

Obraz statystyczny wyładowań niezupełnych w oleju

Streszczenie. W artykule zaprezentowano propozycję metody interpretacji wyników pomiaru wyładowań niezupełnych (wnz). Analizując zależności liniowe między współczynnikami statystycznymi opisującymi rozkłady fazowe i amplitudowe wnz, starano się pokazać różnice i podobieństwa w „obrazach statystycznych” wyładowań w oleju, ulotowych i wewnętrznych. Artykuł jest efektem kontynuacji badań nad nowymi metodami interpretacji wyników uzyskiwanych tzw. metodą elektryczną pomiaru wnz.

Abstract. The article presents a proposal for interpretation method of measurement results of partial discharge (PD). Basing on analysis of the linear dependences between the statistical coefficients describing the phase and amplitude distributions of PD, authors tried to show the differences and similarities in the "statistical picture" of discharges in oil - corona and internal. This paper is the effect of continuing research into new interpretation methods of the results obtained by conventional, electric method. (**Statistical picture of partial discharges in oil**)

Słowa kluczowe: wysokie napięcie, wyładowania niezupełne, układ izolacyjny, rozkłady statystyczne.

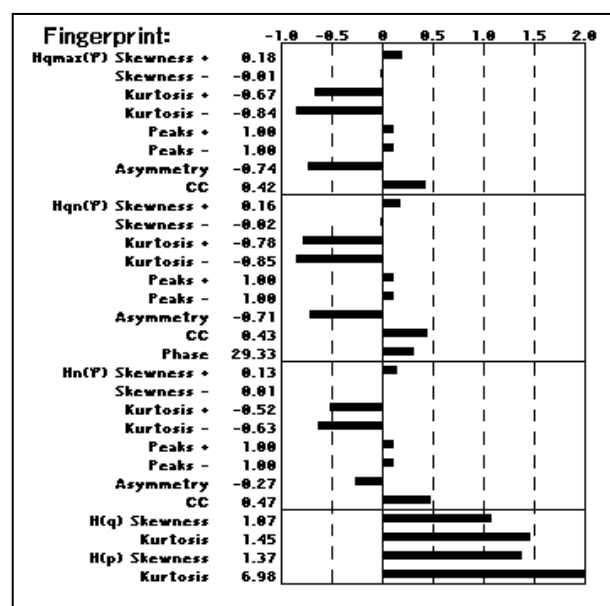
Keywords: high voltage, partial discharges, insulation system, statistical distribution.

doi:10.12915/pe.2014.10.42

Wstęp

Pomiar wyładowań niezupełnych (wnz) jest uznana metodą diagnozowania stanu układów izolacyjnych [1, 2].

