

## WPŁYW HARMONICZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA NA OBRAZY WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

### *Influence of High Voltage Harmonics on Partial Discharge Patterns*

Marek FLORKOWSKI

ABB Corporate Research

**Streszczenie:** Diagnostyka układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych wysokiego napięcia polega na rejestracji impulsów wyładowań niezupełnych i ich wizualizacji w postaci obrazów fazowo-rozdzielczych. W artykule analizowano zmiany obrazów fazowo-rozdzielczych w zależności od odkształcenia napięcia zasilającego. Czystość widmową napięcia określano stosując współczynnik zawartości harmonicznych (THD), obliczany za pomocą algorytmu szybkiej transformaty Fouriera. Przedstawiono symulacje numeryczne, ilustrujące wpływ odkształcenia napięcia na mechanizm wyładowań niezupełnych. Przeanalizowane zostały różne przypadki napięcia probierczego odkształconego przez harmoniczne i powstających przy nim zbiorów impulsów wyładowań. Na podstawie pomiarów na fragmencie izolacji generatora, stosując zmianę zawartości harmonicznych w napięciu probierczym, wykazano, że THD nie jest jednoznacznym wskaźnikiem oceny. W celach diagnostycznych i monitoringowych obrazów wyładowań niezupełnych rekomendowane jest uwzględnienie widma napięcia probierczego.

*Słowa kluczowe:* wyładowania niezupełne, harmoniczne, diagnostyka  
*Keywords:* partial discharges, harmonics, diagnostics

### 1. WSTĘP

Wyładowania niezupełne należą do zespołu zjawisk w układach izolacyjnych urządzeń elektrycznych wysokiego napięcia, których oddziaływanie na struktury materiałów w konstrukcjach tych układów wywołuje określone reakcje fizyczne i chemiczne, prowadzące do pogorszenia parametrów dielektrycznych tych materiałów. Wobec dążenia do zapewnienia niezawodności urządzeń elektrycznych, przy równoczesnym podwyższaniu roboczego natężenia pola elektrycznego, zjawiska wyładowań niezupełnych stanowią istotny problem zarówno w konstrukcjach z materiałami jednorodnymi, np. w polietylenowych kablach elektroenergetycznych, jak i w niejednorodnych warstwowych, szcze-

**Summary:** Recording of partial discharge (PD) pulses and their visualization in a form of phase-resolved images is nowadays one of the main methods in diagnostics of high voltage insulating systems. This paper describes changes of the phase-resolved images under influence of the high voltage distortion. The changes of these images have been determined using total harmonic distortion (THD), calculated by means of Fast Fourier Transform (FFT). Numerical simulations, which illustrate influence of the voltage distortion on the partial discharge (PD) phenomenon are presented. Various cases of harmonic distortion of a test voltage have been analyzed along with corresponding PD phase distributions. Measurement results were obtained on a portion of a generator stator bar under test voltage with controlled harmonic content. The basic principles of harmonic analysis and the measurement setup are illustrated. It has been shown that THD could be only a coarse assessment factor. For practical analysis of the PD images, as the tool for insulation diagnostics and monitoring, the voltage frequency spectrum shall be taken into consideration.

gólnie w termoutwardzalnych układach izolacyjnych maszyn elektrycznych. Rozwijane są metody detekcji wyładowań niezupełnych, opracowywane są systemy ich monitorowania, dąży się do uzyskania możliwości automatycznego rozpoznawania form wyładowań oraz rodzajów defektów stanowiących ich źródła. Założeniem podstawowym tych metod jest rejestracja sygnałów generowanych w defektach struktury układów izolacyjnych, zdeterminowanych zmianami pola elektrycznego oraz tworzeniem się ładunków przestrzennych i powierzchniowych. Sygnały te wykazują charakter stochastyczny z powodu oddziaływania wielu czynników losowych.

Detekcja sygnałów wyładowań niezupełnych, szczególnie w warunkach przemysłowych, jest związana z podstawowymi problemami jakimi są:

- zakłócenia, które powodują, że stosunek sygnału użytecznego do szumu ma małą wartość,
- wpływ kształtu napięcia, ważny przy rejestracji sygnałów wyładowań z rozdzielczością fazową w okresie napięcia probierczego.

Problem drugi wynika z obecności harmonicznych napięcia zasilającego, przenikających do obwodu napięcia probierczego układu pomiarowego wyładowań niezupełnych. Harmoniczne napięcia probierczego, poprzez modulowanie jego kształtu, zmieniają warunki inicjowania wyładowań, wynikające z wartości chwilowych napięcia.

Uwzględnienie wpływu harmonicznych napięcia na wyładowania niezupełne ma zasadnicze znaczenie dla poprawnej interpretacji wyników pomiarów, a zatem oceny stanu badanego obiektu.

## 2. OBRAZY FAZOWO-ROZDZIELCZE WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

W diagnostyce układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych wysokiego napięcia jednym z podstawowych narzędzi ich oceny są obecnie obrazy fazowo-rozdzielcze wyładowań niezupełnych. Podstawę ich tworzenia stanowi rejestracja w czasie rzeczywistym impulsów prądowych, pochodzących z różnych źródeł w poddawanym ocenie układzie izolacyjnym [7]. W wyniku takiej rejestracji w przyjętej liczbie okresów napięcia probierczego otrzymuje się informacje o amplitudzie impulsów, ich położeniu fazowym w okresie napięcia i liczbie w przyjętej jednostce czasu. Wielkości te przetworzone do postaci rozkładów: ładunek  $q$  – faza  $\varphi$  – liczba  $n$  tworzą tzw. obrazy fazowo-rozdzielcze  $D(q, \varphi, n)$ , w których dla celów wizualizacji liczba impulsów jest kodowana w postaci palety kolorów lub stopni szarości. Impulsy wyładowań zawierają się — zależnie od ich mechanizmu — w pewnych zakresach fazowych w każdej połowie okresu, przy czym są to charakterystyczne zakresy fazowe dla wyładowań w wewnętrznych inkluzjach gazowych, wyładowań powierzchniowych, wyładowań typu ulotowego i innych, dodatkowo jeszcze zmieniających się w procesach degradacji pod wpływem warunków eksploatacyjnych. Liczne prace poświęcone są zagadnieniu korelacji form wyładowań i ich skutków w strukturze wewnętrznej układów izolacyjnych z opisem uzyskanym w postaci obrazów fazowo-rozdzielczych rejestrowanych w odpowiednim układzie pomiarowym [np. 1, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 20]. Kształt obrazów fazowych nie powinien zależeć od innych czynników, nie związanych bezpośrednio ze stanem układu izolacyjnego. Do takich czynników należy np. napięcie probiercze, przy którym wyznaczane są obrazy fazowe wyładowań. Na ogół zakłada się, że przebieg tego napięcia jest sinusoidalny. Takie założenie przyjmuje się w badaniach modelowych, które są podstawą identyfikacji obrazów fazowych wyznaczanych w rzeczywistych układach izolacyjnych. Również w badaniach wyładowań niezupełnych w warunkach przemysłowych zakłada się zwykle, że napięcie probiercze ma przebieg sinusoidalny i przy takim założeniu oblicza się parametry statystyczne rozkładów amplitudowych i fazowych wyładowań, a następnie, korzystając z odpowiednich wzorców, dokonuje identyfikacji form wyładowań [np. 12, 20]. W pewnych warunkach postępowanie powyższe może być jednak obarczone znacznym błędem, a interpretacja wy-

ników pomiarów może napotkać znaczne trudności. Chodzi o przypadki badań w warunkach, w których napięcie probiercze jest odkształcone z powodu obecności wyższych harmonicznych. W konsekwencji powoduje to zniekształcenie rozkładów fazowych i amplitudowych wyładowań i wpływa na wartości opisujących je parametrów [30]. Ten problem — wpływu harmonicznych napięcia probierczego na postać rozkładów i obrazów fazowych wyładowań — jest scharakteryzowany w niniejszym artykule. W pierwszej części podano wyniki symulacji przebiegów napięć w modelowych źródłach wyładowań i generowanych przez nie zbiorów impulsów, gdy napięcie probiercze jest odkształcone, a całkowity współczynnik zawartości harmonicznych THD (ang. *Total Harmonic Distortion*) ma różne wartości. W drugiej części artykułu przedstawiono wyniki badań na obiekcie rzeczywistym i zarejestrowane obrazy fazowo-rozdzielcze przy napięciu odkształconym przez wyższe harmoniczne.

Harmoniczne napięcia mają podstawowe znaczenie w interpretacji wyników monitorowania układów izolacyjnych średnich i wysokich napięć w systemach pomiarowych wyładowań niezupełnych. Obecność harmonicznych jest efektem występowania odbiorów nieliniowych, zjawisk rezonansowych oraz przenoszenia zaburzeń harmonicznych w sieciach przesyłowych i rozdzielczych [18, 24, 26, 28, 29]. Są to zarówno urządzenia wielkich mocy, np. przekształtniki energoelektroniczne zasilające napędy, piece łukowe itp., jak i odbiorniki małej mocy w postaci energooszczędnych wyładowczych źródeł światła, zasilaczy komputerowych itp. Częściową kompensację powyższych zjawisk w systemach elektroenergetycznych umożliwiają filtry wyższych harmonicznych, zwykle: 3., 5. i 7. [23]. Istnieją normy i zalecenia odnośnie do limitów długoczasowych zawartości harmonicznych w sieciach [13, 19], np. norma IEEE 519 [27], dopuszczająca THD dla napięcia na poziomie 1,5% w sieciach wysokiego napięcia i 2,5–5,0% w sieciach średniego napięcia. Zagadnienie to może być dodatkowo utrudnione zmiennością harmonicznych w czasie i prowadzi do analizy sygnałów niestacjonarnych [16, 25].

