



Barbara Florkowska*

ZASTOSOWANIE OBRAZÓW FAZOWYCH DO IDENTYFIKACJI MECHANIZMÓW I FORM WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Streszczenie: Przedstawiono zagadnienia identyfikacji defektów i procesów degradacji wywołanych działaniem wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia stosując w tym celu obrazy fazowe impulsowych objawów wyładowań. Scharakteryzowano obrazy fazowe wybranych form wyładowań i wpływ na nie różnych czynników, w tym zakłóceń i narażeń eksploatacyjnych.

Słowa kluczowe: diagnostyka, układy izolacyjne, wyładowania niezupełne, obrazy fazowe

1. Wstęp

Techniki diagnostyczne dla układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych wysokiego napięcia, oparte na detekcji sygnałów impulsowych generowanych w wyniku zjawisk towarzyszących procesom degradacji, uwzględniają następujące założenia:

- wybór właściwych sygnałów, które mogą być uznane jako pochodzące od procesów starzeniowych,
- możliwości ich wykrywania i stosowania odpowiednich systemów pomiarowych,
- opracowanie diagnozy dla oceny stanu układu izolacyjnego.

Pomimo doskonalenia metod pomiarowych, ostatnie zadanie pozostaje najtrudniejszym do spełnienia, w rozumieniu predykcji czasu życia lub zapasu trwałości układu izolacyjnego, albo też stopnia zaawansowania procesów degradacji. Składa się na to zespół przyczyn, do których należą: znajomość mechanizmów fizykalnych

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Zakład Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

procesów degradacji, wykazujących cechy szczególne w różnych konstrukcjach układów izolacyjnych, dynamiczny charakter przemian w defektach wywołujących niejednoznaczne skutki w obwodach pomiarowych, wpływ narażeń eksploatacyjnych, a ponadto superpozycja efektów od różnych źródeł sygnałów, w tym pochodzących zarówno od defektów struktury, jak i od zakłóceń zewnętrznych.

Trudności w zakresie realizacji skutecznych pomiarów wielkości charakteryzujących wyładowania niezupełne wynikały z faktu iż, pochodzący od nich sygnał jest co najmniej dwuwymiarowy o składowych podlegających znacznym wpływowi losowym, a w pewnych układach, ze względu na przyczyny fizyczne, również dużej dynamice zmian w czasie [1]. Ten przypadek dotyczy szczególnie izolacji nasyconej, w której procesy gazowania oleju pod wpływem wyładowań działają jak sprzężenie zwrotne, zarówno „dodatnie”, jak i „ujemne”, zależnie od stanu procesu dyfuzji gazu w oleju.

Impulsy wyładowań niezupełnych charakteryzują się — przy pewnych cechach okresowości — stochastycznością swego występowania, co oznacza niestabilność wartości ładunków wyładowań q_i i momentów czasowych φ_i kolejnych impulsów. Problemy wynikające z losowego charakteru impulsów wyładowań były rozwiązywane — przynajmniej częściowo — wraz z wprowadzeniem techniki analizy impulsów. Otrzymane tą metodą rozkłady amplitudowe dostarczały informacji o jednym wymiarze sygnału, to jest wartości ładunku pozornego wyładowań. Pomiaru wykonywane w dłuższym czasie, przy założeniu stabilności wyładowań, umożliwiały opracowanie parametrów statystycznych tych rozkładów.

Czynione były również próby identycznego postępowania w odniesieniu do drugiego wymiaru sygnału wyładowań, to jest położenia fazowego impulsu na przebiegu sinusoidalnego napięcia probierczego, lecz kierunek ten, chociaż mógłby być uzupełniającym do poprzedniego, nie znalazł praktycznie zastosowania.