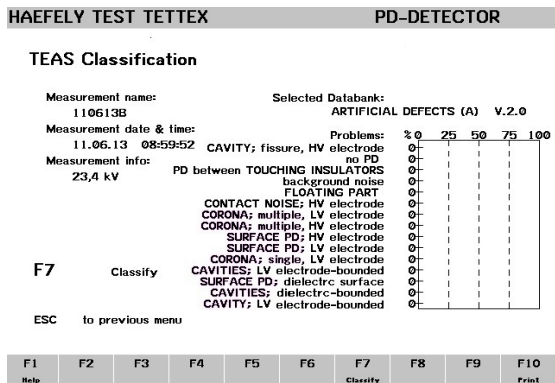
Stosuje się przy tym rozmaite metody pomiarowe i związane z nimi sposoby oceny wnz [5,6]. W niniejszym artykule ograniczono się do prezentacji wyników uzyskiwanych jedną z najstarszych tego typu metod, metodą elektryczną pomiaru wnz. Pomiar metodą elektryczną umożliwia m.in. wykorzystywany przez autorów detektor PDD TE571 firmy Haefely. Zakres częstotliwości napięcia pomiarowego tego detektora to 40 - 420 Hz, zakres pomiarowy ładunku pozornego to 0 do 999 nC a szerokość pasma pomiarowego zawiera się w granicach 40 kHz do 400 kHz. W wyniku pomiarów uzyskuje się łącznie 23 rozkłady fazowe, amplitudowe i amplitudowo-fazowe oraz przebiegi czasowe opisujące badany rodzaj wnz. Są to: rozkłady fazowe maksymalnej wartości ładunku pozornego $H_q(\varphi)$, średniej wartości ładunku pozornego $H_{qn}(\varphi)$, liczby wyładowań $H_n(\varphi)$, sumy ładunków (także w funkcji czasu); rozkłady intensywności wyładowań w zależności od wartości ładunku pozornego oraz energii wnz; wielkości opisujące wnz w dziedzinie czasu, tj: poziom maksymalnej wartości ładunku pozornego, poziom średniej wartości ładunku pozornego, prąd wyładowań niezupełnych, wartość maksymalna energii wyładowań, wartość średnia energii wyładowań, moc wyładowań niezupełnych, wartość chwilowa napięcia zapłonu wyładowań, wartość chwilowa napięcia gaśnięcia wyładowań, liczba impulsów wyładowań, rozkłady amplitudowe intensywności i energii wyładowań w funkcji czasu; rozkłady amplitudowo-fazowe intensywności wyładowań: 3D oraz tzw. „Color”. Każda z wymienionych wielkości zawiera jednak tylko część informacji jakościowej i ilościowej o wnz. Mimo to tak szeroki opis wyładowań niezupełnych w badanym urządzeniu, a właściwie w jego układzie izolacyjnym, pozwala czasami doświadczonemu diagnoście na określenie i rodzaju i charakteru fizycznego wnz. Sytuacja komplikuje się gdy przeprowadzający pomiary nie posiada wymaganego doświadczenia. Podstawą do identyfikacji wnz występujących w badanym układzie izolacyjnym może wtedy być jednoczesna analiza informacji zawartej w poszczególnych rozkładach [3]. Taką możliwość uzyskano w urządzeniu TE 571 poprzez implementację oprogramowania TE 571 DSW (TEAS). Narzędzia statystyczne zawarte w tej aplikacji umożliwiają uzyskanie pokaznego zbioru parametrów opisujących badany obiekt (układ izolacyjny) (rys. 1).



Rys.1. Obraz statystyczny wnz uzyskany przy pomocy programu TEAS

Zawarta w aplikacji funkcja „Classify” [5, 6.] umożliwia porównanie uzyskanego obrazu statystycznego (rys. 1) z obrazami znajdującymi się w jednej z baz danych programu TEAS. W przypadku znalezienia odpowiedniego lub odpowiednich obrazów, wyświetlana jest tabela z prawdopodobieństwem rodzaju mierzonego wnz, w wierszach od największego do najmniejszego. Niestety żeby uzyskać odpowiedni wynik należy dysponować bardzo rozbudowaną bazą danych z obrazami statystycznymi różnych form wnz pochodzących od możliwie dużej ilości źródeł wnz. W przeciwnym wypadku wyświetlana jest informacja z zerowym prawdopodobieństwem ustalenia rodzaju wnz (rys. 2).

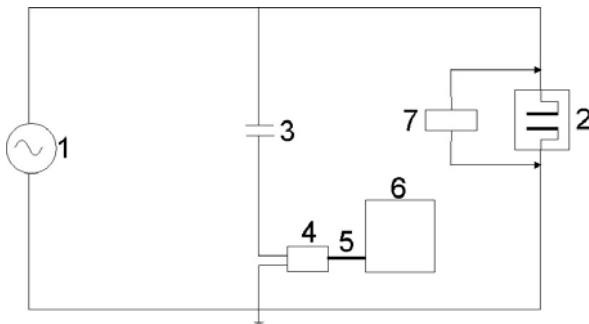
W niniejszym artykule pokazano fragment wyników prac autorów nad metodą umożliwiającą określenie rodzaju wnz na podstawie „obrazu statystycznego” ale bez konieczności posiadania rozbudowanej bazy danych [7, 8]. Analizę wykonano wykorzystując współczynniki statystyczne charakterystyczne dla rozkładów fazowych i amplitudowych wnz [7, 8].