## 3. SYMULACJA PRZEBIEGÓW CZASOWYCH SYGNAŁÓW WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH PRZY NAPIĘCIU ODKSZTAŁCONYM

Impulsowy charakter wyładowań niezupełnych jest efektem neutralizacji ładunków przestrzennych i/lub powierzchniowych w defektach zawierających fazę gazową w strukturze dielektryków. Mechanizmy tych zjawisk są przedmiotem analiz teoretycznych i badań eksperymentalnych, szczególnie w odniesieniu do polimerów syntetycznych, stanowiących obecnie główne składniki układów izolacyjnych. W podstawowym modelu tych zjawisk źródła wyładowań reprezentują elementarne pojemności, do których odnoszą się impulsy napięciowe o wartościach w zakresie napięć zapłonu  $U_{ci}$  i gaśnięcia wyładowań  $U_{ce}$  na przebiegu napięcia  $U_c$  w obecności wyładowań (rys. 1a).

Z analizy podstaw fizykalnych powstawania impulsów napięciowych lub prądowych w źródłach wyładowań wynika uzasadnienie lokalizacji grup impulsów w przedziałach fazowych  $z_\varphi$  (rys. 1b) w okresie napięcia probierczego [6]. W deterministycznym modelu mechanizmu wyładowań z pojedynczym ich źródłem, reprezentowanym przez układ trzech po-

jemności w tzw. modelu „a-b-c” [3, 14, 22], przyjmuje się generowanie w układzie pomiarowym impulsów o stałej amplitudzie w kolejnych okresach napięcia. Model ten jest wystarczający do pokazania wpływu kształtu napięcia probierczego na obrazy fazowe wyładowań na podstawie obliczeń numerycznych. Modelowanie mechanizmu wyładowań niezupełnych dla przyjętych parametrów geometrycznych źródła wyładowań prowadzi do wyznaczenia (rys. 1):

- odkształconych przebiegów napięć  $U_c'$  w źródle wyładowań w ich obecności,
- rozkładów fazowych impulsów wyładowań, tj. rozkładów ich ładunków  $q = f(\varphi)$  lub liczby wyładowań  $n = f(\varphi)$  w okresie napięcia probierczego,
- zależności całkowitej liczby impulsów w okresie od napięcia,  $N = f(U)$ .

O przebiegu napięcia  $U_c'$  decyduje współczynnik  $\xi = U_{ce} / U_{ci}$ , gdzie:  $U_{ci}$  — napięcie zapłonu wyładowań,  $U_{ce}$  — napięcie gaśnięcia. Wartość napięcia  $U_{ci}$  zależy od wymiarów geometrycznych źródła wyładowań, ciśnienia i innych czynników. Liczbę impulsów wyładowań w każdej połowie okresu napięcia określa wyrażenie [7]:

$$N^{\pm} = 2 \frac{\frac{U_{cm}}{U_{ci}} - \xi}{1 - \xi} = 2 \frac{k - \xi}{1 - \xi} \quad (1)$$

gdzie:

$U_{cm}$  — wartość szczytowa napięcia w źródle wyładowań,  
 $k = U_{cm} / U_{ci}$ .

W obliczeniach przyjęto model z pojedynczym źródłem wyładowań w postaci płaskiej inkluzji gazowej o grubości  $100\mu\text{m}$ , przy założeniach:  $\xi = 0,9$ ,  $k > 1$ .

## A. Napięcie sinusoidalne

Przykłady przebiegów napięć  $U_c'$  w źródle wyładowań przy różnych wartościach napięcia probierczego  $U_c$ , np.  $k = 1,4$  i  $k = 2,0$ , przedstawiono na rysunku 1a i c, a rozkłady fazowe impulsów na rysunku 1b i d.

## B. Napięcie odkształcone

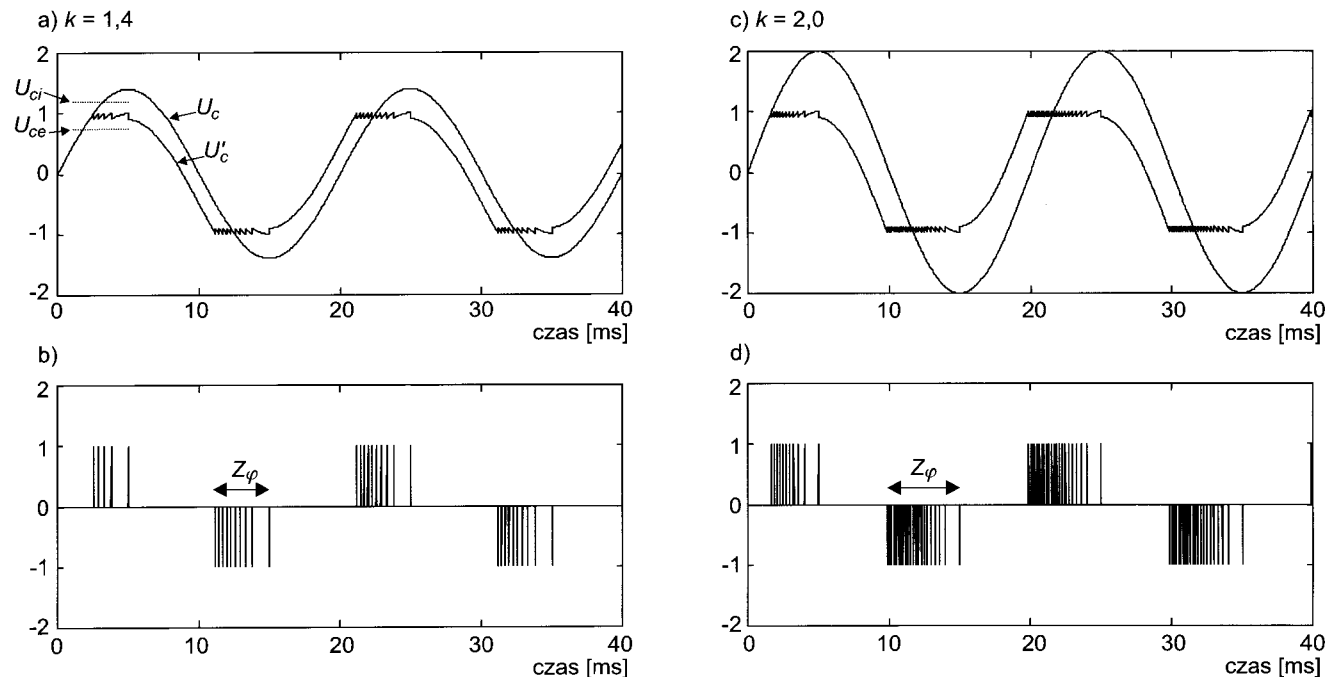
W modelowaniu mechanizmu wyładowań niezupełnych przy napięciu odkształconym przez wyższe harmoniczne przyjęto współczynnik zawartości harmonicznych THD, ilustrujący „czystość” widmową napięcia probierczego [4]:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \quad (2)$$

gdzie:  $U_1$  — amplituda podstawowej harmonicznej  
 $U_h$  — amplituda harmonicznej rzędu  $h$ .

Zawartość harmonicznych może zostać oszacowana poprzez porównanie w widmie sygnału wartości drugiej, trzeciej, czwartej... itd. harmonicznej z amplitudą sygnału podstawowego. Wartość ta jest zwykle wyrażana jako stosunek w %, ppm lub dB [15, 17]. Dla zilustrowania wpływu harmonicznych napięcia zostały przeprowadzone symulacje numeryczne na modelu z pojedynczym źródłem wyładowań, podobnie jak w przypadku napięcia sinusoidalnego. Uwzględniono w nich:

- zawartość harmonicznych dowolnego rzędu, np. 3., 5. i 11.,
- wartość współczynnika THD,



Rys. 1. Napięcia w źródłach wyładowań  $U_c'$  przy sinusoidalnym napięciu zasilającym  $U_c$  dla  $\xi = 0,9$ : a)  $k = 1,4$ ; c)  $k = 2,0$ . Rozkłady fazowe impulsów wyładowań (amplituda) dla: b)  $k = 1,4$ ; d)  $k = 2,0$ .

- przesunięcie fazowe harmonicznyc  $\varphi_h$  w stosunku do napięcia o częstotliwości 50 Hz, np.  $\varphi_h=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ ,
- równoczesne występowanie kilku harmonicznyc,
- wartość współczynnika  $k$ , przy czym przyjęto  $k = 1,4$  i  $k = 2,0$ ,
- wartość współczynnika  $\xi = 0,9$ .

Przedstawione przykłady dotyczą przypadków, gdy występuje:

- 3., 5. lub 11. harmoniczna, THD = 11%,  $k = 1,4$  i  $k = 2,0$ ;  $\varphi_h = 0^\circ$ ,
3. harmoniczna, THD = 10%,  $k = 1,4, \varphi_h = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ ,
3. i 5. harmoniczna, THD = 14,1%,  $\varphi_h = 0^\circ, k = 1,4$  i  $k = 2,0$ .

Wartości współczynnika THD świadomie podwyższono nieco ponad maksymalny poziom kompatybilności elektromagnetycznej określony w EN 6100-2-4 [4], dla uzyskania bardziej wyraźnego efektu zniekształcenia napięcia. Przebiegi napięć w źródłach wyładowań oraz rozkłady fazowe impulsów dla powyższych przypadków przedstawiono na rysunkach 2–4. Na rysunkach tych oznaczono  $z_\varphi$  jako zakresy fazowe w okresie, w których występują zbiory impulsów wyładowań.

Przykłady przebiegów napięć  $U_c, U_c'$  i rozkładów fazowych w obecności 3. harmonicznej przy różnych wartościach kąta przesunięcia fazowego harmonicznyc  $\varphi_h$  przedstawia rysunek 3.

Przykłady przebiegów napięć  $U_c, U_c'$  i rozkładów fazowych przy równoczesnym występowaniu 3. i 5. harmonicznej przedstawia rysunek 4.

