

Analiza czasowo-częstotliwościowa sygnałów rejestrowanych podczas badań wyładowań niezupełnych

Streszczenie. Wyładowania niezupełne (wnz), których analiza jest stosowana w ocenie stanu izolacji urządzeń elektroenergetycznych są źródłem sygnałów impulsowych o specyficznych parametrach. Pojedyncze impulsy cechują się krótkim czasem narastania i małą szerokością, a co za tym idzie bardzo szerokim widmem. Ich powstawanie związane jest z procesami fizykalnymi, które sprawiają, że ciągi impulsów wyładowań mogą być traktowane jako niestacjonarne procesy stochastyczne. Z tego powodu dobrym narzędziem ich analizy są metody czasowo-częstotliwościowe, w szczególności analiza wielorozdzielcza z zastosowaniem przekształcenia falkowego i pakietów falek.

Abstract. Partial discharge (PD), the analysis of which is used in assessing the condition of electric power devices insulation are a source of the pulse signals with specific parameters. Single PD pulse has a short rise time and a small width, and thus has a very broad spectrum. Their inception is connected with the physical processes that cause that the time series of pulses can be treated as non-stationary stochastic processes. For this reason, good tools for PD analysis are the time-frequency methods in particular the methods of multiresolution analysis using wavelet transform and wavelet packets. (Time-frequency analysis of signals registered during partial discharges researches.)

Słowa kluczowe: układy izolacyjne, wyładowania niezupełne, analiza wielorozdzielcza MRA, przekształcenie falkowe, pakiety falek

Keywords: insulating systems, partial discharges, multiresolution analysis MRA, wavelet transform, wavelet packets

Wprowadzenie

Zgodnie z klasyczną definicją wyładowania niezupełne (wnz) są wyładowaniami elektrycznymi ograniczonymi jedynie do części objętości lub powierzchni układu izolacyjnego, które nie doprowadzają w sposób bezpośredni do wystąpienia zwarcia międzyelektrodowego [1-3]. Poprawnie zaprojektowany i wykonany układ izolacyjny powinien być wolny od tych wyładowań, więc ich obecność jest zwykle świadectwem istnienia defektów, powstałych z różnych przyczyn. Aby doszło do wyładowań, defekty muszą powodować takie zmiany rozkładu natężenia pola elektrycznego, które skutkują lokalnym przekroczeniem jego wartości krytycznej. Oddziaływanie energetyczne wyładowań na strukturę materiałów dielektrycznych tworzących układ izolacyjny może po pewnym czasie (niekiedy nawet bardzo krótkim) spowodować taką ich degradację, że doprowadzi ona do trwałej utraty ich właściwości izolacyjnych.

Wyładowania niezupełne są wykrywane przy użyciu różnych metod detekcji: elektrycznych, akustycznych, optycznych, fizykochemicznych [2]. Metodami powszechnie stosowanymi w badaniach materiałów i układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych, wykonywanych w warunkach laboratoryjnych, są metody opisane w normie IEC 60270 [3, 4]. Określa ona m.in. wymagania dotyczące parametrów aparatury pomiarowej i metod skalowania układów pomiarowych, służących określeniu ładunku pozornego wyładowań. Niestety, ze względu na stosunkowo niski zakres częstotliwości pracy układów detekcyjnych (narzucone wymaganiami normy górne częstotliwości graniczne nie przekraczają 1 MHz) w większości przypadków metody te (zarówno wąsko-, jak i szerokopasmowe) nie mogą być efektywnie zastosowane podczas pomiarów przeprowadzanych w warunkach przemysłowych, w obecności szumów i zakłóceń utrudniających lub nawet uniemożliwiających ich wykonanie. Dotyczy to zarówno pomiarów wykonywanych na generatorach, transformatorach i kablach elektroenergetycznych, w rozdzielnicach gazowych GIS (Gas Insulated Substation), jak również badań układów izolacyjnych silników w układach napędowych z przekształtnikami energoelektronicznymi, które wytwarzają zaburzenia o częstotliwościach nakładających się na pasmo klasycznej detekcji wnz [5, 6]. W takich sytuacjach sięga się po metody jeszcze obecnie nieznormalizowane [7, 8]. Są to m.in. elektryczne metody szerokopasmowe stosujące detekcję sygnałów w zakresach HF/VHF/UHF (High Frequency / Very High

Frequency / Ultra High Frequency), bazujące na indukcyjnych i pojemnościowych układach sprzęgających, czujnikach pola E oraz montowanych na stałe lub doraźnie pojedynczych lub matrycowych układach antenowych, o bardzo szerokich zakresach częstotliwości pracy [8-16].

