych rozkładach. Na potrzeby takiej analizy powstała m.in. statystyczna metoda oceny wyładowań niezupełnych, zaimplementowana w programie TEAS, dedykowanym do komputerowego detektora TE-571. Zawarte w tym programie narzędzia statystyczne umożliwiają uzyskanie pokaźnego zbioru parametrów opisujących badany obiekt. Program TEAS zawiera bazę danych ze zbiorami parametrów wynikających z obróbki statystycznej różnych przypadków, jednoznacznie zidentyfikowanych wyładowań niezupełnych w różnorodnych układach izolacyjnych. Baza ta może być przez użytkowników uzupełniana. Porównanie uzyskanego w danej sytuacji pomiarowej zbioru parametrów ze zbiorami zawartymi w bazie danych programu TEAS powinno skutkować określeniem rodzaju zmierzonego wyładowania niezupełnego. Jednak w wielu przypadkach już wystąpienie niewielkich różnic w uzyskanych rozkładach, w stosunku do rozkładów stanowiących podstawę stworzenia bazy, skutkuje brakiem jakiegokolwiek interpretacji uzyskanych wyników. Z tego powodu w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów podjęto prace nad opracowaniem innej metody umożliwiającej określenie rodzaju rejestrowanych wyładowań niezupełnych na podstawie obrazu statystycznego, ale bez konieczności posiadania rozbudowanej bazy danych. Proponowana metoda wykorzystuje współczynniki statystyczne, charakterystyczne dla rozkładów fazowych i amplitudowych wyładowań niezupełnych [9, 10].

Punktem wyjścia do opracowania nowej metody identyfikacji rodzaju wyładowań niezupełnych była analiza wyników pomiarów wykonanych zarówno w układach modelowych, jak i w rzeczywistym układzie izolacyjnym transformatora (w którym źródło wyładowań było jednoznacznie zidentyfikowane). Opracowując wyniki pomiarów, dla badanych rodzajów wyładowań niezupełnych za pomocą programu TEAS uzyskano: współczynniki skośności i skupienia, liczbę maksimumów w dodatniej i ujemnej połowie sinusoidy napięcia probierczego oraz współczynniki asymetrii i korelacji dla rozkładów fazowych: maksymalnego ładunku pozornego  $H_q(\varphi)$ , średniego ładunku pozornego  $H_{qn}(\varphi)$  oraz liczby wyładowań  $H_n(\varphi)$ . Ponadto, uzyskano współczynniki skośności oraz skupienia dla rozkładów statystycznych ładunku pozornego  $H(q)$  i energii wyładowań niezupełnych  $H(w)$ . Przykłady obrazów statystycznych w formie wykresów radarowych dla rozkładu  $H_q(\varphi)$ , uzyskane dla wybranych źródeł wyładowań niezupełnych pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Obrazy statystyczne wyładowań: a) w układzie ostrze - płyta uziemiona, zanurzonym w oleju, b) na powierzchni płyty szklano epoksydowej zanurzonej w oleju, c) ulot, d) w układzie izolacyjnym transformatora (wyładowania wewnątrz izolacji papierowo-olejowej) [11]

Fig. 6. Static images of PD: a) for the configuration of blade - grounded plate (in oil), b) on the surface of the glass-epoxy plate (in oil), c) for corona discharge, d) in insulation system of transformer (PD inside of paper-oil insulation) [11]

Analizując pokazane obrazy, zauważono bardzo duże podobieństwo dla obrazów wyładowań niezupełnych w oleju, występujące pomimo różnego charakteru źródeł tych wyładowań oraz dużą różnicę między tymi obrazami a obrazem statystycznym ulotu czy wyładowania wewnętrznego [11]. Postanowiono zatem wykorzystać te różnice do w miarę obiektywnego i prostego określania rodzaju wyładowań niezupełnych na podstawie pomiarów metodą elektryczną. Do badania różnic i podobieństw dla poszczególnych form wyładowań zastosowano zależność liniową [11]:

$$f = Bx + C, \quad (1)$$

gdzie:  $x$  – zmienna,  $B$  – współczynnik kierunkowy,  $C$  – współczynnik określający położenie prostej na wykresie.