Podstawowym parametrem oceny wyładowań niezpełnyc w zdefiniowanyc warunkach ich występowania jest całkowita liczba impulsów  $N$  w okresie napięcia probierczego. Jego odkształcenie przez harmoniczne od przebiegu sinusoidalnego ma znaczny wpływ na liczbę impulsów wyładowań, powodując zarówno jej zmniejszenie, jak i zwiększenie (tabela 1, rys. 5). Jest to spowodowane zmianą nachylenia  $dU_c/dt$  w niektórych przedziałach fazowych, co wpływa na różny rozkład fazowy impulsów w okresie oraz ich liczbę w tych przedziałach.

Lokalne minimum w przebiegu napięcia może nawet zatrzymać występowanie wyładowań (w porównaniu z wyładowaniami dla napięcia nie odkształconego), co potwierdzają wyniki pomiarów (rys. 11a i b). Konsekwencją odkształcenia napięcia probierczego jest również niejednakowa liczba wyładowań dla dodatniego i ujemnego jego półokresu. Można zaobserwować, że zniekształcenie napięcia i zmniejszenie jego nachylenia ( $dU_c/dt$ ) w niektórych przedziałach fazowych powoduje zmiany sekwencji czasowej impulsów wyładowań w porównaniu z ich położeniem fazowym przy napięciu nie odkształconym (rys. 6).

#### 4. ANALIZA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA NAPIĘĆ ODKSZTAŁCONYCH

Gdy napięcie probiercze zawiera wyższe harmoniczne, wówczas zgodnie z teorią szeregów Fouriera jego przebieg wyraża wzór [21]:

$$U(t) = A_0 \sin(2\pi \cdot f_0 t) + \sum_{n=2}^{\infty} [A_n \sin(2\pi \cdot n f_0 \cdot t) + B_n \cos(2\pi \cdot n f_0 \cdot t)] \quad (3)$$

gdzie:

- $A_0$  — amplituda składowej podstawowej,
- $f_0$  — częstotliwość składowej podstawowej,
- $A_n, B_n$  — amplituda harmonicznyc,
- $n$  — rząd harmonicznej.

W analizie widmowej dokonuje się dekompozycji sygnału na składniki częstotliwościowe, wykorzystując algorytm szybkiej transformaty Fouriera (ang. *Fast Fourier Transform* — FFT) [2]. Współczynnik zawartości harmonicznyc (THD) jest obliczany jako suma składnikó transformaty FFT. Należy przy tym zaznaczyć, że jest to jedynie globalny parametr oceny sygnału, nie odzwierciedlający możliwych kombinacji harmonicznyc. Ponadto, dla pojedynczej harmonicznej oprócz amplitudy istotne jest jej położenie fazowe w stosunku do składnika podstawowego. Możliwe są zatem przypadki, gdy współczynniki THD mają te same wartości, lecz są one efektem różnyc zbioró harmonicznyc. Rozpatrzmy przypadki tyc samyc wartości THD dla różnyc kształtów napięcia probierczego.

a) Napięcie probiercze jest wyrażone jako:

$$U(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t) + B_n \sin(2\pi n f_0 t) \quad (4)$$

gdzie obecna jest  $n$ -ta harmoniczna o amplitudzie  $B_n$ . Współczynnik zawartości harmonicznyc wynosi w tym przypadku

$$\text{THD}_a = B_n / A_0 \quad (5)$$

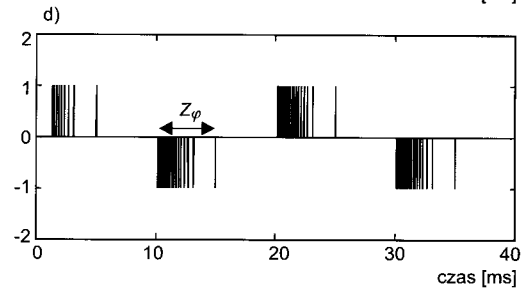
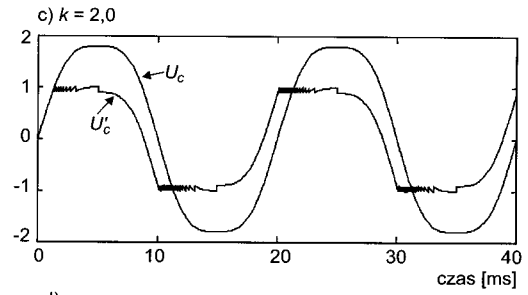
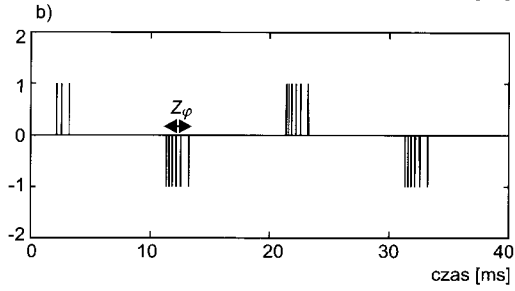
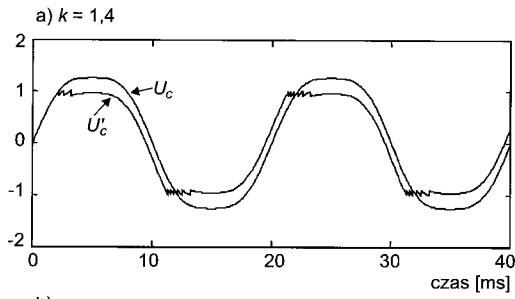
b) Napięcie probiercze jest wyrażone jak w p. a), lecz występuje przesunięcie fazowe  $\varphi_0$   $n$ -tej harmonicznej w stosunku do częstotliwości podstawowej:

$$U(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t) + B_n \sin(2\pi n f_0 t + \varphi_0) \quad (6)$$

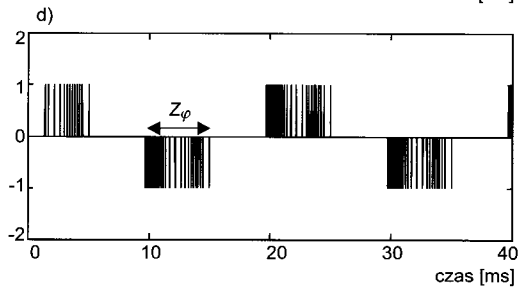
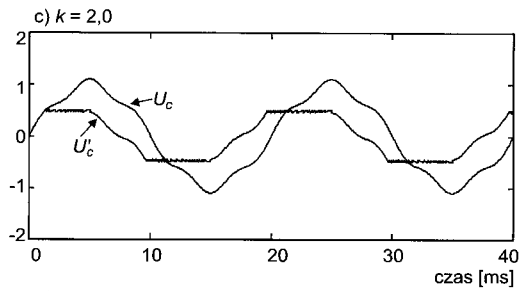
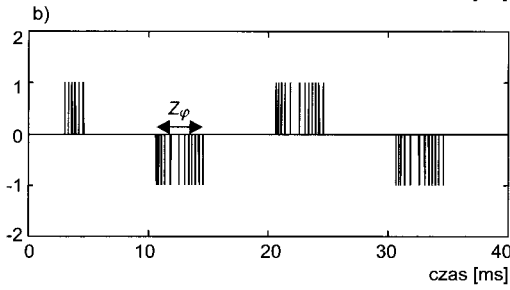
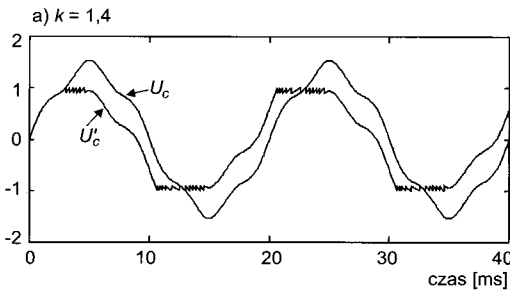
Tabela 1.

THD [%]	$\sin \omega t$	3H 10%	5H 10%	3H + 5H (10%)	11H 11%
	0	10	10	14,1	11
$k = 1,2$	12	4	16	12	12
$k = 1,4$	20	12	24	20	24
$k = 1,8$	36	28	40	36	40
$k = 2,0$	44	36	52	44	48

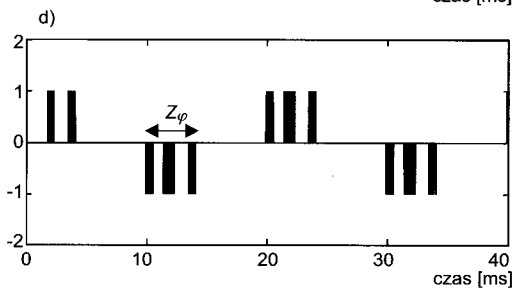
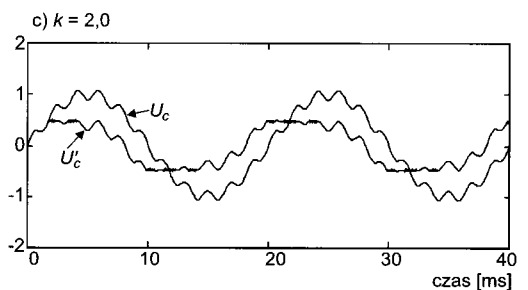
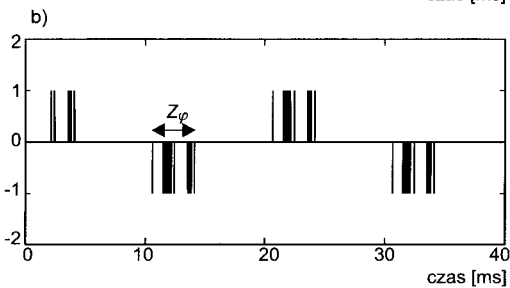
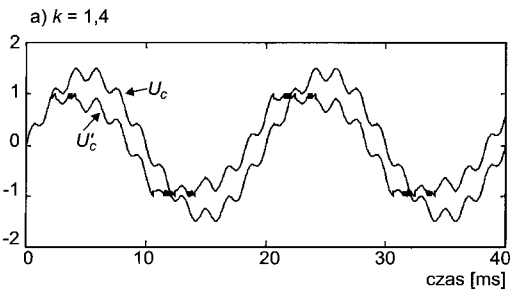
3. harmoniczna, THD = 10%,  $\varphi_h = 0^\circ$



