

Grzegorz MALITOWSKI
Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów
Politechnika Śląska, Gliwice

ANALIZA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH NA PODSTAWIE WYNIKÓW POMIARÓW WYKONANYCH MIERNIKIEM TE 571

Streszczenie. W artykule przedstawiono rozkłady i przebiegi czasowe wielkości opisujących wyładowania niezupełne mierzone za pomocą skomputeryzowanego szerokopasmowego detektora wyładowań niezupełnych. Przeanalizowano wybrane wyniki pomiarów wykonanych na próbkach dielektryków zawierających defekty wzorcowe w postaci różnego rodzaju inkluzji gazowych. Na podstawie wyników oraz wyznaczonych parametrów statystycznych dokonano próby wyodrębnienia cech charakterystycznych dla takich defektów izolacyjnych.

ANALYSIS OF PARTIAL DISCHARGES ON THE BASIS OF MEASUREMENT RESULTS PROCESSED WITH TE-571 DETECTOR

Summary. Partial discharge distributions and time functions of discharge quantities measured and processed with ultra wide band detector are presented in the paper. Measurement results for selected samples containing typical dielectric-bounded cavities are analysed. Basing on measurement results and statistic evaluation of partial discharge quantities characteristic partial discharge features are discussed.

1. WPROWADZENIE

Pomiary wyładowań niezupełnych (wnz) są coraz szerzej stosowane w elektroenergetyce do oceny stanu izolacji wysokonapięciowych urządzeń elektrycznych. W praktyce ocena ta ogranicza się często do porównania wartości napięcia zapłonu wyładowań i maksymalnej wartości ładunku pozornego w (pC) z poziomami dopuszczalnymi dla danego układu izolacyjnego określonymi w normach. W przypadkach przekroczenia dopuszczalnego poziomu wnz ważna staje się możliwość określenia rodzaju defektu izolacyjnego. Dobrym rozwiązaniem okazuje się zastosowanie w diagnostyce układów izolacyjnych mierników szerokopasmowych (ang. *UWB – Ultra Wide Band*), sprzężonych z systemem komputerowym, którego zadaniem jest magazynowanie i przetwarzanie danych pomiarowych. W artykule skupiono się na przedstawieniu i analizie wyników pomiarów wnz w układach izolacyjnych, w których występują inkluzje gazowe.

2. WIELKOŚCI OPISUJĄCE WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNE

Przedstawiane dalej wyniki pomiarów wnz uzyskano przy wykorzystaniu specjalistycznego skomputeryzowanego detektora TE-571 firmy HEAFELY TRENCH oraz jego wcześniejszej wersji TE 560 [3]. Detektor może pracować w dwóch trybach - standard

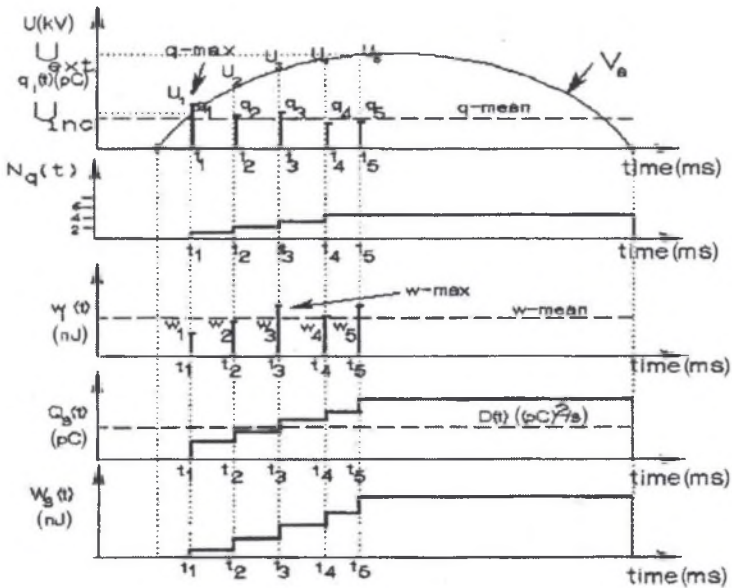
i analiza. W trybie standard mierzone są podstawowe wartości związane z wnz, zgodnie z normą PN-86/E-04066 [6] dotyczącą pomiarów wnz, natomiast w trybie analiza uzyskuje się ponad 20 rozkładów statystycznych i przebiegów czasowych tych wielkości. Tryb analiza dostępny jest dopiero po przeprowadzeniu pomiarów.