Rys.2. Wyniki działania funkcji „Classify” programu TEAS

Analiza wyników pomiaru wyładowań niepełnych w oparciu o współczynniki rozkładów fazowych i statystycznych

W literaturze trudno jest znaleźć porównanie wartości współczynników statystycznych dla poszczególnych rodzajów wyładowań. W artykułach [7, 8] oraz w niniejszym artykule podjęto próbę częściowego wypełnienia tej luki. Wszystkie niezbędne do analiz pomiaru wykonywano w ekranowanym pomieszczeniu (klatka Faradaya z autonomicznym uziemieniem i separacją od sieci zasilającej) przy użyciu specjalnie w tym celu przygotowanego układu probierczego (rys. 3).



Rys.3. Schemat układu pomiarowego;

1 – źródło wysokiego napięcia (transformator probierczy), 2 – obiekt badań (próbki zanurzone w transformatorowym oleju mineralnym, wypełniającym uziemioną kadz lub dielektryczna komora do badań wnz w powietrzu), 3 – kondensator sprzęgający, 4 – cewnik sprzęgający, 5 – przewód łączący (ekranowany), 6 – detektor TE 571, 7 – kalibrator

W artykule zaprezentowano wyniki pomiarów dla różnych źródeł wnz w oleju. Dodatkowo zaprezentowano, dla porównania, wyniki pomiaru ulotu i wnz wewnętrznego w izolacji wzdłużnej uzwojenia transformatora. Obrazy źródeł i nadane im akronimy zawarto w tabeli 1.

Tabela 1. Modele źródeł wnz analizowanych w artykule oraz nadane im akronimy

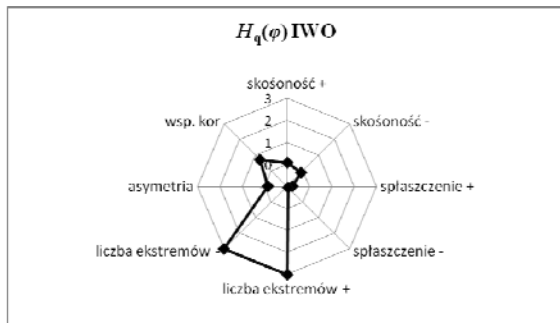
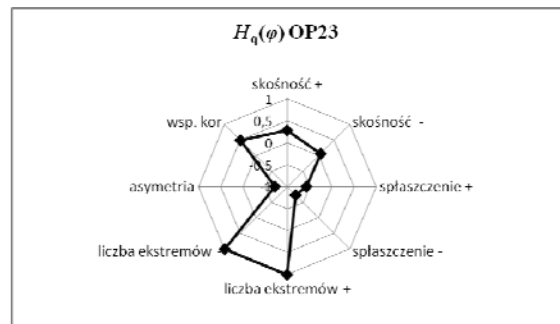
| | | | | |
|-------------|-----|-----|---|----|
| | | | | |
| OP23 i OP25 | IWO | PWO | U | WW |

Znaczenie poszczególnych akronimów jest następujące:

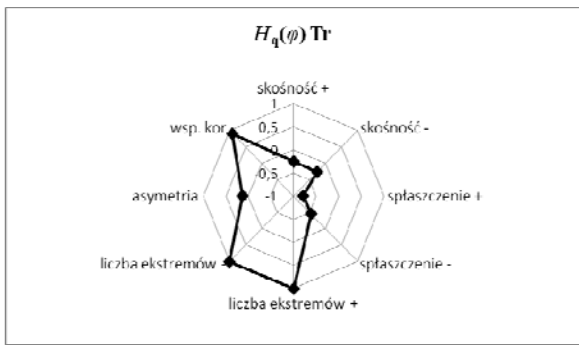
1. **OP23** – układ ostrze (WN) uziemiona płyta – pomiar przy napięciu 23 kV.
2. **OP25** – układ ostrze (WN) uziemiona płyta – pomiar przy napięciu 25 kV.