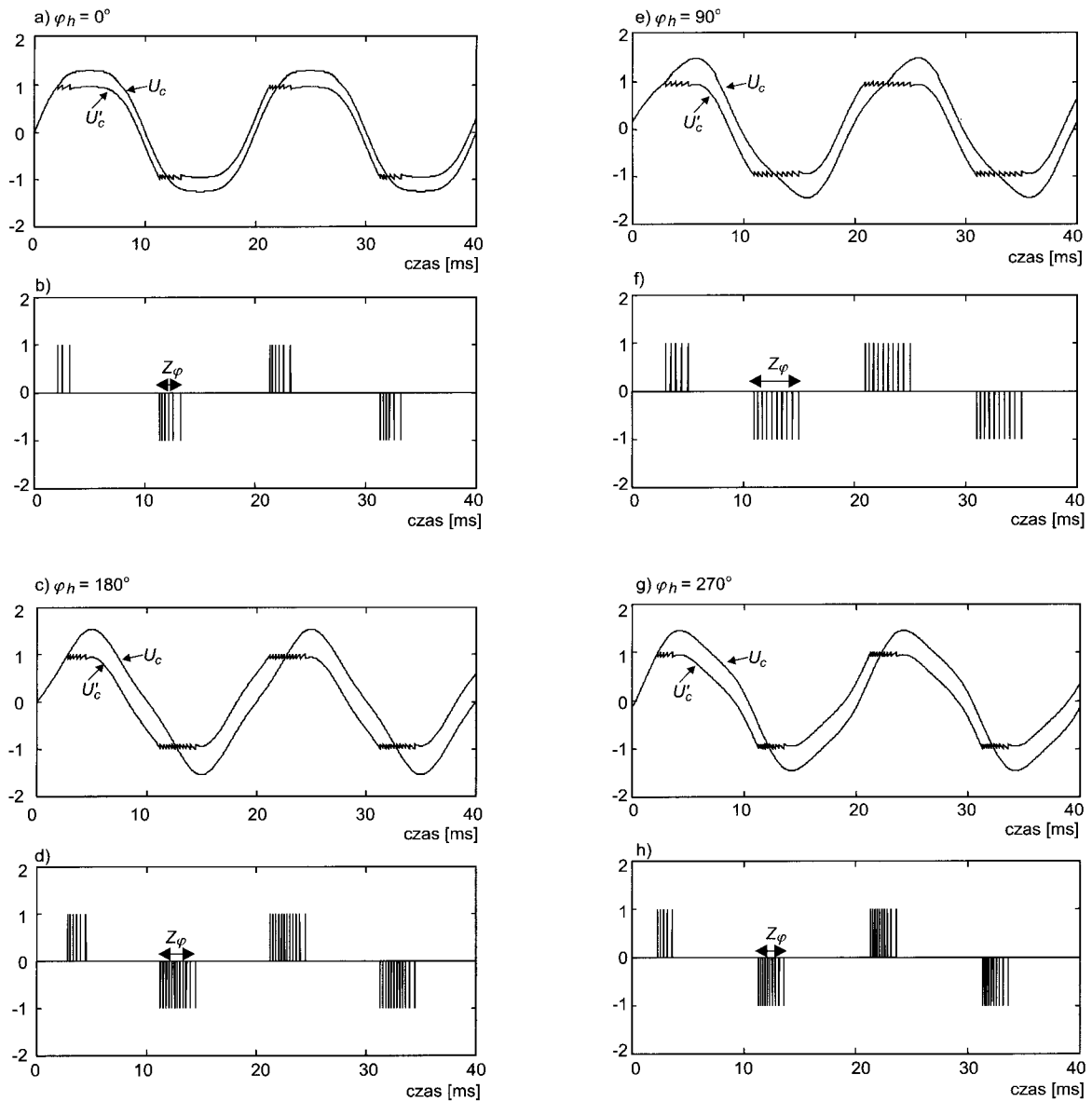
5. harmoniczna, THD = 10%,  $\varphi_h = 0^\circ$



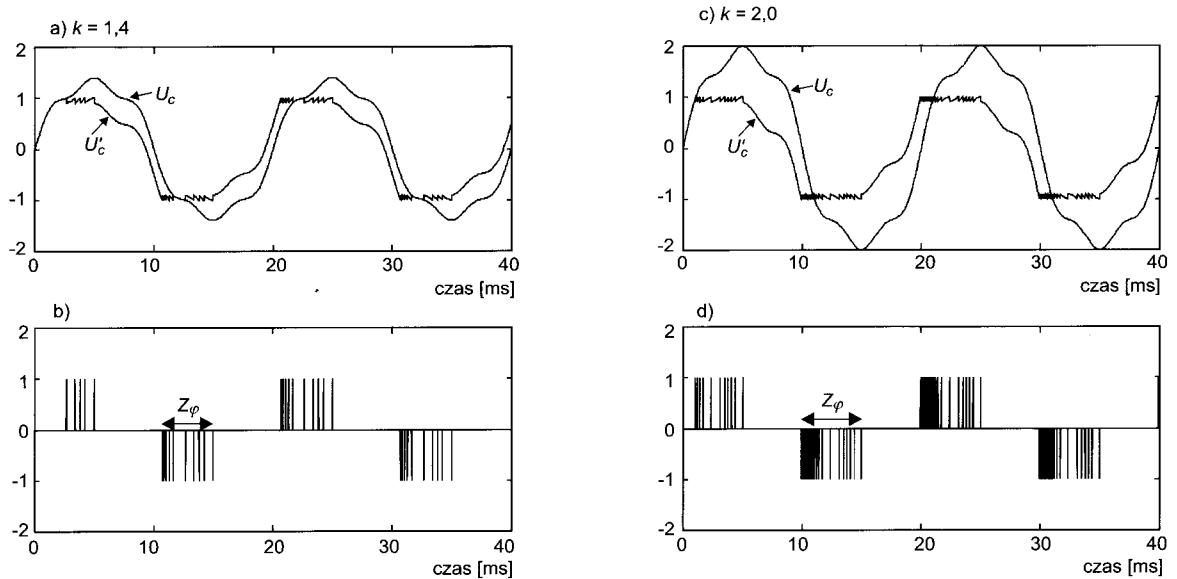
11. harmoniczna, THD = 11%,  $\varphi_h = 0^\circ$



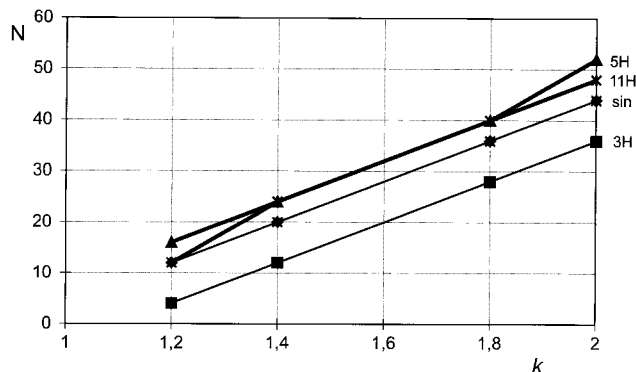
Rys. 2. Napięcia w źródłach wyładowań  $U_c'$  przy odkształconym napięciu zasilającym  $U_c$  przez 3., 5. i 11. harmoniczną, dla  $\xi = 0,9$ ; a, b)  $k = 1,4$  c, d)  $k = 2,0$



Rys. 3. Napięcia w źródłach wyładowań  $U_c'$  przy odkształconym napięciu zasilającym  $U_c$  przez 3. harmoniczną dla THD = 10% oraz rozkłady fazowe przy różnych kątach  $\varphi_h = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  ( $\xi = 0,9; k = 1,4$ )



Rys. 4. Napięcia w źródłach wyładowań  $U_c'$  przy napięciu zasilającym  $U_c$  odkształconym przez 3. i 5. harmoniczną: 3H = 10%, 5H = 10%, THD = 14,1%,  $\varphi_h = 0^\circ, \xi = 0,9$ ; a, b)  $k = 1,4$  c, d)  $k = 2,0$



Rys. 5. Zależność całkowitej liczby wylądowań od współczynnika  $k = U_{cm} / U_{ci}$

Współczynnik zawartości harmoniczych wynosi  $THD_b = B_n / A_0$  oraz  $THD_b = THD_a$ .

- c) Napięcia probiercze zawiera dwa składniki harmoniczych ( $n_1 f_0$  oraz  $n_2 f_0$ ) o amplitudach  $B_{n1}$  i  $B_{n2}$  odpowiednio:

$$U(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t) + B_{n1} \sin(2\pi n_1 f_0 t) + B_{n2} \sin(2\pi n_2 f_0 t) \quad (7)$$

Współczynnik zawartości harmoniczych wynosi:

$$THD_c = \sqrt{(B_{n1}^2 + B_{n2}^2) / A_0^2} \quad (8)$$

Amplitudy harmoniczych  $B_{n1}$  i  $B_{n2}$  mogą mieć takie wartości, że  $THD_a = THD_b = THD_c$ . W badaniach modelowych można świadomie zastosować takie działanie.