Obecne techniki pomiarowe umożliwiają uzyskanie pełnego opisu sygnałów wyładowań niezupełnych w wyniku rejestracji w czasie rzeczywistym sekwencyjnych impulsów, posiadających współrzędne fazowe i amplitudowe, przy uwzględnieniu synchronizacji początku rejestracji względem napięcia probierczego [2, 3]. Jest to kompleksowy opis sygnału zarówno w najmniejszej, podstawowej ze względów fizycznych jednostce czasu a więc w połowie okresu napięcia, jak i uśrednionych w dłuższym czasie. W ten sposób w technice badań wyładowań niezupełnych powstała możliwość otrzymywania obrazów wyładowań.

2. Obrazy fazowe wyładowań niezupełnych

Obrazem wyładowań niezupełnych $D(q, \varphi, n)$ jest rzut na płaszczyznę powierzchni będącej rozkładem dwuwymiarowym: ładunku q_i i fazy φ_i każdego pojedynczego wyładowania, zebranych przynajmniej z jednego półokresu napięcia probierczego. Trzeci wymiar — częstość wyładowań n_i zakodowany jest w obrazie za pomocą umownie przyjętej skali kolorów lub stopni szarości. Ta forma przedstawienia wyników może być wykorzystana w różny sposób, zależnie od zapotrzebowania i od stopnia komplikacji zaangażowanego aparatu matematycznego.

W diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia zagadnienia powyższe dotyczą identyfikacji defektów w materiałach i konstrukcjach, które to defekty stanowią źródła wyładowań. O formie wyładowania związanej z defektem decyduje rozkład pola elektrycznego, stwarzający warunki np. dla wyładowań podłużnych lub poprzecznych w polu jedностajnym lub quasijednostajnym, albo też wyładowań typu ulotowego w gazie lub związanych z emisją polową w polu wybitnie niejednostajnym. Są to odpowiednio formy wyładowań charakterystyczne dla izolacji warstwowej np. maszyn elektrycznych, kondensatorów i przekładników, gazowych systemów izolacyjnych, izolacji wytłaczanej, zawierającej mikroostrza lub wtrącenia przewodzące. Dla licznych rodzajów i form wyładowań charakterystyczne są różne kształty impulsów (czas narastania i opadania) oraz ich wartości szczytowe, a także różna ich częstość i faza występowania w okresie napięcia. Jest to następstwem osobliwych w różnych ośrodkach (stałych, ciekłych i gazowych) warunków inicjowania i propagacji lawin elektronowych, wpływających na losowe wartości momentów czasowych inicjowania wyładowania oraz czasów ich rozwoju, składających się na opóźnienie lub przyspieszenie kolejnych wyładowań przy napięciu przemiennym [1]. Charakterystyczne jest przy tym występowanie zbiorów impulsów wyładowań w różnych zakresach kątów fazowych w okresie napięcia, a także zmiany położenia fazowego przy oddziaływaniu różnych czynników, szczególnie w przypadku dynamicznych form wyładowań.

3. Identyfikacja form wyładowań

Podstawę badań nad wpływem rodzaju defektu w układzie izolacyjnym na formę wyładowań i typ obrazu fazowego stanowią:

- opisy mechanizmów fizykalnych form wyładowań,
- hipotezy właściwych dla nich rozkładów amplitudowych i fazowych ładunków oraz obrazów fazowych,
- eksperymentalne obrazy fazowe modelowych form wyładowań oraz form wyładowań w obiektach rzeczywistych.

Analiza warunków inicjowania i rozwoju wyładowań niepełnych w układach izolacyjnych odniesiona do typowych przypadków:

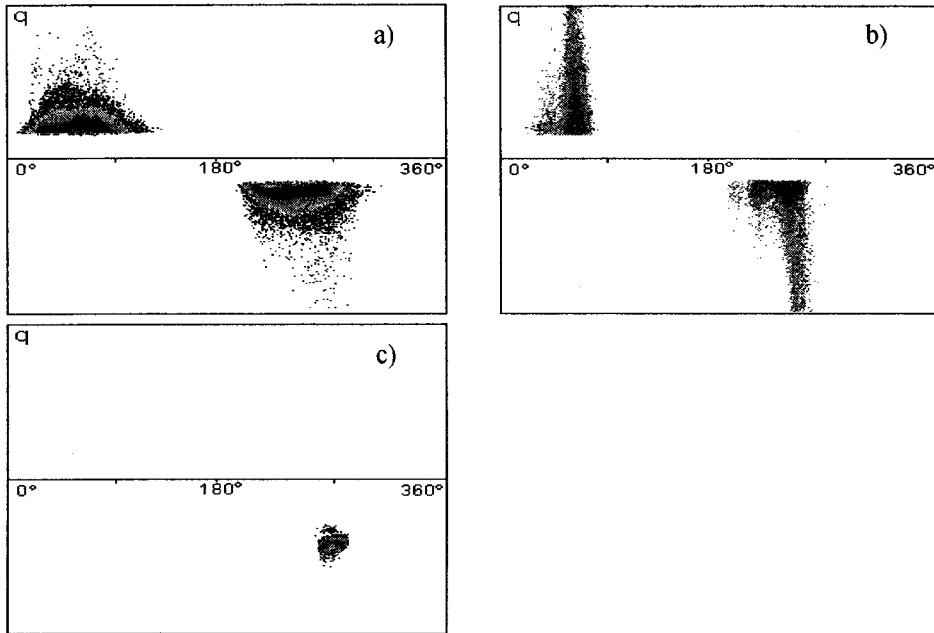
- a) występowania różnego rodzaju defektów z fazą gazową w materiale stałym lub układzie nasyconym dielektrykiem ciekłym, w których rozkład pola elektrycznego zależy od kształtu inkluzji gazowej, przenikalności elektrycznej ośrodka i zewnętrznego pola elektrycznego,
- b) rodzaju wyładowań po powierzchniach granicznych ośrodka gazowego i stałego i posiadających charakter wyładowań podtrzymywanych,
- c) mechanizmów wyładowań uwarunkowanych obecnością ładunku przestrzennego w polu wybitnie niejednostajnym,

dla wyodrębnienia takich ich cech jak:

- zakres fazowy zbioru impulsów w okresie napięcia,
- struktura zbioru impulsów,
- ich symetria lub asymetria w połowach okresu napięcia,

- częstość powtarzania z uwzględnieniem biegunowości napięcia,
- zmienność pod wpływem napięcia probierczego,

przewodzi do wniosków uzasadniających typy obrazów fazowych wymienionych przypadków form wyładowań, których przykłady przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Obrazy fazowe $D(q, \varphi, n)$ wyładowań: a) w polu jednostajnym (inkluzje gazowe), b) na powierzchniach granicznych, c) w polu wybitnie niejednostajnym

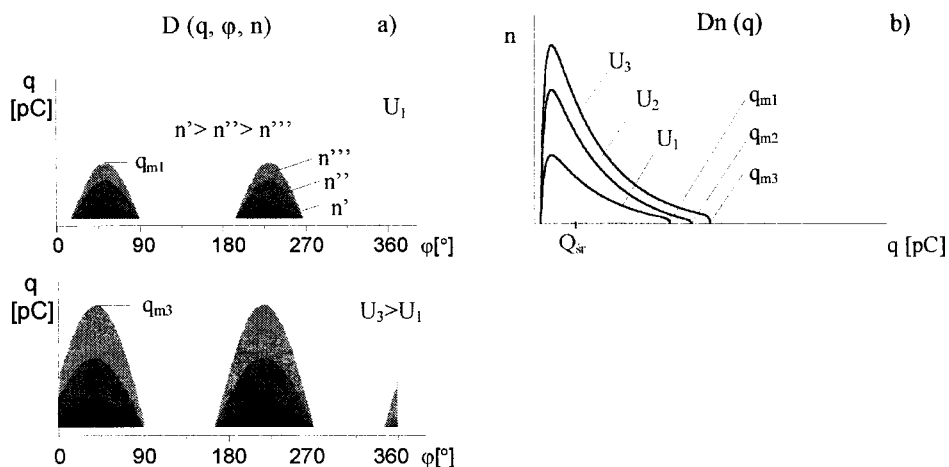
Ze schematów przemian w funkcji napięcia obrazów fazowych $D(q, \varphi, n)$ i rozkładów amplitudowych $Dn(q)$ wynika że:

w przypadku a) (Rys. 2):