3. **IWO** – izolator wsporczy zanurzony w oleju (prawdopodobne wyładowanie powierzchniowe).
4. **PWO** – płyta szklana umieszczona na dnie wypełnionej olejem, uziemionej kadzi; na płytę przyłożono okrągłą elektrodę WN o ostrych krawędziach (prawdopodobne wyładowanie powierzchniowe).
5. **U** – elektroda ostrzowa (o średnicy ostrza 100 μm) umieszczona w odległości 30 mm od uziemionej elektrody płaskiej, pomiar przy napięciu probierczym $U=2,2$ kV wyładowanie ulotowe.
6. **WW** – zmierzone i zweryfikowane w rzeczywistym transformatorze 110 kV wewnętrzne wnz w uzwojeniu wzdłużnym uzwojenia GN.

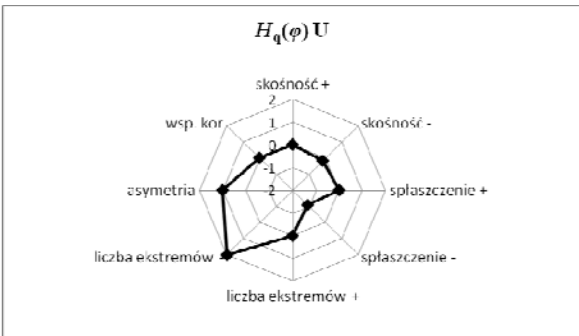
W wyniku pomiarów dla każdego z wymienionych modeli uzyskano (przy pomocy programu TEAS): współczynniki skośności (A_3), skupienia (K), liczbę maksimów (max) w dodatniej i ujemnej połowie sinusoidy napięcia probierczego oraz współczynniki asymetrii (as) i korelacji (r_{xy}) dla rozkładów fazowych: ładunku pozornego $H_q(\varphi)$, ładunku odpowiadającego największej liczbie wyładowań $H_{qn}(\varphi)$ oraz liczby wyładowań $H_n(\varphi)$. Ponadto uzyskano współczynniki skośności oraz skupienia dla rozkładów statystycznych ładunku pozornego $H(q)$ i energii wnz $H(w)$. Przykłady obrazów statystycznych w formie wykresów radarowych dla rozkładu fazowego maksymalnego ładunku pozornego $H_q(\varphi)$, dla różnych źródeł wnz pokazano na rysunkach 4 do 6.