Z powyższego faktu wynika ograniczone zastosowanie THD jako wskaźnika kształtu napięcia probierczego i trudność jednoznacznej interpretacji wpływu harmoniczych na mechanizm wylądowań niezupełnych. Wskaźnik ten może być

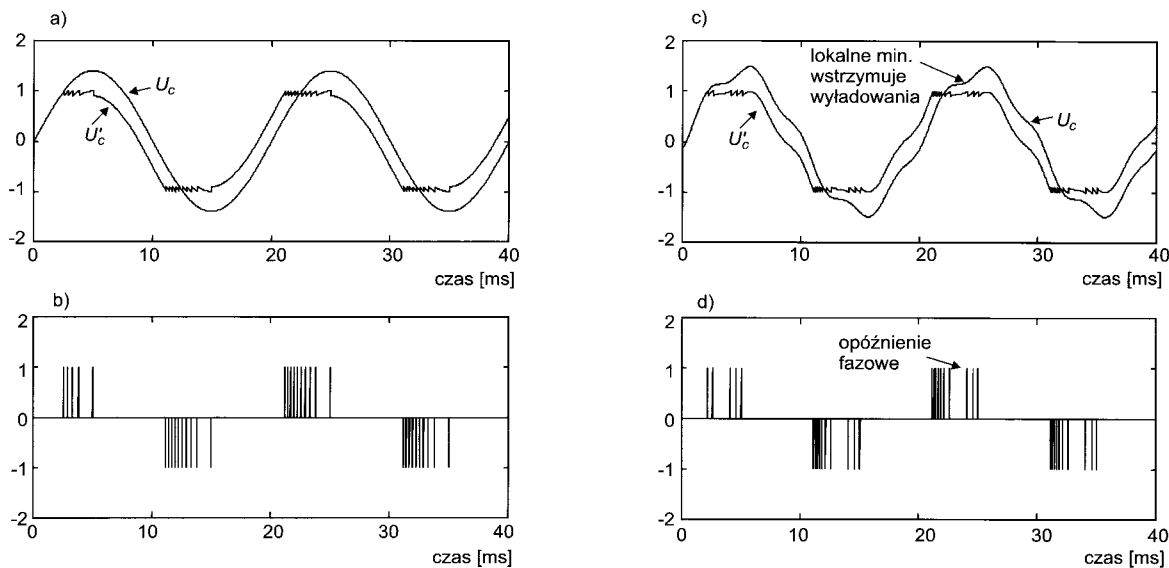
zatem tylko parametrem orientacyjnym i dla rzeczywistych zastosowań porównawczych należy brać pod uwagę pełne widmo sygnału napięcia probierczego.

W monitorowaniu wylądowań niezupełnych ważna jest również informacja o czasowej zmienności napięcia probierczego, której nie dostarcza transformata FFT. Otrzymanie tej informacji jest możliwe po łącznej czasowo-częstotliwościowej analizie, przy czym najczęściej stosowana jest krótko czasowa transformata Fouriera (ang. Short-Time Fourier Transform — STFT) i spektrogram Gabora [21]. Dobór typu i szerokości okna analizującego determinują rozdzielczość STFT. Szerokie okno gwarantuje dobrą rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości, natomiast małą w dziedzinie czasu. Odwrotnie — wąskie okno zapewnia dobrą rozdzielczość w dziedzinie czasu, natomiast słabą w dziedzinie częstotliwości. Wyniki prezentowane w dalszej części artykułu zostały otrzymane dla okna Hamminga.

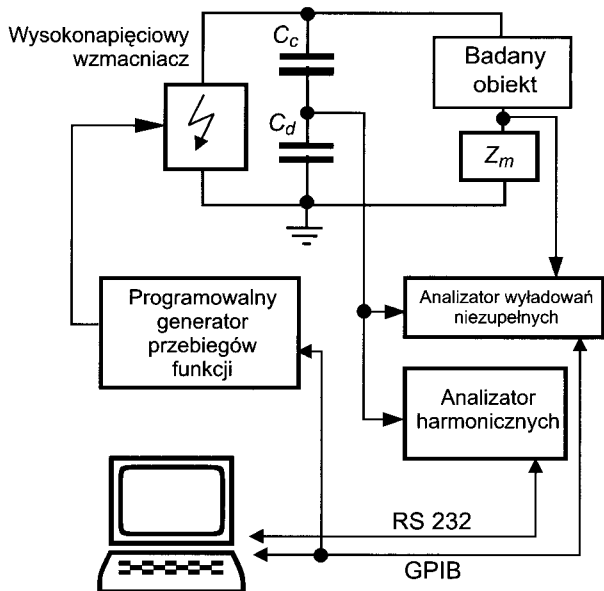
## 5. BADANIA WYLĄDOWAŃ NIEZUPEŁNYCH PRZY NAPIĘCIU ODKSZTAŁCONYM PRZEZ WYŻSZE HARMONICZNE

Obrazy fazowo-rozdzielcze wylądowań niezupełnych otrzymywane w wyniku rejestracji cyfrowej uwzględniają rzeczywisty, statystyczny charakter zbioru impulsów generowanych w układach izolacyjnych. W diagnostyce wysokonapięciowej wykorzystuje się obrazy fazowo-rozdzielcze wylądowań do oceny ich stanu po produkcji; dąży się do stworzenia takiej możliwości w systemach rejestracji *on-line*. Diagnoza o ich stanie wynika z porównania obrazów rzeczywistych i wzorcowych, które tworzone są w układach modelowych, reprezentujących typowe defekty w układach izolacyjnych. Podstawowym problemem w takim postępowaniu jest rozpoznanie czynników mających wpływ na postać obrazu fazowo-rozdzielczego i ich eliminowanie.

Szczególne znaczenie dla właściwej interpretacji obrazów fazowych ma przebieg czasowy napięcia probierczego, a więc



Rys. 6. Porównanie napięć w źródłach wylądowań  $U_c'$  i rozkładów fazowych impulsów: a), b) napięcie sinusoidalne, c), d) obecność 5. harmonicznej,  $THD = 10\%$ .



Rys. 7. Schemat blokowy systemu pomiarowego do badań wpływu harmonicznych napięcia probierczego na obrazy wyładowań niezupełnych:  $Z_m$  — impedancja pomiarowa,  $C_c$ ,  $C_d$  — dzielnik napięcia

obecność harmonicznych. Problem ten zostanie zilustrowany na podstawie wyników badań przy napięciu sinusoidalnym 50Hz, odkształconym przez wyższe harmoniczne i przy zmiennym THD. W badaniach stosowano elementy uzwojenia generatora na napięciu 15kV z izolacją polimerową termoutwardzalną.

Wyznaczono obrazy fazowe wyładowań  $D(q, \varphi, n)$ , tj. zależność liczby wyładowań  $N$  od fazy napięcia probierczego  $\varphi$  i ładunku pozornego  $q$ , rozkłady fazowe liczby wyładowań  $D(n, \varphi)$  oraz widmo napięcia probierczego. W badaniach zastosowano analizator harmonicznych, model HA3217, z pakietem oprogramowania stosowanym do analizy widmowej oraz analizator wyładowań niezupełnych (PDA) sterowany z komputera poprzez interfejs GPIB $\leftrightarrow$ PCMCIA [8]. Napięcie probiercze zapewniał wysokonapięciowy wzmacniacz sterowany programowalnym generatorem przebiegów funkcji. Parametry napięcia wraz z żadaną zawartością harmonicznych w jego przebiegu były zadawane z komputera. Odkształcenia harmoniczne napięcia probierczego należy przy tym odróżnić od zniekształceń sygnału synchronizacji, wykorzystywanego w fazowo rozdzielczych systemach akwizycji wyładowań w czasie rzeczywistym. Schemat blokowy systemu pomiarowego przedstawiono na rysunku 7.

Wyładowania niezupełne rejestrowano w jednakowej skali ładunku — przy czym liczbę wyładowań określały stopnie szarości lub paleta kolorów — a następnie wizualizowano je jako obrazy na płaszczyźnie fazowo-rozdzielczej. Aby uniknąć rozmycia widmowego, zastosowano adaptacyjną metodę doboru częstotliwości próbkowania, mianowicie, do częstotliwości napięcia probierczego  $f_c$  dostrojono częstotliwość próbkowania  $f_s$  systemu akwizycji danych analizatora harmonicznych, zapewniając całkowitą wielokrotność okresów tego napięcia w rejestrowanym bloku danych:

$$R f_c = R_c f_s \quad (9)$$

gdzie  $R$  jest długością zapisu, a  $R_c$  liczbą okresów napięcia w zapisie.

Analizę widmową napięcia probierczego wykonywano w zakresie do 1600 Hz, czyli do 32. harmonicznej, natomiast liczba harmonicznych brana pod uwagę przy obliczaniu THD może być zmienna i zwykle uwzględnienie pierwszych piętnastu składników jest wystarczające. THD obliczano za pomocą algorytmu szybkiej transformaty Fouriera (FFT) sumując parzyste i nieparzyste składniki analizy widmowej. Długość zapisu w obliczeniach za pomocą FFT wynosiła 2048 punktów. Na prezentowanych wykresach widmowych oś odciętych odpowiada częstotliwości, a rzędnych zlogarytmowanej amplitudzie w procentach.

W badaniach obserwowano wpływ poszczególnych harmonicznych — parzystych i nieparzystych, aż do 15., i ich superpozycji, na obrazy fazowo-rozdzielcze i rozkłady fazowe liczby wyładowań. Dla przykładu przedstawiono niżej kilka wybranych wyników, a mianowicie:

- a) „czyste” napięcie probiercze (THD = 0,7%) — rys. 8
- b) obecność 3. harmonicznej THD = 17% — rys. 9
- c) obecność 5. harmonicznej THD = 11% — rys. 10
- d) obecność 11. harmonicznej THD = 11% — rys. 11
- e) superpozycja 3. i 5. harmonicznej THD = 17% — rys. 12.