2.1. Wielkości podstawowe wnz

Wielkościami podstawowymi rejestrowanymi i przetwarzanymi w czasie rzeczywistym podczas pomiaru są:

- ładunek pozorny (q),
- częstość powtórzeń (N_q),
- napięcie zapłonu wyładowań (U_0),
- napięcie gaśnięcia wyładowań (U_g),
- średni prąd wyładowań (i),
- energia (W) i moc wyładowań (p),
- wskaźnik D .

Mierzone wielkości są odniesione do sinusoidy napięcia probierczego (rys. 1).



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie wielkości związanych z wnz na tle półokresu napięcia probierczego
Fig. 1. Diagrammatic representation of partial discharge quantities related to the phase of the power frequency wave

Maksymalna szerokość pasma przetwarzania wynosi 400 kHz, co pozwala na uzyskanie rozdzielczości pomiarowej 8000 próbek w czasie jednego okresu napięcia probierczego.

2.2. Rozkłady i przebiegi czasowe wielkości opisujących wnz

Wyładowania niepełne są zjawiskiem stochastycznym, dlatego też do ich analizy konieczna jest obserwacja sygnałów wyładowań w przedziale czasu znacznie przekraczającym czas trwania jednego okresu napięcia probierczego. Na podstawie takiej obserwacji, z wykorzystaniem systemu pomiarowego TE-571, otrzymuje się:

- rozkłady fazowe: maksymalnej wartości ładunku pozornego ($H_{q_{\max}}(\varphi)$), średniej wartości ładunku pozornego ($H_{q_n}(\varphi)$), liczby wyładowań ($H_n(\varphi)$),
- rozkłady intensywności wyładowań zależnie od ładunku ($H_n(q)$) i energii ($H_n(p)$),
- wielkości opisujące wnz w dziedzinie czasu takie jak: wartość maksymalna i średnia ładunku pozornego ($q_{\max}(t)$ i $q_{\text{mean}}(t)$), prąd wnz ($i(t)$), wartość maksymalna i średnia energii wyładowań ($W_{\max}(t)$ i $W_{\text{mean}}(t)$), moc wnz ($p(t)$), wartość chwilowa napięcia zapłonu i gaśnięcia wyładowań ($u_{\text{inc}}(t)$ i $u_{\text{ext}}(t)$), liczba impulsów wnz ($N_q(t)$), wartość chwilowa wskaźnika D ($D(t)$),
- rozkłady fazowe zależne od czasu takie jak: wartość maksymalna i średnia ładunku pozornego ($H_{q_{\max}}(\varphi, t)$ i $H_{q_n}(\varphi, t)$), liczba wyładowań ($H_n(\varphi, t)$), suma ładunków ($H_{q_s}(\varphi, t)$),
- rozkłady amplitudowe intensywności i energii wyładowań w funkcji czasu ($H(q, t)$ i $H(p, t)$),
- rozkłady amplitudowo-fazowe intensywności wyładowań ($H_n(\varphi, q)$) w postaci trójwymiarowej lub dwuwymiarowej z poziomem intensywności oznaczonym kolorem.

Rozkłady amplitudowo-fazowe intensywności wyładowań dają obszerną informację o określonym defekcie izolacji i w związku z tym są one atrakcyjne pod względem możliwości identyfikacji wnz. Dla tego celu ważne jest zbudowanie bazy zawierającej typowe rozkłady dla odpowiednich rodzajów defektów. Przy zastosowaniu odpowiednich aplikacji służących do porównywania badanych obiektów z istniejącą bazą możliwa jest diagnoza badanego defektu. Taką funkcję spełnia program diagnostyczny TEAS (opcja oprogramowania detektora TE 571), który oprócz wspomnianych rozkładów posługuje się parametrami statystycznymi opisanymi dalej. Podczas analizy eksperckiej posługiwanie się rozkładami trójwymiarowymi nie zawsze pozwala na uzyskanie wystarczającej przejrzystości danych. W takich przypadkach wygodniejsza staje się analiza poziomu ładunku i liczby wyładowań na osobnych rozkładach fazowych w postaci dwuwymiarowej.