- zakres fazowy wyładowań w okresie z_φ zawiera się od 0°C do 90°C oraz od 180°C do 270°C , lecz ze wzrostem napięcia gdy $U \gg U_0$ (U_0 – napięcie początkowe wyładowań), zakres fazowy może być większy od 90°C ,
- zróżnicowane zbiory ładunków wyładowań tworzą niesymetryczne rozkłady amplitudowe $Dn(q)$ o rozstępie od q_{min} do q_{max} , przy czym dominujące w zbiorze są wyładowania o małych ładunkach,
- ze wzrostem napięcia zwiększa się zakres fazowy z_φ , rośnie liczba wyładowań N ($N = \sum n_i$) oraz ładunek maksymalny q_{max} ,

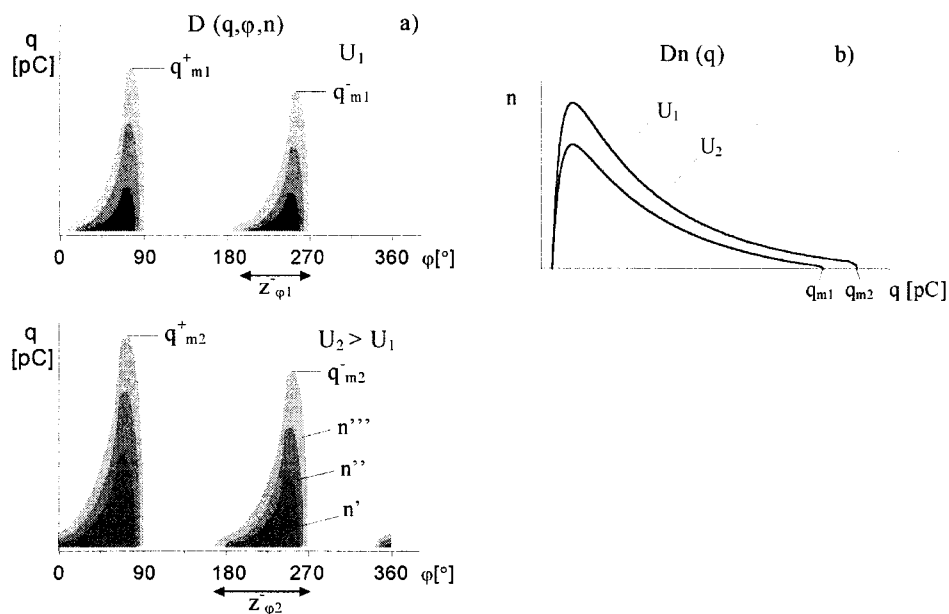
w przypadku b) (Rys. 3)

- zakres fazowy wyładowań z_φ zawiera się od 0°C do 90°C oraz od 180°C do 270°C przy czym są to wyładowania strimerowe i podtrzymywane oraz możliwe jest występowanie wyładowań w całym okresie napięcia,
- rozkład amplitudowy $Dn(q)$ jest wybitnie niesymetryczny, obejmujący duży zakres ładunków o małej częstości,



Rys. 2. Obrazy fazowe $D(q, \varphi, n)$ i rozkłady amplitudowe $Dn(q)$ wyładowań w wewnętrznych inkluzjach gazowych