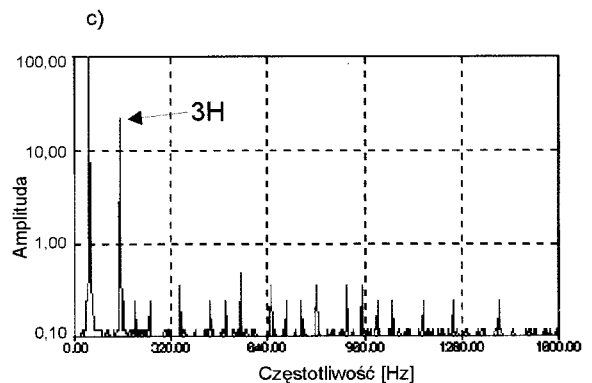
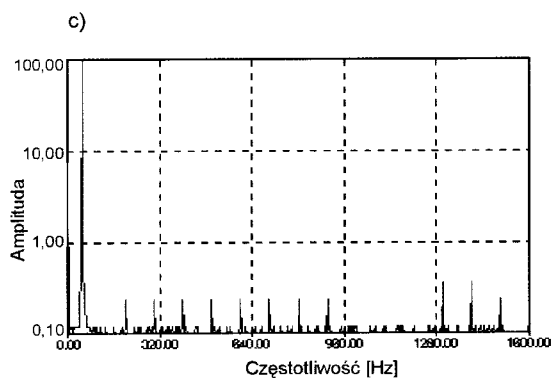
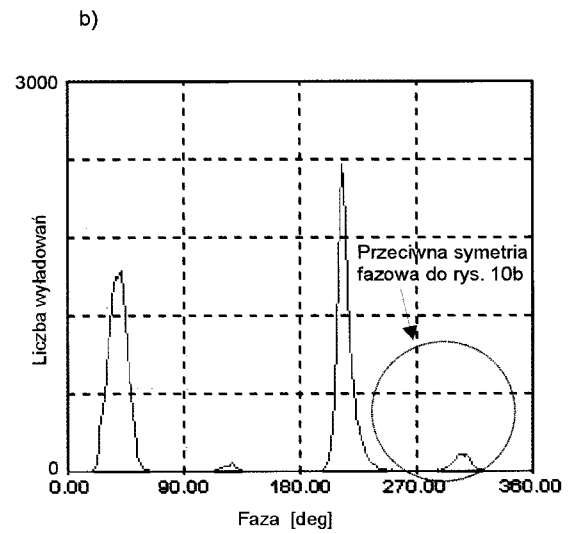
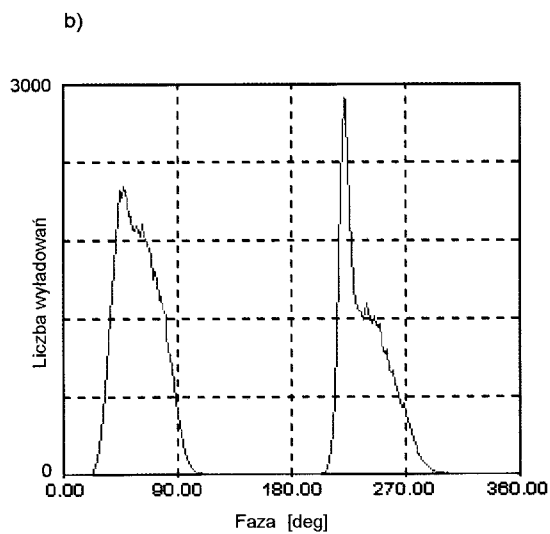
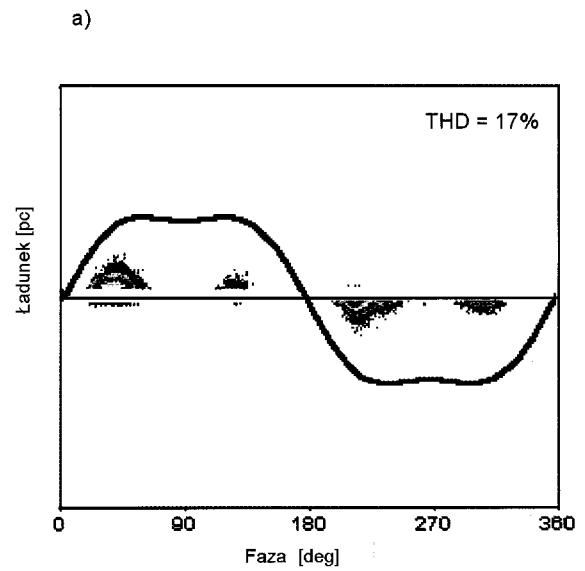
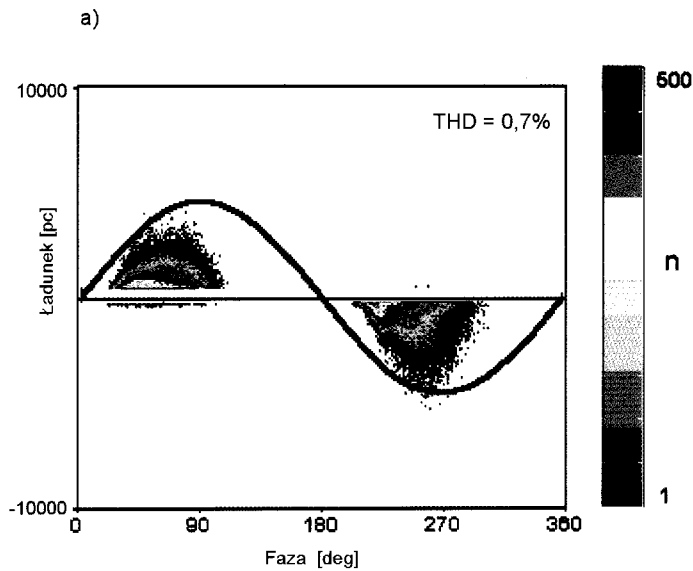
Wyniki pomiarów przedstawione na rysunku 8, zarejestrowane przy „prawie czystym widmowo” napięciu probierczym, tzn. THD = 0,7%, dają obraz traktowany jako referencyjny.

Obecność 3. harmonicznej przy THD = 17% (rys. 9) oraz 5. harmonicznej przy THD = 11% (rys. 10) powoduje w porównaniu z wynikami referencyjnymi:

- zmianę ładunku maksymalnego: w obecności 3. harmonicznej — zmniejszenie, a w obecności 5. i 11. harmonicznej — wyraźny wzrost,
- rozszczępienie obrazów i rozkładów fazowych w połowach okresu, szczególnie w obecności 3. i 11. harmonicznej,
- zmiany całkowitej liczby impulsów,
- zmianę symetrii obrazów i rozkładów fazowych w powyższych przypadkach,
- pojawienie się „martwych” przedziałów fazowych, w których brak impulsów wyładowań, występujących przy napięciu sinusoidalnym.

Powyższe przykłady uwiadcniają, że współczynnik THD może być traktowany jedynie jako bardzo ogólny wskaźnik oceny wpływu harmonicznych. Np. wartość THD=11% w obydwu przypadkach (rys. 10 i rys. 11) jest wynikiem wpływu różnych frakcji harmonicznych i w związku z tym niezbędne jest wyznaczenie widma napięcia probierczego, zawartość harmonicznych w napięciu probierczym jest bowiem dodatkowym zewnętrznym czynnikiem, który determinuje warunki fizyczne występowania wyładowań niezupełnych w ich źródłach w układach izolacyjnych wysokiego napięcia. Zniekształcenie napięcia probierczego wpływa w efekcie na liczbę wyładowań w okresie [1], ładunek pojedynczego wyładowania i położenie fazowe impulsów w okresie. Mechanizm fluktuacji obrazów fazowych jest wywołany lokalnym zmniejszaniem się lub zwiększaniem szybkości narastania napięcia, przy czym ten trend określa kombinacja harmonicznych (parzyste i nieparzyste składniki), jak również ich amplituda. Wystąpienie lokalnego minimum napięcia probierczego może doprowadzić nawet do zatrzymania występowania wyładowań w pewnych zakresach fazowych. Należy przy tym zauważyć, iż podczas pomiaru, którego czas wynosi kilkaset sekund lub