2.3. Analiza statystyczna

Parametry statystyczne rozkładów amplitudowych i fazowych wnz definiuje się do celów identyfikacji. Do analizy różnic rozkładów $H_{q_n}(\varphi)$ w dodatniej i ujemnej połówce sinusoidy napięcia zasilania wprowadza się następujące parametry statystyczne:

- współczynnik asymetrii rozkładów ładunków Q:

$$Q = \frac{Q_s^- / N^-}{Q_s^+ / N^+}, \quad (1)$$

gdzie: Q_s^- , Q_s^+ - sumy ładunku w ujemnej i dodatniej połówce okresu,
 N^+ , N^- - liczba wyładowań w ujemnej i dodatniej połówce okresu,

- współczynnik asymetrii fazy

$$\Phi = \frac{\varphi_i^-}{\varphi_i^+}, \quad (2)$$

gdzie: φ_i^- , φ_i^+ - fazy napięcia zapłonu wnz w ujemnej i dodatniej połówce okresu,

- współczynnik korelacji

$$cc = \frac{\sum xy - \sum x \sum y / n}{\sqrt{[\sum x^2 - (\sum x)^2 / n][\sum y^2 - (\sum y)^2 / n]}} , \quad (3)$$

gdzie: x, y – średnie wartości ładunku pozornego dla dodatniej i ujemnej połówki okresu,
 n – liczba półokresów.

W przypadku pełnej symetrii współczynniki przyjmują wartość równą 1, natomiast w przypadku zupełnej asymetrii wartość równą zero. Połączenie tych współczynników (poprzez mnożenie) skutkuje wprowadzeniem zmodyfikowanego współczynnika korelacji:

$$mcc = \Phi \cdot Q \cdot cc . \quad (4)$$

W przypadkach pojedynczych defektów, rozkłady wielkości związanych z wnz są zbliżone do rozkładu normalnego. Dlatego też w celu lepszej oceny rozkładów $H_{qn}(\varphi)$ i $H_n(\varphi)$ wprowadza się jeszcze dwa parametry statystyczne:

- współczynnik skośności rozkładu (ang. skewness)

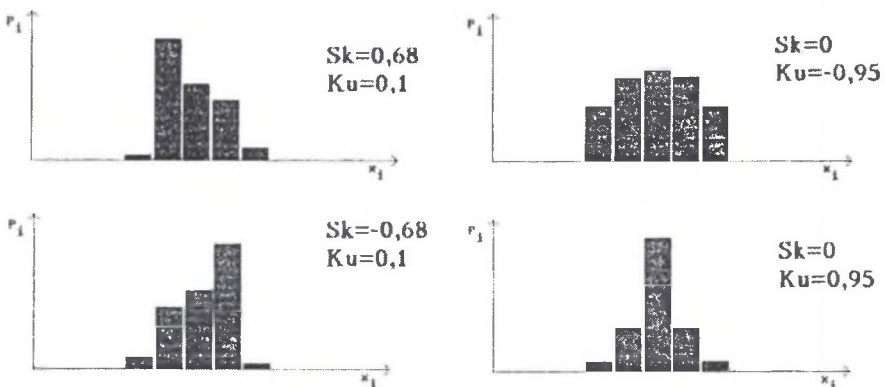
$$Sk = \frac{\sum (x_i - \mu)^3 P_i}{\sigma^3} , \quad (5)$$

- współczynnik skupienia Ku (ang. kurtosis)

$$Ku = \frac{\sum (x_i - \mu)^4 P_i}{\sigma^4} - 3 , \quad (6)$$

gdzie: x_i, μ – wartości chwilowa i średnia rozważanej wielkości losowej,
 P – prawdopodobieństwo,
 σ – odchylenie standardowe.

Współczynniki przyjmują wartości $Sk = 0$ dla rozkładu symetrycznego i $Ku = 0$ dla rozkładów o skupieniu identycznym z rozkładem normalnym (rys. 2).