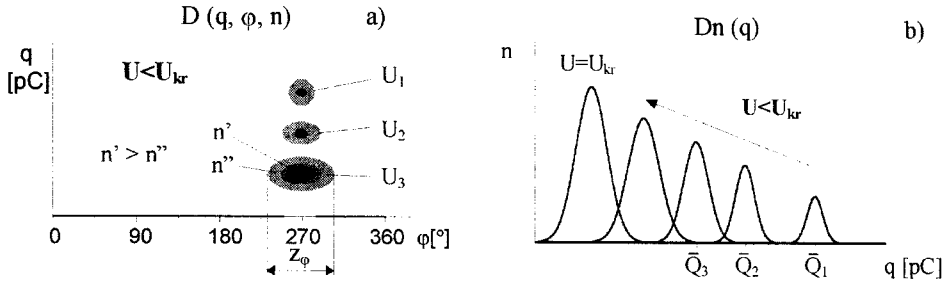
- wzrostowi napięcia towarzyszy zwiększanie się zakresu fazowego z_φ i ładunku maksymalnego q_{max} ,



Rys. 3. Obrazy fazowe $D(q, \varphi, n)$ i rozkłady amplitudowe $Dn(q)$ wyładowań powierzchniowych

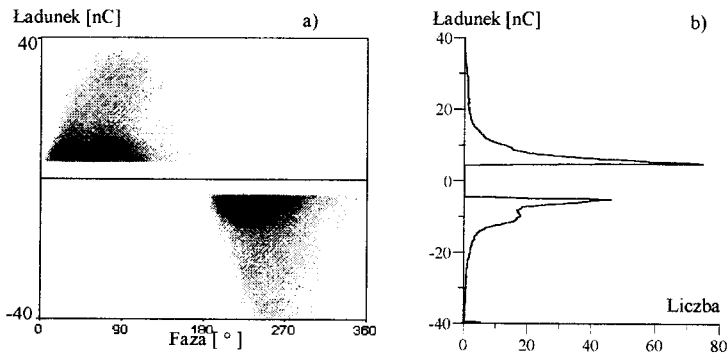
w przypadku c) (Rys. 4)

- zakres fazowy wyładowań z_φ występuje symetrycznie wokół wartości szczytowej napięcia w ujemnej połowie okresu (gdy elektroda inicjująca jest wysokonapięciowa),
- rozkład amplitudowy ładunków $Dn(q)$ zbliżony do normalnego wykazuje dużą stabilność impulsów wokół wartości modalnej,
- wzrostowi napięcia towarzyszy zwiększanie zakresu fazowego z_φ tylko gdy $U_0 < U < U_{kr}$ gdzie U_{kr} – napięcie krytyczne przejścia do formy bezimpulsowej wyładowania [4] oraz zmniejszanie się ładunku średniego \bar{Q} .



Rys. 4. Obrazy fazowe $D(q, \varphi, n)$ i rozkłady amplitudowe $Dn(q)$ wyładowań w polu wybitnie niejednostajnym

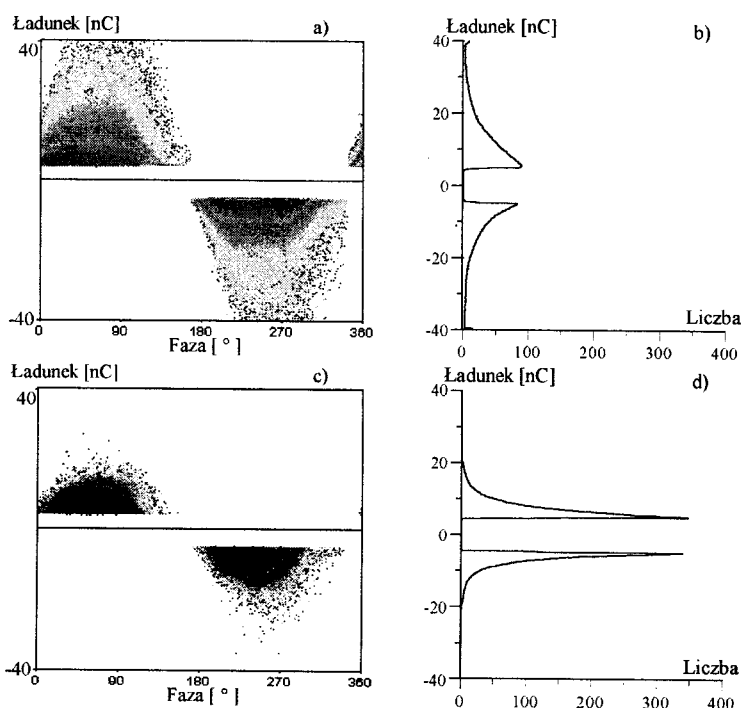
Rejestracja obrazów fazowych uzyskuje znacznie wyższy poziom pewności weryfikacji rodzajów wyładowań, szczególnie gdy dotyczy to oddzielenia różnego rodzaju zakłóceń. Jest to m.in. problem superpozycji źródeł wyładowań, który w metodach pomiaru ładunku pozornego, był praktycznie nierozwiązywalny.