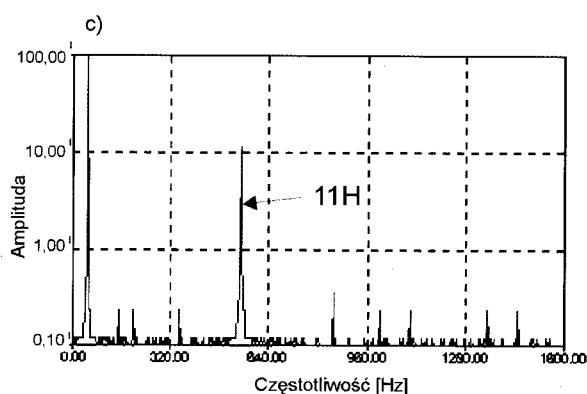
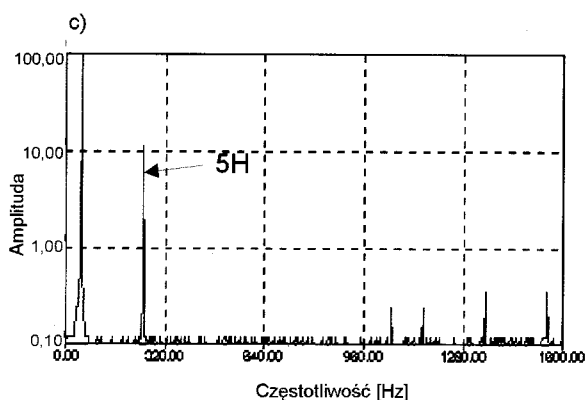
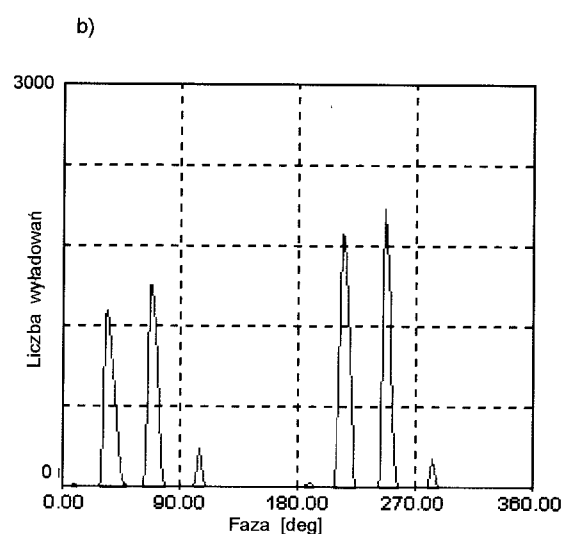
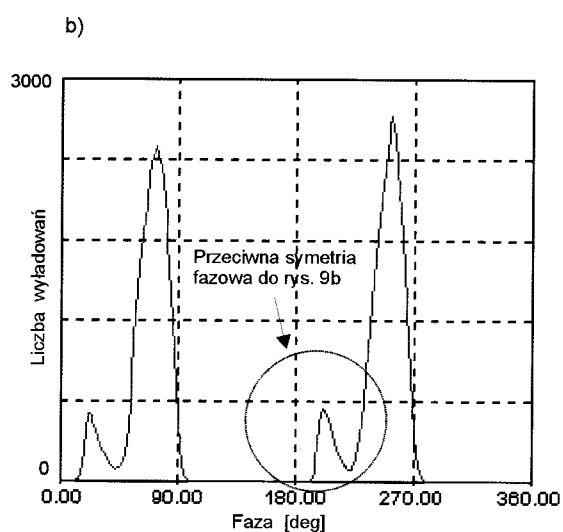
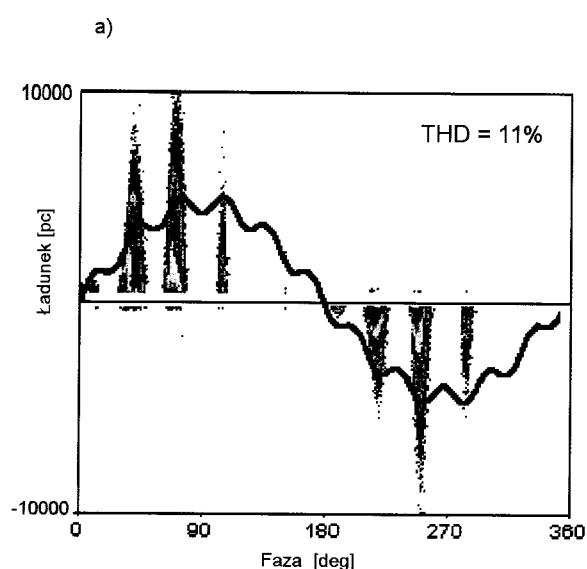
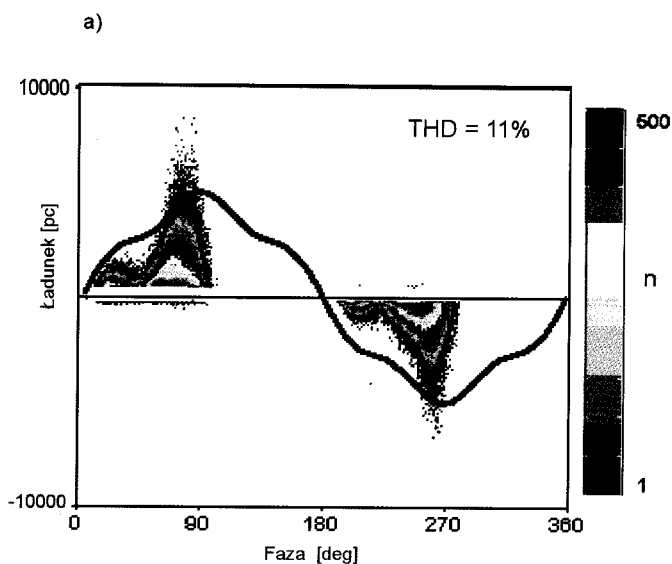
Rys. 8. Wyładowania niepełne rejestrowane przy „czystym” napięciu probierczym (THD = 0,7%): a) obraz fazowy wyładowań, b) rozkład fazowy liczby wyładowań, c) widmo napięcia probierczego

Rys. 9. Wyładowania niepełne rejestrowane przy napięciu probierczym zawierającym 3. harmoniczną (THD = 17%): a) obraz fazowy, b) rozkład fazowy, c) widmo napięcia probierczego (składnik 150 Hz)

minut, pojedyncze harmoniczne mogą zanikać lub pojawiać się [25] powodując akumulowaną modulację obrazu. Uwzględnienie tego zjawiska jest szczególnie ważne w rzeczywistych pomiarach diagnostycznych i monitoringowych wyładowań niepełnych, gdyż niemożliwe jest dokonanie po pomiarze

dekompozycji obrazu i wsteczne odtworzenie wpływu harmonicznych.

Na rysunku 13 przedstawiono spektrogram napięcia probierczego, na którym widoczne jest pojawienie się 3. harmonicznej dopiero po pewnym czasie. Przypadek ten jest szcze-



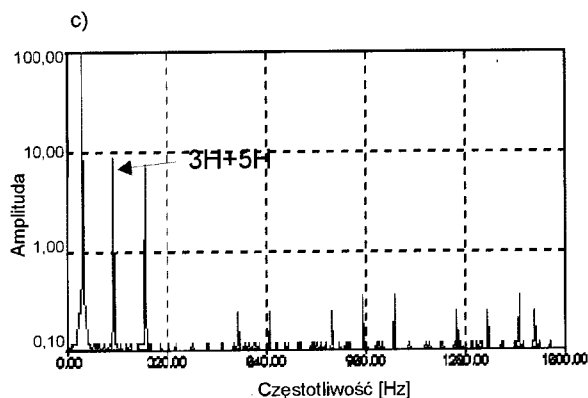
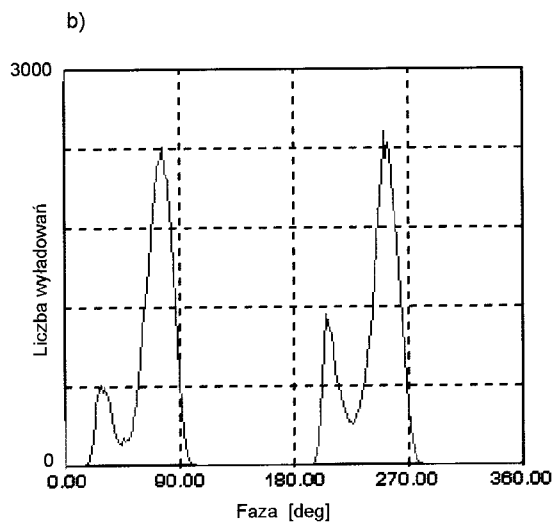
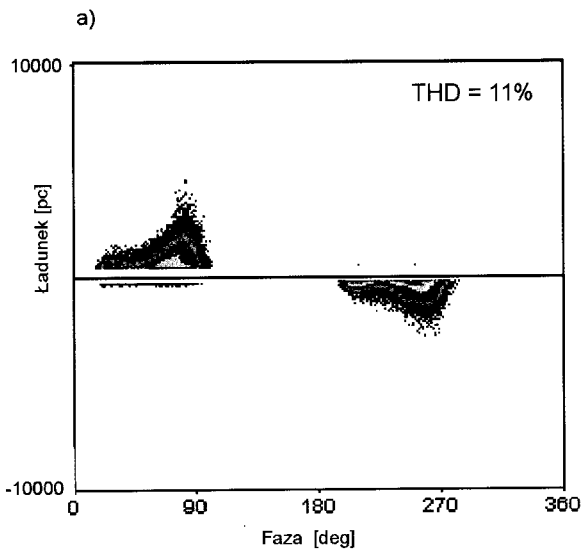
Rys. 10. Wyładowania niepełnie rejestrowane przy napięciu probierczym zawierającym 5. harmoniczną (THD = 11%): a) obraz fazowy, b) rozkład fazowy, c) widmo napięcia probierczego (składnik 250 Hz)

Rys. 11. Wyładowania niepełnie rejestrowane przy napięciu probierczym zawierającym 11. harmoniczną (THD = 11%): a) obraz fazowy, b) rozkład fazowy, c) widmo napięcia probierczego (składnik 550 Hz)

gólnie istotny przy rejestracji fazowo-rozdzielczych obrazów wyładowań, podczas której pojedyncze impulsy wyładowań są akumulowane i wchodzi okresowo do tego samego bloku danych. Dla przykładu, jeśli czas rejestracji impulsów wyładowań wynosi 100 sekund przy częstotliwości 50 Hz, to za-

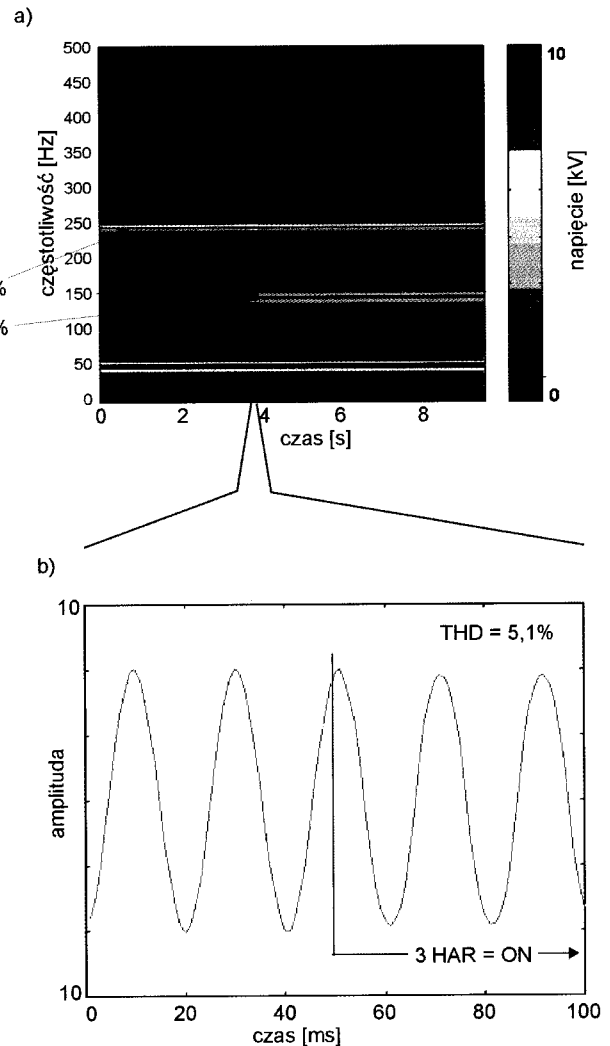
kumulowanych zostaje 5000 okresów. Jeżeli pojawi się zmiana w czasie zawartość harmoniczných w napięciu probierczym, to efektywny obraz fazowy zostanie zniekształcony.