Rys. 2. Przykładowe kształty rozkładów oraz ich współczynniki skośności i skupienia
 Fig. 2. Typical distribution profiles and their skewness and kurtosis

3. WYŁADOWANIA WEWNĘTRZNE WZORCOWE

Dla celów analizy poszczególnych rodzajów wyładowań często wykonuje się próbki materiałów izolacyjnych zawierające znane defekty, a konkretnie w przypadku wyładowań wewnętrznych inkluzje gazowe o znanym kształcie geometrycznym. W celu zobrazowania typowych wyładowań wewnętrznych posłużono się wynikami pomiarów przeprowadzonych z wykorzystaniem detektora TE-560 na próbkach z PE i PVC, zawierających cylindryczne inkluzje gazowe określonych rozmiarów - tab. 1 [2].

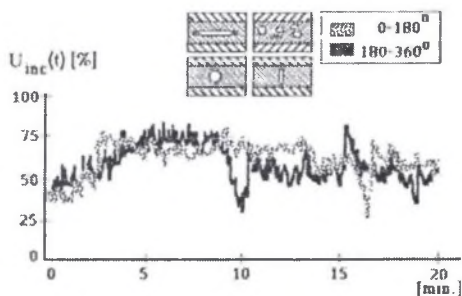
Tabela 1

Rozmiary cylindrycznych inkluzji gazowych w próbkach materiałów izolacyjnych z PE i PVC

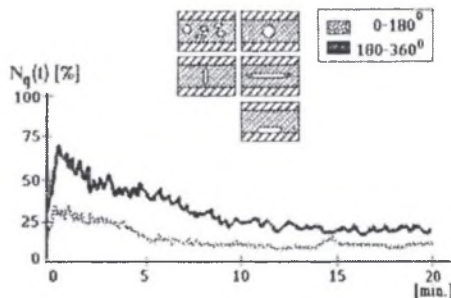
d (mm)	1,0	2,0	3,0	5,0	10,0	10,0
h (mm)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,1

Pomiary przeprowadzono przy wartości skutecznej napięcia probierczego 20% wyższej od napięcia zapiętu wyładowań w próbkach. Czas trwania próby wynosił 20 min. Dla badanych defektów izolacji charakterystyczny dla wszystkich próbek okazuje się wzrost napięcia zapiętu wyładowań w ciągu pierwszych 5 - 10 min trwania pomiarów (rys. 3). Można wnioskować, że w tym przedziale czasu następowały zmiany w próbkach, będące następstwem powstawania półprzewodzącej warstwy na powierzchni dielektryka otaczającej inkluzję. Spadek wartości napięcia na defekcie jest przyczyną wzrostu napięcia zapiętu wyładowań.

Na rysunku 4 pokazana jest zależność czasowa liczby wnz. Zależnie od rodzaju defektu wartość 100% odpowiada liczbie wyładowań z zakresu od 8 do 16. Spadek liczby wyładowań w czasie trwania pomiaru powodowany jest wzrostem poziomu napięcia zapiętu wyładowań. Kolejne wykresy (rys. 5 - 8) to zestawienie rozkładów fazowych liczby wyładowań ($H_n(\varphi)$) i średniej wartości ładunku pozornego ($H_{qn}(\varphi)$) dla poszczególnych próbek (dla czasu pomiarów 20 min). Wspólną cechą tych rozkładów jest zakres fazowy występowania wyładowań w okresie napięcia probierczego (z_p), który zawiera się mniej więcej w przedziałach (0° ; 90°) i (180° ; 270°).



Rys. 3. Typowa zależność czasowa napięcia zapiętu wnz $U_{inc}(t)$ dla inkluzji gazowych
Fig. 3. Characteristic time dependence of the inception voltage $U_{inc}(t)$ for cavity discharges







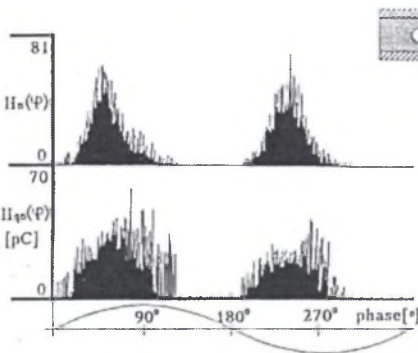
Rys. 4. Typowa zależność czasowa liczby wnz $N_q(t)$ dla inkluzji gazowych
Fig. 4. Characteristic time dependence of the number of discharges $N_q(t)$ for cavity discharges

Okazuje się, że ta cecha jest charakterystyczna dla wyładowań w wewnętrznych inkluzjach gazowych [1]. Ze wzrostem napięcia probierczego zakres fazowy występowania wnz może przekraczać 90° (zarówno dla dodatniej jak i ujemnej połowy okresu). Kształty

rozkładów generowanych przez poszczególne inkluzje różnią się między sobą i są charakterystyczne dla konkretnych typów defektów.