Rys. 4. Obrazy statystyczne wnz w oleju

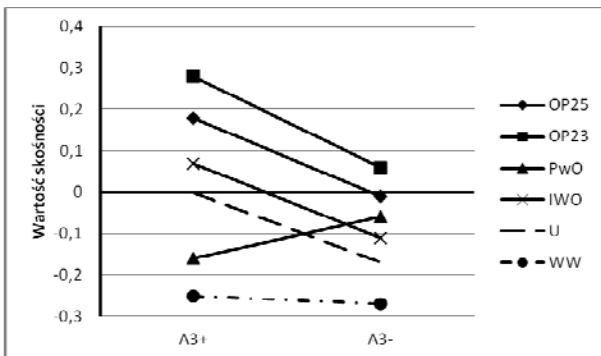


Rys.5. Obraz statystyczny wyładowania wewnętrznego

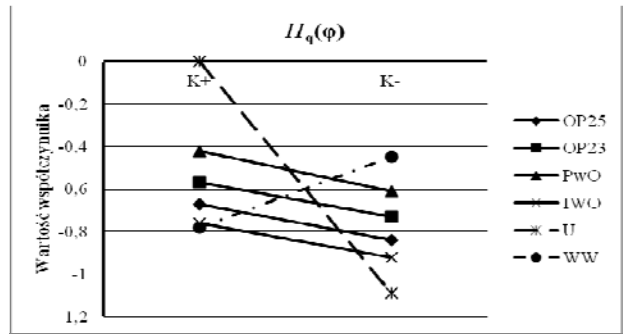


Rys.6. Obraz statystyczny ulotu

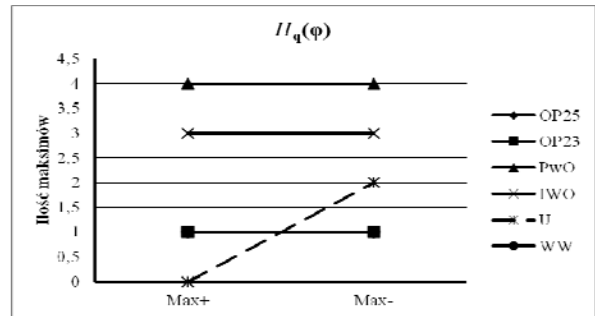
Łatwo jest zauważyć bardzo duże podobieństwo dla obrazów wzn w oleju, mimo różnych źródeł tych wyładowań oraz dużą różnicę między tymi obrazami a obrazem statystycznym ulotu czy wyładowania wewnętrznego. Autorzy postanowili to wykorzystać do opracowania w miarę obiektywnej i prostej metody określania rodzaju wzn na podstawie pomiarów metodą elektryczną. Do badania różnic i podobieństw dla poszczególnych form wyładowań użyto prostej zależności liniowej (1). Po przetestowaniu wielu możliwości zdecydowano się na analizę zależności liniowych pomiędzy wybranymi współczynnikami opisującymi rozkłady fazowe $H_q(\varphi)$, $H_{qn}(\varphi)$ i $H_n(\varphi)$. Analizowano zależności pomiędzy: współczynnikiem skośności w dodatniej i ujemnej połowie napięcia probierczego (rys. 7), współczynnikiem skupienia w dodatniej i ujemnej połowie napięcia probierczego (rys. 8), liczbą maksimum w dodatniej i ujemnej połowie napięcia probierczego (rys. 9), współczynnikami asymetrii i korelacji (rys. 10). Analizowano również zależność współczynników skośności i skupienia w rozkładach statystycznych $H(q)$ oraz $H(w)$ (rys. 11).



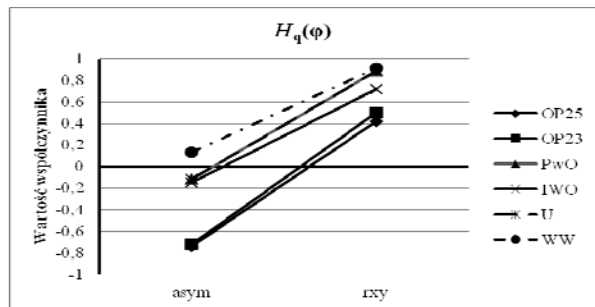
Rys.7. Współczynnik skośności w dodatniej (A_{3+}) i ujemnej (A_{3-}) połowie sinusoidy napięcia probierczego dla rozkładu fazowego $H_q(\varphi)$, dla różnych form wzn:



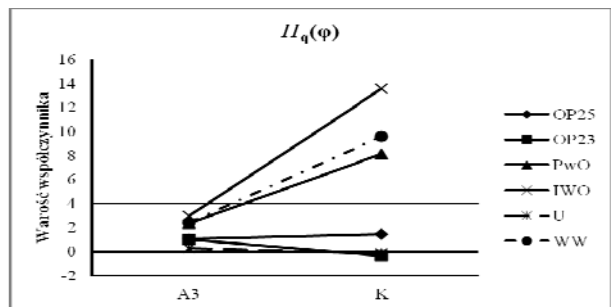
Rys.8. Współczynnik skupienia w dodatniej ($K+$) i ujemnej ($K-$) połowie sinusoidy napięcia probierczego dla rozkładu fazowego $H_q(\varphi)$, dla różnych form wzn



Rys.9. Liczba maksimum w dodatniej ($max+$) i ujemnej ($max-$) połowie sinusoidy napięcia probierczego dla rozkładu fazowego $H_q(\varphi)$, dla różnych form wzn



Rys.10. Współczynniki asymetrii ($asym$) i korelacji (r_{xy}) dla rozkładu fazowego $H_q(\varphi)$, dla różnych form wzn



Rys.11. Współczynniki skośności (A_3) i skupienia (K) dla rozkładu statystycznego $H(q)$, dla różnych form wzn

Do opisu zależności pomiędzy ww. współczynnikami zastosowano równanie prostej w postaci kierunkowej:

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

gdzie:

w - zmienna, B - współczynnik kierunkowy, C - współczynnik określający położenie prostej na wykresie,

Przykładowe zestawienie współczynników B i C dla skośności (A_3) pokazano w tabeli 2.