Inicjowanie i rozwój wyładowań niezupełnych w ich źródłach są zależne od zjawisk i procesów fizykalnych, których przebieg jest warunkowany zdarzeniami charakteryzującymi się pewnym prawdopodobieństwem wystąpienia. Dodatkowo, z wielu powodów, ich parametry są zwykle zmienne w czasie, co sprawia, że sygnały wyładowań niezupełnych traktuje się jako procesy impulsowe, stochastyczne i niestacjonarne [2, 17].

Artykuł opisuje sygnałowe właściwości wyładowań niezupełnych na tle towarzyszących im podczas pomiarów szumów i zakłóceń zewnętrznych. Jest to podstawą dla przedstawienia możliwości analizy i przetwarzania tych sygnałów za pomocą narzędzi analizy czasowo-częstotliwościowej, w szczególności metod analizy wielorozdzielczej MRA (Multiresolution Analysis).

Detekcja wyładowań niezupełnych – sygnały, szумы, zakłócenia

Impulsy prądowe wyładowań niezupełnych charakteryzują się bardzo krótkimi czasami narastania i szerokościami, w szczególności dotyczy to wyładowań powstających w układach z izolacją gazową GIS oraz w inkluzjach gazowych, w izolacji stałej. Ich czasy narastania mogą być krótsze od 1 ns, a szerokości na połowie amplitudy $FWHM$ (Full Width at Half Magnitude) są rzędu kilku nanosekund (rys. 1). Dla potrzeb analizy właściwości układów detekcyjnych kształty impulsów przybliżane są krzywą Gaussa lub dwuwykładniczą [18]. Jeżeli detekcja impulsu prądowego następuje na idealnym rezystorze i nie występują żadne dodatkowe zaburzenia, wówczas ograniczeniem czułości układu będzie szum termiczny tego rezystora, którego wartość skuteczną określa wzór:

$$(1) \quad U_N = \sqrt{4R_m k T \Delta f}$$

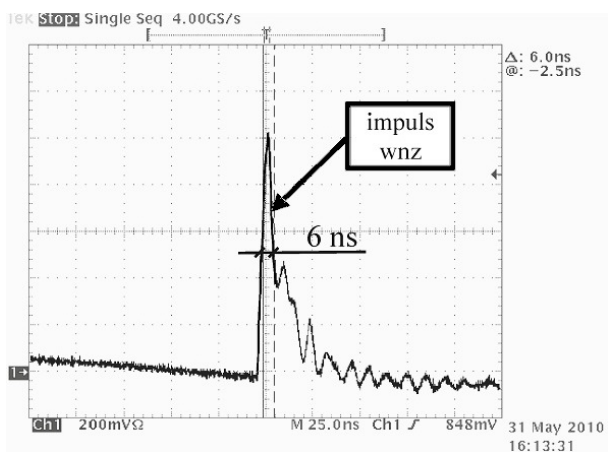
gdzie: U_N – napięcie (RMS) szumu termicznego [V], R_m – rezystor detekcyjny [Ω]; k – stała Boltzmana; T – temperatura rezystora [K]; Δf – szerokość pasma detekcji [Hz].