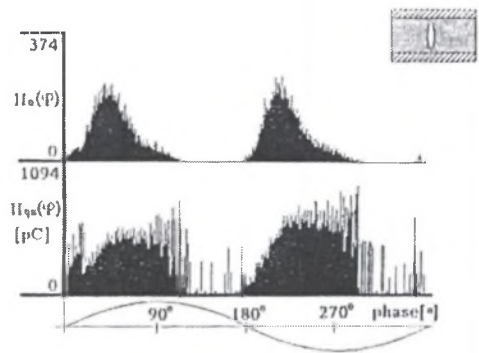
Tabela 2
Zestawienie przybliżonych wartości parametrów statystycznych dla inkluzji o znanych kształtach

Rodzaj inkluzji	Sk dla $H_{qn}(\varphi)$		Ku dla $H_n(\varphi)$		mcc dla $H_{qn}(\varphi)$
	+	-	+	-	
	0,27	0,17	0,42	0,58	0,44
	0,08	-0,29	0,75	0,68	0,53
	0,58	0,61	0,98	1,15	0,38
	0,22	0,25	-0,65	-0,42	0,38



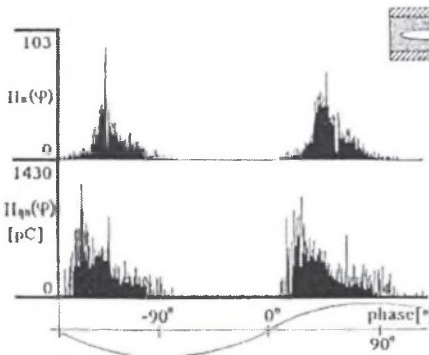
Rys. 5. Rozkłady $H_n(\varphi)$ i $H_{qn}(\varphi)$ dla inkluzji kwadratowej

Fig. 5. $H_n(\varphi)$ and $H_{qn}(\varphi)$ distributions for a square cavity



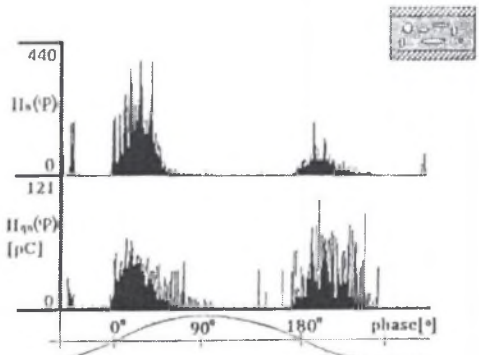
Rys. 6. Rozkłady $H_n(\varphi)$ i $H_{qn}(\varphi)$ dla wąskiej inkluzji

Fig. 6. $H_n(\varphi)$ and $H_{qn}(\varphi)$ distributions for a narrow cavity



Rys. 7. Rozkłady $H_n(\varphi)$ i $H_{qn}(\varphi)$ dla płaskiej inkluzji

Fig. 7. $H_n(\varphi)$ and $H_{qn}(\varphi)$ distributions for a flat cavity



Rys. 8. Rozkłady $H_n(\varphi)$ i $H_{qn}(\varphi)$ dla licznych inkluzji

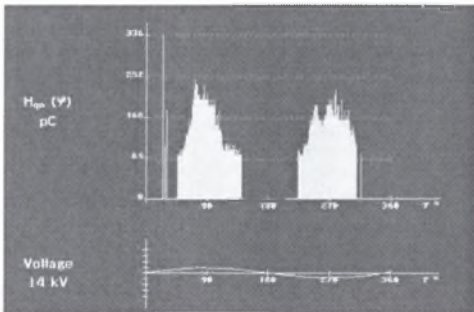
Fig. 8. $H_n(\varphi)$ and $H_{qn}(\varphi)$ distributions for multiple cavities