Tabela 2. Współczynniki B i C dla skośności (rys. 7)

| | $H_q(\varphi)$ | | $H_{qn}(\varphi)$ | | $H_n(\varphi)$ | |
|------|----------------|-------|-------------------|-------|----------------|------|
| | B | C | B | C | B | C |
| OP25 | -0,19 | 0,37 | -0,18 | 0,34 | -0,12 | 0,25 |
| OP23 | -0,22 | 0,50 | -0,19 | 0,46 | -0,21 | 0,48 |
| PwO | 0,10 | -0,26 | 0,05 | -0,15 | 0,00 | 0,00 |
| IWO | -0,18 | 0,25 | -0,10 | 0,13 | -0,01 | 0,21 |
| U | -0,17 | 0,17 | -0,17 | 0,17 | -0,01 | 0,01 |
| WW | -0,02 | -0,23 | -0,06 | -0,17 | -0,07 | 0,20 |

W celu zobiektywizowania wyników przebadano stosunek B/C dla wszystkich form wnz i wszystkich wytypowanych wcześniej rozkładów fazowych i statystycznych. Wyniki analizy zestawiono w tabelach 3 do 5. W artykule nie przedstawiono wyników dla „maksimów” oraz par wsp. asymetrii - wsp. korelacji. Stosunek B/C dla „maksimów” jest równy 0 dla wszystkich rodzajów wnz z wyjątkiem ulotu, dla którego jest on równy -1. Z kolei dla wsp. asymetrii i korelacji wartości B/C są zbliżone i równe -0,63 dla wnz z ostrza w oleju i -0,85 do -1,2 dla pozostałych rodzajów wnz.

Tabela 3. Wartość stosunku B/C dla współczynników skośności A_3 różnych rodzajów wnz

| | $H_q(\varphi)$ | $H_{qn}(\varphi)$ | $H_n(\varphi)$ |
|------|----------------|-------------------|----------------|
| OP25 | -0,51 | -0,53 | -0,48 |
| OP23 | -0,44 | -0,41 | -0,44 |
| PwO | -0,38 | -0,33 | |
| IWO | -0,72 | -0,77 | -0,05 |
| U | -1,00 | -1,00 | -1,00 |
| WW | 0,09 | 0,35 | -0,35 |

Tabela 4. Wartość stosunku B/C dla współczynników skupienia K , różnych rodzajów wnz

| | $H_q(\varphi)$ | $H_{qn}(\varphi)$ | $H_n(\varphi)$ |
|------|----------------|-------------------|----------------|
| OP25 | 0,34 | 0,1 | -0,27 |
| OP23 | 0,39 | 0,21 | -0,16 |
| PwO | 0,83 | 0,12 | -0,27 |
| IWO | 0,27 | 0,07 | -0,02 |
| U | -1,00 | -1,00 | -1,00 |
| WW | -0,3 | -0,12 | -0,2 |

Tabela 5. Wartość stosunku B/C dla zależności między współczynnikami skośności (A_3) i skupienia (K) dla rozkładów statystycznych $H(q)$ i $H(w)$

| | $H(q)$ | $H(w)$ |
|------|--------|--------|
| OP25 | 0,55 | -1,32 |
| OP23 | -0,58 | -5,55 |
| PwO | -1,68 | -1,27 |
| IWO | -1,38 | -1,40 |
| U | -0,64 | -1,61 |
| WW | -1,51 | 8,47 |