Założono, że identyfikacja form wyładowań niezupełnych nie będzie wykonywana bezpośrednio na podstawie współczynników  $B$  i  $C$ , ale z wykorzystaniem ilorazu  $B/C$ .

Po przetestowaniu wielu możliwości zdecydowano się na analizę zależności liniowych pomiędzy wybranymi współczynnikami statystycznymi, opisującymi rozkłady fazowe  $H_q(\varphi)$ ,  $H_{qn}(\varphi)$  i  $H_n(\varphi)$ . Przeanalizowano zależności pomiędzy: współczynnikiem skośności w dodatniej i ujemnej połowie napięcia probierczego, współczynnikiem skupienia w dodatniej i ujemnej połowie napięcia probierczego, liczbą maksimum w dodatniej i ujemnej połowie napięcia probierczego, współczynnikami asymetrii i korelacji. Analizowano również zależność współczynników skośności i skupienia w rozkładach statystycznych  $H(q)$  oraz  $H(w)$ .

Z analizy wartości uzyskanych współczynników  $B$  i  $C$  oraz ilorazu  $B/C$  wynika, że najbardziej przydatne do określenia rodzaju wyładowania są wartości ilorazu  $B/C$  dla

rozkładów fazowych maksymalnej wartości ładunku pozornego  $H_q(\varphi)$  i średniej wielkości ładunku pozornego  $H_{qn}(\varphi)$ . Dla obu tych rozkładów, uzyskanych przy wyładowaniach niezupełnych w oleju, wartości ilorazu  $B/C$  dla współczynników skośności są ujemne i zawierają się w przedziale -0,2 do -0,9. W przypadku ulotu wartość tego ilorazu dla współczynników skośności jest równa dokładnie -1, natomiast dla wyładowań wewnętrznych wartość ta jest dodatnia. Dla współczynników skupienia wszystkie wartości  $B/C$  są dodatnie dla wyładowań niezupełnych w oleju i zawierają się w zbiorze  $(0 \div 1)$ . Dla wyładowań wewnętrznych są to wartości ujemne, ale większe niż -1. Dla ulotu jest to ponownie dokładnie wartość -1. Interesujące jest także porównanie wartości ilorazu  $B/C$  dla rozkładu amplitudowego ładunku pozornego. Również w tym przypadku występuje duże zróżnicowanie wartości  $B/C$  dla różnych rodzajów wyładowań niezupełnych, co może jeszcze bardziej ułatwić identyfikację mierzonych wyładowań. Dla wyładowań z ostrza w oleju i dla ulotu (podobny model wyładowań) moduły tych wartości są zbliżone  $(0,55 \div 0,65)$  i wyraźnie różne od modułów wartości  $B/C$  uzyskiwanych dla wyładowań powierzchniowych w oleju i wyładowań wewnętrznych  $(1,38 \div 1,68)$ .

Opisane wyżej zróżnicowanie wartości ilorazu  $B/C$  wynika z faktu, iż kształt rozkładów statystycznych ładunku pozornego dla różnych rodzajów wyładowań niezupełnych jest odmienny. Dla ulotu i wyładowań niezupełnych z ostrzy w oleju są to rozkłady symetryczne, zbliżone do normalnych, a dla wyładowań powierzchniowych i wewnętrznych są to rozkłady bardzo niesymetryczne [1, 11].

Można przypuszczać, że w przypadku gdy dalsze badania potwierdzą powtarzalność zauważonych zależności dla podobnych form wyładowań niezupełnych, to przedstawiony powyżej sposób analizy wyników pomiarów mógłby usprawnić i udoskonalić proces rozpoznawania form wyładowań niezupełnych. Natomiast testowany iloraz  $B/C$  mógłby być używany jako dodatkowy wskaźnik identyfikacji rodzaju wyładowań niezupełnych, nieczuły na niewielkie różnice rejestrowanych metodą klasyczną rozkładów w stosunku do rozkładów wzorcowych. Miałyby to istotne znaczenie w codziennej analizie układów izolacyjnych za pomocą pomiaru wyładowań niezupełnych metodą elektryczną [11].