Rys. 5. Obraz fazowy (a) wyładowań w izolacji pręta generatora w obecności zakłóceń typu ulotowego oraz rozkłady amplitudowe (b)

Metoda analizy amplitudowej dostarczyła pewnych możliwości w tym zakresie poprzez badanie charakterystyk liczby impulsów w funkcji napięcia. Obrazy wyładowań są dalszym rozwinięciem tego kierunku badań. Charakterystyki parametrów

obrazów w funkcji napięcia mogą służyć, po dekompozycji, do ewentualnego rozróżnienia źródeł wyładowań. Istotny problem rozpoznawania zakłóceń jest w układach pomiarowych realizowany poprzez separację fazową lub badanie przebiegów niekoherentnych. Obrazy fazowe umożliwiają eliminację zakłóceń — również dzięki temu, że skatalogowanie ich jest łatwiejsze niż defektów — źródeł wyładowań. Również analiza FFT kształtu impulsów daje rozróżnienie między sygnałem użytecznym i szumem. Przykład obrazu fazowego wyładowań w wewnętrznych inkluzjach gazowych w izolacji pręta generatora wysokiego napięcia w obecności zakłóceń ulotowych przedstawia rysunek 5 [5]. Jak w wielu badaniach wykazano, procesy erozyjne pod działaniem wyładowań niezupełnych, szczególnie w warunkach synergizmu narażeń, wpływają wyraźnie na charakterystyki wyładowań i ich obrazy fazowe np. [6, 7, 8]. W przypadku wyładowań wielolicznych o charakterze *swarming micropartial discharges* charakterystyczny jest wzrost częstości wyładowań o małych ładunkach i transformacja obrazu fazowego do postaci przedstawionej na rysunku 6 [8].



Rys. 6. Transformacja obrazów fazowych i rozkładów amplitudowych od stanu pierwotnego (a, b) do stanu po działaniu narażeń termicznych (c, d)

Podstawowy sposób opracowania wyników pomiarów impulsów wyładowań będący kontynuacją i ewolucją metody analizy amplitudowej polega na wyznaczeniu wartości przeciętnych i momentów wyższych rzędów rozkładów obydwu parametrów sygnału, to jest ładunku i fazy, a następnie porównanie wyników z reprezentatywnymi wzorcami opracowanymi dla modelowych defektów w różnych rodzajach izolacji [9]. Mnogość,

kompleksowość i możliwość kombinacji różnych defektów utrudniają jednak otrzymanie wiarygodnych wyników pod względem minimalizacji oczekiwanego błędu. Celem do którego należy zmierzać są próby opisu matematycznego powierzchni geometrycznej zbioru parametrów impulsów wyznaczonych dla danego przypadku, zastosowanie metod dekompozycji jej na składowe pochodzące od różnych źródeł i następnie porównanie z odpowiednimi wzorcami. Aktualnie rozwijane są i adoptowane z teorii przetwarzania sygnałów, metody rozpoznawania obrazów [10, 11]. Wyniki pomiarów zawarte w obrazach fazowych zostają porównane z zespołem obrazów wzorcowych, których program został „nauczony” i które zostały mu zaimplementowane.