Występujące różnice są trudne do opisanego w sposób ilościowy i w tym przypadku okazują się przydatne wcześniej zdefiniowane parametry statystyczne opisujące cechy kształtu rozkładów. Po przeprowadzeniu pomiarów (od 8 do 23, zależnie od próbki) wyliczone zostały wartości średnie parametrów statystycznych dla każdego defektu. Skośność dla rozkładów fazowych $H_{qn}(\varphi)$ przyjmuje wartości dodatnie z wyjątkiem dielektryka z wąską inkluzją gazową (skośność bliska zero). Współczynnik skupienia wyliczony dla rozkładu $H_n(\varphi)$ przyjmuje

wartości ujemne tylko w przypadku próbki z licznymi inkluzjami gazowymi. Jak widać, zróżnicowanie wartości parametrów statystycznych może być wykorzystane w procesie identyfikacji poszczególnych defektów.

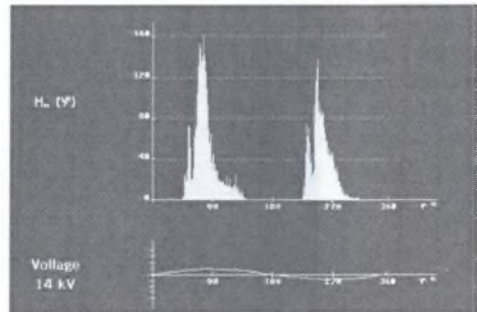
4. POMIAR WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W IZOLATORZE PRZEPUSTOWYM

Z uwagi na złożoność obiektów rzeczywistych i występujące w nich zakłócenia detekcja wnz komplikuje się. W celu uzupełnienia opisu wyładowań wewnętrznych przedstawiono wybrane rozkłady i przebiegi czasowe zarejestrowane w trakcie pomiarów wnz w izolatorze przepustowym zrealizowanych w ramach wykonywania projektu badawczego KBN przez zespół wykonawców z Instytutu Elektroenergetyki i Sterowania Układów. Pomiarzy zostały wykonane skomputeryzowanym detektorem TE-571. W obiekcie badanym stwierdzono występowanie wyładowań w inkluzjach gazowych, co zostało potwierdzone na podstawie analizy wykonanej z wykorzystaniem programu diagnostycznego TEAS. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono rozkłady fazowe $H_{qn}(\varphi)$ i $H_n(\varphi)$. Zakres fazowy tych rozkładów wynosi ok. 90° , jednak fazy zapłonu i gaśnięcia wyładowań odbiegają od modelowych, przedstawionych w punkcie 3. Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono wcześniej wspomniane rozkłady amplitudowo-fazowe intensywności wyładowań $H_n(\varphi, q)$ otrzymane na podstawie pomiarów wnz w izolatorze przepustowym. Są to w rzeczywistości dwie wersje tego samego rozkładu, różniące się jedynie sposobem przedstawienia wielkości: trójwymiarowa oraz dwuwymiarowa (z trzecim wymiarem w postaci intensywności wyładowań zakodowanej w kolorach). Parametry statystyczne stanowiące tzw. „odcisk wnz” (ang. fingerprint), jak również rozkłady amplitudowo-fazowe są podstawą do analizy wykonywanej przez program TEAS.



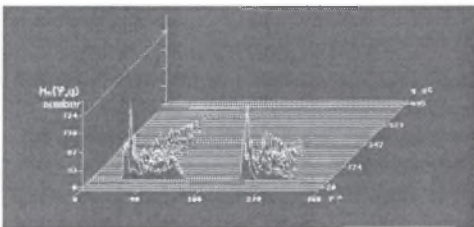
Rys. 9. $H_{qn}(\varphi)$: rozkład średniej wartości ładunku pozostającego wnz występujących w izolatorze przepust.

Fig. 9. $H_{qn}(\varphi)$: distribution of the average apparent charge for the bushing



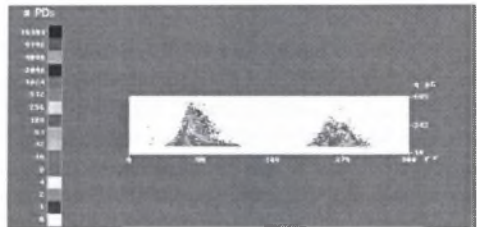
Rys. 10. $H_n(\varphi)$: rozkład liczby wnz występujących w izolatorze przepustowym