Biorąc pod uwagę związki pomiędzy amplitudą impulsu Gaussa i wartością U_N szumu, a szerokością pasma

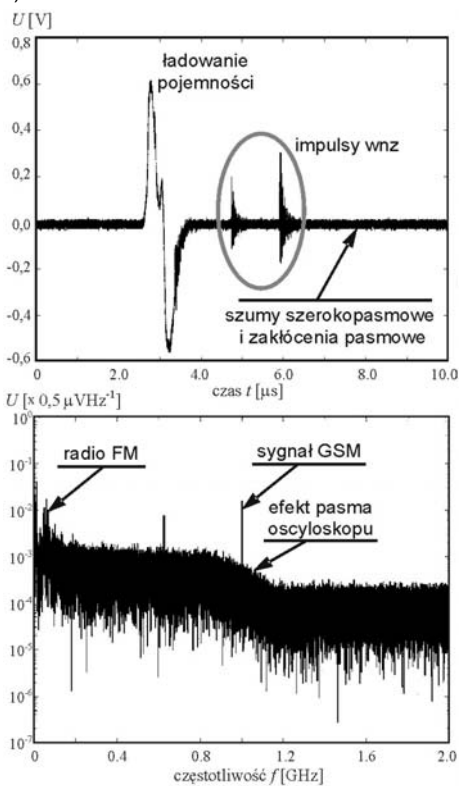
detekcji można zapisać, że współczynnik sygnał/szum SNR jest proporcjonalny do pierwiastka z szerokości pasma:

$$(2) \quad SNR = \frac{S}{N} \approx \frac{\Delta f}{\sqrt{\Delta f}} = \sqrt{\Delta f}$$

Zawężanie pasma detekcji powoduje zmniejszenie wartości współczynnika SNR . Z drugiej strony, nie jest wskazane poszerzenie pasma detekcji ponad wartość częstotliwości granicznej impulsu, odpowiadającej detekcji optymalnej. Założenia powyższe dotyczą sytuacji, w której podczas pomiaru, równocześnie z sygnałem wyładowań występuje jedynie szum biały. W realnych sytuacjach obecne są również zakłócenia wąskopasmowe oraz impulsowe, o różnych parametrach amplitudowo-czasowych (rys. 2).



Rys. 1. Impuls wnz w modelu izolacji silnika zasilanego napięciem PWM, rejestrowany na szerokopasmowym rezystorze pomiarowym 50Ω (pasma oscyloskopu $\Delta f = 1\text{GHz}$, częstotliwość próbkowania $f_s = 4\text{GHz}$)

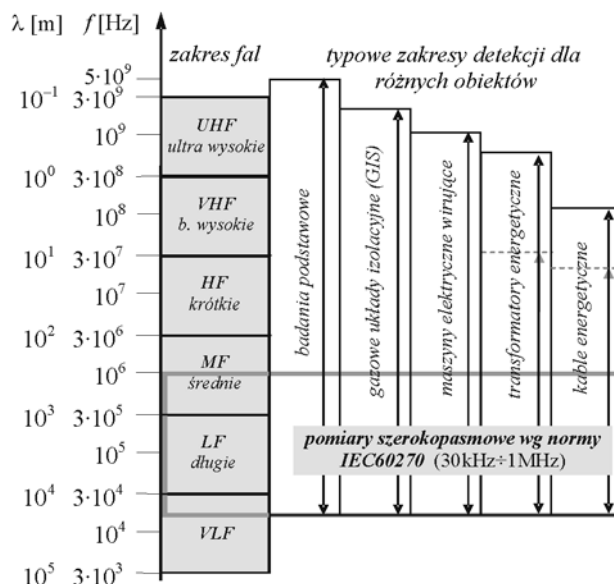


Rys. 2. Przebieg czasowy i widmo sygnału rejestrowanego na modelu izolacji silnika zasilanego napięciem PWM, przez szerokopasmową cewkę Rogowskiego (pasma oscyloskopu $\Delta f = 1\text{GHz}$, częstotliwość próbkowania $f_s = 4\text{GHz}$)

Stosując różne kryteria, zakłócenia występujące w warunkach przemysłowych można podzielić na:

- ciągłe / impulsowe;
- wąskopasmowe / szerokopasmowe;
- powtarzalne / niepowtarzalne;
- synchroniczne / niesynchroniczne względem napięcia sieci;
- zdeterminowane / przypadkowe (stochastyczne);
- wewnętrzne / zewnętrzne;
- zdeterminowane czasowo / zdeterminowane częstotliwościowo.