4. Zakończenie

Procesy degradacji układów izolacyjnych pod działaniem wyładowań niepełnych, w których zasadnicze znaczenie mają erozja i drzewienie elektryczne, charakteryzuje wieloetapowość i różnorodność oddziaływania energetycznego.

Skuteczność metod diagnostycznych zależy od możliwości jednoznacznego zdefiniowania zbioru cech przypisywanych stanowi danego obiektu, co w odniesieniu do wyładowań niepełnych oznacza identyfikację defektów oraz prognozowanie przemian w nich zachodzących. Podstawę takiego działania stanowi znajomość mechanizmów fizykalnych inicjowania i rozwoju wyładowań, od których zależy kształtowanie się różnych ich form, uwzględnienie superpozycji form wyładowań i zakłóceń oraz wpływu innych czynników, mogących wpływać na postać obrazów fazowych, na przykład zniekształcenia przebiegu napięcia.

Najbardziej celowym wydaje się być wykorzystanie obrazów fazowych wyładowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych nie w sposób „statyczny” lecz w monitoringu ciągłym w celu rejestracji i opracowania trendu zmian obrazów podczas eksploatacji urządzenia. Wymaga to indywidualnego potraktowania każdego urządzenia, założenia bazy danych o charakterystykach wyładowań i okresowego sprawdzania.

Literatura

- [1] **Florkowska B.**: *Analiza mechanizmów wyładowań niepełnych w układach elektroizolacyjnych wysokiego napięcia*, Wyd. AGH, Rozprawy i Monografie nr 25, Kraków, 1995
- [2] **Florkowska B., Florkowski M., Zydróż P., Włodek R.**: *Partial discharge acquisition and data processing*, Advances in Modelling & Analysis, Periodicals B, AMSE Press, vol. 30, No 4, pp. 7-15, 1994
- [3] **James R. E., Phung B. T., Blackburn T. R.**: *Computer-aided digital techniques for partial discharge measurements and analysis*, Proc. 7th ISH, pp. 1-5, Toronto 1991
- [4] **Florkowska B., Włodek R.**: *Pulse height analysis of partial discharges in air*, IEEE Trans. EI, Vol. 28, No 6, pp. 932-940, 1993
- [5] **Florkowska B., Zydróż P.**: *Interpretation of Partial Discharge Patterns for Insulation Diagnostic Air*, 10th ISH, Montreal, 1997

- [6] **Florkowska B.:** *Analysis of Partial Discharge Mechanisms and their Patterns for Diagnosis of Insulation System*, ICPADM'97, Seoul, 1997
- [7] **Borsi H.:** *The Relation between thermal and electrical stress and the PD behaviour of epoxy-resin transformers*, IEEE Trans. EI, Vol. 28, No 6, pp. 1007–1015, 1993
- [8] **Florkowska B.:** *Application of partial discharge patterns for assessment of multistress synergy in thermosetting stator bar insulation*, Proc. 9th ISH, paper 5648, Graz, 1995
- [9] **Gulski E., Kreuger F. H.:** *Computer-aided recognition of discharge sources*, IEEE Trans. EI, Vol. EI-27, No 1, pp. 82–92, 1992
- [10] **Florkowski M.:** *Partial discharge image recognition using neural network for high voltage insulation systems*, Wyd. AGH, Rozprawy i Monografie nr 45, Kraków, 1996
- [11] **Hozumi N., Okamoto T., Imajo T.:** *Discrimination of partial discharge patterns using a neural network*, IEEE Trans. EI, Vol. EI-27, No 3, pp. 550–556, 1992

APPLICATION OF PHASE-RESOLVED PATTERNS TO IDENTIFICATION OF MECHANISM
AND KINDS OF PARTIAL DISCHARGES

This paper describes problems of recognition of partial discharge (PD) patterns in the diagnostic of high voltage insulating systems. The phase patterns of model PD, schemes of their changes under voltage action have been presented and the influence of disturbances and exploitation factors (temperature) on the PD patterns in degradation process have been also characterized.

Referat opracowano w ramach umowy nr 10.120.510
finansowanej przez Komitet Badań Naukowych