Z analizy wartości zawartych w tabelach 3 do 5 wynika, że najbardziej przydatne do próby określenia rodzaju wyładowania są wartości B/C dla rozkładów fazowych maksymalnej wartości ładunku pozornego $H_q(\varphi)$ i średniej wielkości ładunku pozornego $H_{qn}(\varphi)$. Dla obu tych rozkładów wartości B/C są ujemne i zawierają się w

przedziale -0,2 do -0,9 dla współczynników skośności wnz w oleju (od ostrza i powierzchniowych), są równe dokładnie -1 dla ulotu i są dodatnie dla wyładowań wewnętrznych. Dla współczynników skupienia, wszystkie wartości B/C są dodatnie dla wnz w oleju i zawierają się w zbiorze (0÷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 statystycznego (amplitudowego) ładunku pozornego. Łatwo jest zauważyć duże zróżnicowanie tych wartości dla różnych rodzajów wnz, co może jeszcze bardziej ułatwić identyfikację mierzonego wnz. Dla wyładowań z ostrza w oleju i dla ulotu (podobny model wnz) moduły tych wartości są zbliżone (0,55÷0,65) i wyraźnie różne od modułów wartości B/C dla wyładowań powierzchniowych w oleju i wyładowań wewnętrznych (1,38÷1,68). Wynika to z innych kształtów rozkładów statystycznych ładunku pozornego dla różnych rodzajów wnz. Dla ulotu i wnz z ostrzy w oleju są to rozkłady symetryczne, zbliżone do normalnych a dla wnz powierzchniowych i wewnętrznych są to rozkłady bardzo niesymetryczne [1, 3].

Podsumowanie

Można przypuszczać, że w przypadku gdy dalsze badania potwierdzą powtarzalność zauważonych przez autorów zależności dla podobnych form wyładowań niepełnych, to przedstawiony powyżej sposób analizy wyników pomiarów mógłby usprawnić i udoskonalić proces rozpoznawania form wyładowań niepełnych. Miałoby to istotne znaczenie w codziennej analizie układów izolacyjnych przy pomocy pomiaru wnz metodą elektryczną.

Można w tym celu stworzyć wspomagający program komputerowy, w którym danymi wejściowymi będą współczynniki statystyczne opisujące rozkłady fazowe i amplitudowe wnz a wynikiem działania programu byłoby rozpoznanie prawdopodobnego rodzaju wyładowania.

LITERATURA

- [1] Florkowska B., Wyładowania niepełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia - analiza mechanizmów, form i obrazów. *IPPT PAN*, Warszawa 1997
- [2] Gulski E., Diagnostowanie wnz w urządzeniach WN w eksploatacji. *Prace Naukowe Pol. Warszawskiej*, Warszawa 2003, 128
- [3] Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.: Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia. *Polska Akademia Nauk IPPT*. Warszawa 2001
- [4] TEAS Instrukcja obsługi. Haefely-Trench, Switzerland.
- [5] Gacek Z., Szadkowski M., Witos F., Idea zespolonej metody diagnostowania transformatorów energetycznych wysokiego napięcia opartej na pomiarach wnz. *ZN Politechniki Śląskiej Elektryka*, Gliwice 2010
- [6] Gacek Z., Szadkowski M., Malitowski G., Witos F., Olszewska A.: Anusual Application of Partial Discharges to Diagnose of High Voltage Power Transformers, *Acta Physica Polonica A*, vol. 120 no. 4, (2011), 609-615
- [7] Szadkowski M., Maźniewski K.: Metoda analizy obrazów statystycznych różnych form wyładowań niepełnych. *Energetyka* 2012 nr 10, 606-612
- [8] Szadkowski M., Nowa metoda analizy obrazu statystycznego ulotu. *Przegląd Elektrotechniczny* 2014 r. 90 nr 3, 103-106

Autorzy: dr inż. Marek Szadkowski, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Marek.szadkowski@polsl.pl; dr inż. Krzysztof Maźniewski, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Krzysztof.mazniewski@polsl.pl; dr inż. Dominik Duda, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Dominik.duda@polsl.pl.