Zniekształcenie napięcia probierczego może być na oscylogramie niezauważalne dla obserwatora, wówczas zastososo-



Rys. 12. Wyładowania niepełne rejestrowane przy napięciu probierczym z superpozycją 3. i 5. harmonicznej (THD = 11%): a) obraz fazowy, b) rozkład fazowy, c) widmo napięcia probierczego (składnik 550 Hz)

wanie analizy czasowo-częstotliwościowej pozwala na zilustrowanie zmian poszczególnych składników częstotliwościowych napięcia w czasie. Spektrogram (rys. 13a) został otrzymany za pomocą krótkoczasowej transformaty Fouriera (STFT) z oknem Hanninga. Oś odciętych odpowiada czasowo-



Rys. 13. a) spektrogram napięcia probierczego, b) 3-cia harmoniczna pojawia się po 4 sekundach od rozpoczęcia rejestracji impulsów wyładowań

wi w sekundach, oś rzędnych częstotliwości w Hz, natomiast kolory reprezentują amplitudę napięcia. Na spektrogramie widoczny jest główny składnik odpowiadający częstotliwości 50 Hz; 5. harmoniczna (250 Hz) na poziomie 1% jest obecna w czasie całego pomiaru, natomiast 3. harmoniczna (150 Hz) na poziomie 3% pojawia się po 4 sekundach od rozpoczęcia pomiaru.

## 6. OCENA WPLYWU HARMONICZNYCH NA WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNE

Problem wpływu wyższych harmonicznych na przebieg napięcia probierczego ma szczególne znaczenie w badaniach wyładowań niepełnych i ocenie ich wyników. Jeżeli  $D(q, \varphi, n)$  reprezentuje obraz fazowy zarejestrowany przy "czystym" widmowo napięciu probierczym, a  $D_h(q, \varphi, n)$  obraz wyładowań dla tego samego obiektu otrzymany przy napięciu probierczym zawierającym harmoniczne, to nie istnieje przekształcenie  $T$  umożliwiające wsteczną propagację i dekompozycję obrazu zniekształconego  $D_h$  na obraz referencyjny  $D$  i wydzielenie dodatkowego składnika  $D_e$  odpowiadającego za wartości harmonicznych w napięciu probierczym:

$$T(D_h) \Rightarrow D + D_e \quad (10)$$

W diagnostycznych badaniach porównawczych (wzorcowe / parametryczne bazy danych) identyfikacja mechanizmów i form wyładowań powinna być dokonywana z dużą ostrożnością. Dotyczy to szczególnie interpretacji obrazów wyładowań na podstawie parametrów statystycznych, takich jak momenty wyższych rzędów, nie ma bowiem praktycznie możliwości posługiwania się parametrami statystycznymi, typu skewness, kurtosis, przy nieznanym przebiegu napięcia probierczego.

Zalecane powinno być włączenie analizy harmonicznego napięcia probierczego do systemów akwizycji sygnałów wyładowań niepełnych i pomiar nie tylko wartości szczytowej lub średniej napięcia oraz częstotliwości jako parametrów charakterystycznych, ale również rejestracja przebiegu napięcia dla oceny zawartości harmonicznego. Częstotliwość próbkowania winna być dobrana z uwzględnieniem liczby analizowanych harmonicznego. Jako podstawowy parametr oceny można zastosować współczynnik zawartości harmonicznego (THD), jednakże dla zaawansowanej analizy porównawczej winno być wyznaczane pełne widmo napięcia probierczego.

## LITERATURA

1. Bennett A.I.: *Endurance of electrical insulation under non-sinusoidal voltage stress*. Ann. Rep. CEIDP, USA, 1987.
2. Brigham E.O.: *The Fast Fourier Transform and its applications*. Prentice Hall, 1988.
3. Crichton G.C., Karlsson P.W., Pedersen A.: *Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids*. IEEE Trans. EI. 1989, 24, 2, 335–342.
4. EN6100-2-4: *Electromagnetic compatibility*, 1994.
5. Fabiani D., Montanari G.C.: *The effect of voltage distortion on ageing acceleration of insulation system under partial discharge activity*. IEEE Electr. Insul. Mag. 2001, 17, 3.
6. Florkowska B.: *Wyładowania niepełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia — analiza mechanizmów, form i obrazów*. PAN, Warszawa 1997, ISBN 839062760
7. Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.: *Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*. PAN, 2001. ISBN 8391038750.
8. Florkowski M.: *Partial discharge image recognition using neural network for high voltage insulation systems*. Monographies No 45, AGH, Kraków 1996.
9. Florkowski M.: *System diagnostyczny oceny układów elektroizolacyjnych wysokiego napięcia*. Rozprawa doktorska, AGH, 1994.
10. Florkowski M., Zydrón P.: *Pomiary wyładowań niepełnych w diagnostyce silników wysokonapięciowych — wpływ zakłóceń i wyższych harmonicznego na pomiary i interpretacje wyników*. Wiad. Elektrotechn., 1998, 4.

11. Fruth B., Niemeyer L.: *The importance of statistical characteristics of partial discharge data*. IEEE Trans. EI. 1992, 27, 1, 60–69.
12. Gulski E., Kreuger F.H.: *Computer-aided recognition of discharge sources*. IEEE Trans. EI. 1992, 27, 1, 82–92, 1992.
13. Heydt G.T.: *Power quality engineering*. IEEE Power Engin. Rev. 2001, 21, 9, 5–7.
14. Holboll J.T., Braun J.T., Fujimoto N., Stone G.C.: *Partial discharges in flat, dielectric/metallic bounded cavities*. International Conference on Partial Discharges, Canterbury 1993, 378, 29–30.
15. Josefsson O.: *Ask the applications engineer*. Analog Devices 1997, 37.
16. Kamwa I., Grondin R., McNabb D.: *On-line tracking of changing harmonics in stressed power systems: application to Hydro-Quebec network*. IEEE Trans. Power Deliv. 1996, 11, 4, 2020–2027.
17. Kester W., Analog Dial. 1993, 27, 1, 27–29.
18. Kieboom G.: *Reducing harmonics in power systems to acceptable levels*. ABB Rev. 1994, 10, 38–44.
19. Kowalski Z., Hanzelka Z.: *Dopuszczalne wahania napięcia*. JUEE 1997, 3, 1.
20. Krivda A.: *Automated recognition of partial discharges*. IEEE Trans. DEI-2, 5, 796–821.
21. Lynn P.: *Digital signal processing with computer applications*. Wiley, 1995.
22. Niemeyer L., Fruth B., Gutfleisch F.: *Simulation of partial discharges in insulation systems*. 7th International Symposium on High Voltage Engineering, Dresden 1991.
23. Nikolovski S., Jozsa L., Kalea M.: *Harmonic analysis of 110kV filter facility in power system of Eastern Croatia using "Easy Power Spectrum" program*. Int. Conf on Power System Transients IPST'99, Budapest 1999, 653–663.
24. Owen E.: *A history of harmonics in power system*. IEEE Ind. Appl. Mag. 1998, 4, 1, 6–12.
25. *Probabilistic Aspects Task Force of the Harmonics Working Group Subcommittee of the Transmission and Distribution Committee: Time-varying harmonics: Part I- Characterizing measured data*. IEEE Trans. Power Deliv. 1998, 13, 3, 938–944.
26. Sabin D.D., Sundaram A.: *Quality enhances reliability*. IEEE Spectrum 1996, 34–41.
27. Short T.: *Harmonics and IEEE 519*, <http://www.pti-us.com>.
28. Siwik A., Pietrucha R.: *Ocena obciążeniowych strat mocy czynnej w transformatorach w obecności wyższych harmonicznego*. IV Sympozjum „Metody matematyczne w elektroenergetyce”. Zakopane 1998, 617–630.
29. Smirnov S.S., Kovernikova L.I.: *Higher harmonics in 220kV networks*. 4th International Conference „Electrical Power Quality and Utilisation”, Kraków, 1997.
30. Emanuel A.E.: *Partial discharges under moderately distorted voltage: A preliminary study*. 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power. October 6–9, 2002, Rio de Janeiro, Brazil.



### Dr inż. Marek Florkowski

Pracownik naukowy Centrum Badawczego ABB w Krakowie. Studia wyższe ukończył w roku 1990 na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. W roku 1994 uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie elektroniki. W latach 1990–1992 pracował w ABB Corporate Research Center w Baden-Dättwil w Szwajcarii. Jest członkiem IEEE, CIGRE.  
e-mail: marek.florkowski@pl.abb.com