## BIBLIOGRAFIA

1. Duda D., Gacek Z.: Propozycja kwalifikowania i ustalania kolejności badań diagnostycznych linii kablowych. „Przegląd Elektrotechniczny” 2012, nr 11b, s. 166-169,
2. Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.: Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia. Wydawnictwo IPPT PAN, Warszawa 2001.
3. Gacek Z.: Wysokonapięciowa technika izolacyjna. Wydawnictwo Pol. Śl., Gliwice 2006.

4. Gacek Z., Szadkowski M., Duda D., Witos F., Maźniewski K.: Poszukiwanie kompleksowej metody pomiaru, identyfikacji i lokalizacji wyładowań niezupełnych w wysokonapięciowych układach izolacyjnych. „Przegląd Elektrotechniczny” 2004, nr 9, s. 821-824.
5. Gacek Z., Szadkowski M., Witos F., Malitowski G., Szerszeń G.: Badanie wyładowań niezupełnych w olejowym transformatorze energetycznym zespoloną metodą elektryczno-akustyczną wspomaganą metodą chromatograficzną. „Przegląd Elektrotechniczny” 2010, nr 11b, s. 13-16.
6. Gacek Z., Szadkowski M., Witos F., Malitowski G.: Badanie wyładowań niezupełnych w olejowym transformatorze energetycznym zespoloną metodą elektryczno-akustyczną. „Przegląd Elektrotechniczny” 2010, nr 11b, s. 287-290.
7. Gacek Z., Szadkowski M., Maźniewski K., Duda D., Malitowski G.: Diagnostowanie transformatorów WN metodą łączną pomiaru wyładowań niezupełnych. Materiały Międzynarodowej Konferencji Transformatorowej Transformator, Toruń 1 - 3.06.2011 r. s. 2.1/1-2.1/9.
8. Kołtunowicz W.: Badania diagnostyczne izolacji gazowych rozdzielnic wysokiego napięcia. Oficyna Wydawnicza Pol. Warszawskiej, Warszawa 2003.
9. Szadkowski M., Maźniewski K.: Metoda analizy obrazów statystycznych różnych form wyładowań niezupełnych. „Energetyka” 2012, nr 10, 606-612.
10. Szadkowski M.: Nowa metoda analizy obrazu statystycznego ulotu. „Przegląd Elektrotechniczny” 2014, nr 3, s. 103-106.
11. Szadkowski M., Maźniewski K., Duda D.: Obraz statystyczny wyładowań niezupełnych w oleju. „Przegląd Elektrotechniczny” 2014, nr 10, s. 164-167.
12. Witos F.: Badanie wyładowań niezupełnych metodą emisji akustycznej i metodą elektryczną. Wydawnictwo Politechnik Śląskiej, Gliwice 2008.
13. PN-EN 60270:2003 Wysokonapięciowa technika probiercza. Pomiary wyładowań niezupełnych.
14. PN-EN 60076-3:2014-02 Transformatory – Część 3: Poziomy izolacji, próby wytrzymałości elektrycznej i zewnętrzne odstępstwa izolacyjne w powietrzu.

Dr inż. Dominik DUDA. Prof. dr hab. inż. Zbigniew GACEK,

Dr inż. Krzysztof MAŻNIEWSKI, Dr inż. Marek SZADKOWSKI

Tel. (32) 237-24-43; dominik.duda@polsl.pl

Tel. (32) 237-15-27; zbigniew.gacek@polsl.pl

Tel. (32) 237-24-43; marek.szadkowski@polsl.pl

Tel. (32) 237-24-43; krzysztof.mazniewski@polsl.pl

Politechnika Śląska

Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów

ul. Krzywoustego 2,

44 – 100 Gliwice