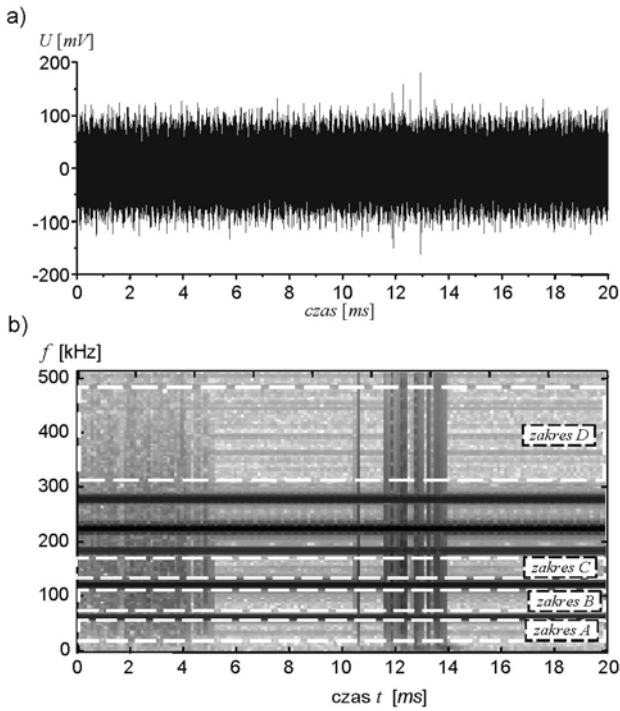
W zależności od rodzaju zakłócenia różne mogą być metody przeciwdziałania jego wpływowi na wyniki pomiarów. Pomimo powszechnego obecnie stosowania cyfrowych metod przetwarzania sygnałów, w tym zaawansowanych metod filtracji, w praktyce we wszystkich sytuacjach niezbędne jest również użycie układów wstępnej filtracji analogowej. Możliwości detekcji i analizy diagnostycznej sygnałów wyładowań niepełnych powstających w różnych obiektach elektroenergetycznych są determinowane także ich indywidualną konstrukcją oraz parametrami materiałowymi, przede wszystkim elektrycznymi i magnetycznymi, które wpływają bezpośrednio na właściwości transmisyjne, charakterystyczne dla poszczególnych grup obiektów. Typowe zakresy częstotliwości detekcji stosowanych w praktyce pomiarowej dla różnych grup układów i urządzeń elektroenergetycznych zestawiono na rysunku 3.



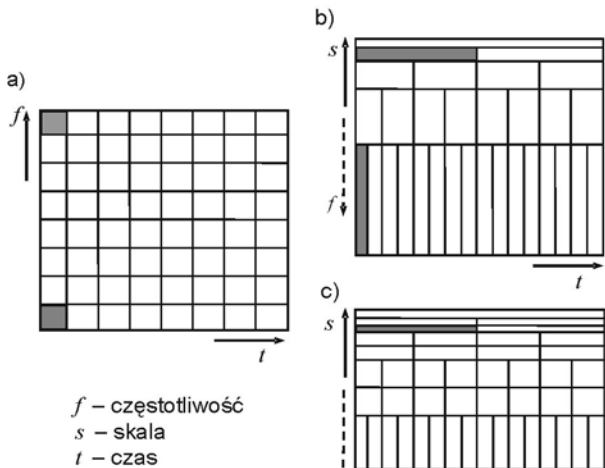
Rys. 3. Typowe zakresy detekcji wyładowań niepełnych dla wybranych grup układów i urządzeń elektroenergetycznych

Analiza czasowo-częstotliwościowa wyładowań niepełnych – narzędzia, cechy, możliwości