Fig. 10. $H_n(\varphi)$: distribution of the number of discharges for the bushing



Rys. 11. $H_n(\varphi, q)$: trójwymiarowy rozkład amplitudowo-fazowy intensywności wyładowań występujących w izolatorze przepustowym

Fig. 11. $H_n(\varphi, q)$: 3D phase distribution of the average apparent charge and number of discharges for bushing

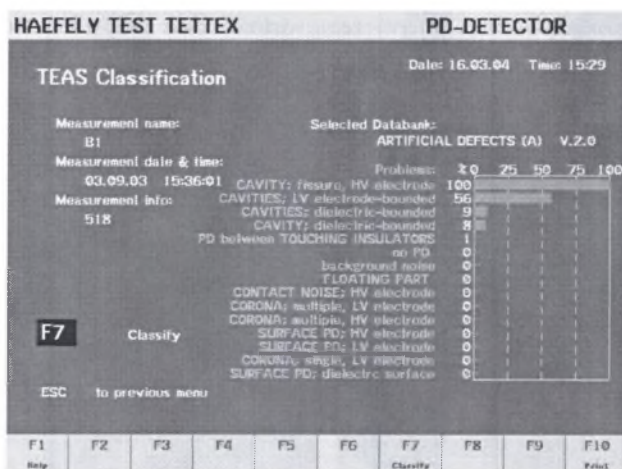


Rys. 12. $H_n(\varphi, q)$: rozkład amplitudowo-fazowy intensywności wyładowań występujących w izolatorze przepustowym (intensywność zakodowana w kolorach)

Fig. 12. $H_n(\varphi, q)$: phase distribution of the average apparent charge and number of discharges for the bushing. (PD intensity bands are associated with different colours)

5. PODSUMOWANIE

Zastosowanie skomputeryzowanych systemów pomiarowych, takich jak TE-571, pozwala na rejestrację obszernych danych dotyczących wnz, a co najważniejsze - przetworzenie ich do postaci, w której możliwa jest analiza sygnałów wnz. Wprowadzanie parametrów statystycznych i generacja „odcisków wnz” ułatwia klasyfikację defektów układów izolacyjnych. Ważne jest jednak posiadanie rozbudowanej biblioteki zawierającej dane wzorcowe. Przedstawiono kilka modelowych defektów, w których powstają wyładowania w wewnętrznych inkluzjach gazowych. Do podstawowych cech wspólnych wnz, występujących w inkluzjach gazowych, należy zaliczyć rozmiar zakresów fazowych wyładowań wynoszący zarówno dla dodatniej jak i ujemnej połowy okresu napięcia probierczego ok. 90° . Istotnymi cechami wnz w wewnętrznych inkluzjach gazowych są przedziały ich występowania ($0^{\circ} - 90^{\circ}$ i $180^{\circ} - 270^{\circ}$) oraz tendencja do podwyższania się napięcia zapłonu wyładowań w pierwszych minutach pomiaru. Różnice w kształtach rozkładów fazowych, średniej wartości ładunku pozornego $H_{qn}(\varphi)$ oraz liczby wyładowań $H_q(\varphi)$ dla badanych próbek, opisane przez parametry statystyczne, są podstawą do identyfikacji rodzajów defektów („odcisk wnz”).



Rys. 13. Wynik klasyfikacji defektów dla izolatora przepustowego

Fig. 13. Result of a classification for the bushing

LITERATURA

1. Florkowska B.: Wyładowania niezupełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia – analiza mechanizmów, form i obrazów. PAN-IPPT, Warszawa 1997.
2. Fruth B., Niemeyer L.: The importance of Statistical Characteristics of Partial Discharges Data, IEEE Trans. on El. I., Vol 27 No 1, Feb. 1992.
3. Gulski E., Kreuger F.H.: Computer-Aided Recognition of Discharge Sources, IEEE Trans. on El. I., Vol 27 No 1, Feb. 1992.
4. Gulski E.: Computer-Aided Registration and Analysis of Partial Discharge in High Voltage Insulation, IEE International Conference on PD, 28-30 Sep. 1993, Canterbury, UK.
5. Wang Y.: New Method of Measuring Statistical Distributions of PD Pulses, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol 102 No 5, Sep.-Oct. 1997.
6. PN-86/E-04066 Pomiary wyładowań niezupełnych.