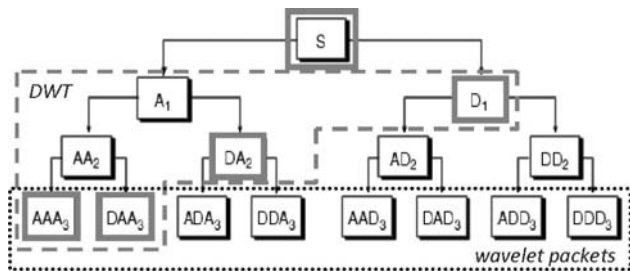
Właściwości sygnałów impulsowych wyładowań niepełnych (stochastyczność, niestacjonarność oraz quasi-okresowość – dla wyładowań powstających pod wpływem napięcia przemiennego) sprawiają, że dobrym narzędziem dla ich analizy są metody łącznej analizy czasowo-częstotliwościowej JTFA (*Joint Time-Frequency Analysis*). Na rysunku 4 przedstawiono przykład sygnału wyładowań rejestrowanego dla izolacji maszyny elektrycznej, przysłoniętego szumem i zakłóceniami wąskopasmowymi o znacznych amplitudach. Na spektrogramie STFT (*Short Time Fourier Transform*) wyróżnić można co najmniej 4 zakresy częstotliwości, w których poziom zakłóceń jest znacząco niższy od poziomu sygnału wyładowań. Jest to bardzo istotna informacja dla poprawnego zaplanowania pomiarów.



Rys. 4. Przebieg czasowy i spektrogram STFT sygnału rejestrowanego dla izolacji termoutwardzalnej maszyny elektrycznej badanej napięciem przemiennym AC. Sygnałom wyładowań towarzyszą szumy szerokopasmowe i zakłócenia wąskopasmowe. Zaznaczono 4 zakresy częstotliwości wolne od zakłóceń wąskopasmowych.



Rys. 5. Schematy podziału płaszczyzny czasowo-częstotliwościowej dla: a) przekształcenia STFT, b) przekształcenia DWT, c) przekształcenia stosującego pakiety falek (wavelet packets)



Rys. 6. Drzewiasty algorytm działania wybranych przekształceń falkowych (DWT i wavelet packets) jako banków filtrów pasmowych

Początek stosowania metod łącznej analizy czasowo-częstotliwościowej dla analizy numerycznej i cyfrowego przetwarzania sygnałów wyładowań niezupełnych sięga lat 90. XX wieku. Zakres ich aplikacji w tej dziedzinie obejmuje m.in. [18-27]:

- badanie zmienności czasowej (dynamiki) składowych częstotliwościowych sygnałów wnz poprzez analizę spektrogramów STFT oraz skalogramów CWT (Continuous Wavelet Transform) i DWT (Discrete Wavelet Transform);
- odszumianie falkowe sygnałów pomiarowych jednowymiarowych oraz obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań $D(\varphi, q, n)$;
- filtrację zakłóceń wąskopasmowych z zastosowaniem technik falkowych, w tym pakietów falek;
- stosowanie dekompozycji falkowej dla dyskryminacji/separacji wyładowań pochodzących z różnych źródeł;
- kompresję danych pomiarowych.

Rysunek 5 przedstawia schematy podziału płaszczyzny czasowo-częstotliwościowej uzyskiwane przy zastosowaniu trzech rodzajów przekształceń [18, 28-30]:

- przekształcenia STFT, działającego jak analizator widma o stałej szerokości analizowanych pasm;
- dyskretnego przekształcenia falkowego DWT, reprezentującego analizator o stałej szerokości względnej analizowanych pasm (filtry pasmowe o stałej dobroci);
- przekształcenia z pakietami falek, które może działać jak zespół filtrów pasmowych o adaptacyjnie dopasowywanych parametrach (częstotliwość środkowa i pasmo).

Istotne różnice pomiędzy właściwościami poszczególnych metod analizy sygnałów prowadzą do odmiennego podziału płaszczyzny czas-częstotliwość (czas-skala) w każdej z nich (rys. 5). Zastosowanie pakietów falek pozwala zachować pewną racjonalność we wzajemnych relacjach pomiędzy rozdzielczością czasową i częstotliwościową, zapewnianą przez przekształcenie DWT, przy równoczesnym zwiększeniu elastyczności w dopasowaniu charakterystyk filtrów pasmowych do właściwości widmowych analizowanych sygnałów. Rysunek 6 przedstawia przykładową strukturę algorytmu działania przekształceń DWT i pakietów falek, reprezentowanych jako banki filtrów pasmowych. W przypadku dyskretnego przekształcenia falkowego DWT poddany dekompozycji sygnał jest reprezentowany przez składnik aproksymacji AAA_3 oraz składniki detalu DAA_3 , DA_2 i D_1 . W przypadku algorytmu wyznaczającego pakiety falek ich pełną reprezentację stanowią w tym przypadku wszystkie składniki z indeksem „3” (objęte kropkowaną ramką): AAA_3 , DAA_3 , ADA_3 , DDA_3 , AAD_3 , DAD_3 , ADD_3 i DDD_3 . Możliwe jest również selektywne stosowanie wyższych poziomów dekompozycji w wybranych gałęziach drzewa dla dokładniejszego wyboru pasma analizy sygnału.

W przypadku przetwarzania sygnałów wyładowań z zastosowaniem transformaty Fouriera lub przekształcenia STFT analizowane są widma częstotliwościowe, dla których możliwe są pewne dobrze podbudowane teoretycznie, na gruncie teorii obwodów i teorii pola, zrozumiałe i wsparte doświadczeniem interpretacje fizykalne. Dla przekształceń falkowych interpretacje takie, dla analizy wyników uzyskiwanych na płaszczyźnie czas-skala, nie są tak oczywiste. Wykonanie przekształcenia falkowego oznacza w efekcie określenie wartości zbioru współczynników, które reprezentują stopień korelacji analizowanego sygnału z funkcją analizującą (falką bazową), która pomimo tego, że musi spełniać pewne określone wymagania, to jednak może mieć różny kształt. Z tego powodu nie stosuje się wprost wartości współczynników przekształcenia falkowego dla określenia parametrów sygnałów wyładowań niezupełnych, np. związanych z ich ładunkiem lub energią.

Podsumowanie i wnioski

Sygnały pomiarowe rejestrowane podczas badań wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych urządzeń elektrycznych cechują się dużą indywidualną specyfiką, związaną z charakterem zjawisk fizycznych decydujących o ich powstawaniu. W długim okresie rozwoju metod badawczych stosowane były różne metody detekcji oraz narzędzia przetwarzania i analizy tych sygnałów. Ugruntowaną metodą, wspartą dokumentami organizacji normalizacyjnych, jest pomiar ładunku pozornego wyładowań oraz innych opisujących je wielkości, definiowanych w normie IEC 60270 [3]. W tym celu stosuje się układy detekcji pasmowej o stosunkowo niskich częstotliwościach pracy. Bardzo szerokie widmo impulsów wyładowań niezupełnych, sięgające częstotliwości rzędu 10^9 Hz, sprawia jednak, że w badaniach laboratoryjnych i praktyce diagnostycznej stosowane są również metody pozwalające na ich wykrywanie w zakresach częstotliwości sięgających końca pasma UHF, a nawet wyżej.

Jednym z aktualnych kierunków badań w obszarze wykrywania, przetwarzania i analizy sygnałów wyładowań niezupełnych, rejestrowanych metodami cyfrowymi, są metody łącznej analizy czasowo-częstotliwościowej, w tym również wielorozdzielczej. Impulsowy charakter oraz stochastyczność i niestacjonarność tych sygnałów powodują, że dobrymi narzędziami dla ich analizy są przekształcenia falkowe, szczególnie te, które posługują się pakietami falek, pozwalającymi na adaptacyjne dostosowanie struktury pasm analizujących do właściwości widmowych sygnału.

Głównym obszarem aplikacji przekształcenia falkowego w badaniach wyładowań niezupełnych jest obecnie usuwanie szumu szerokopasmowego (*denoising*) oraz filtracja zaburzeń wąskopasmowych, co służy podwyższeniu wartości współczynnika *SNR*. Otwartym problemem badawczym pozostaje bezpośrednia interpretacja wartości współczynników przekształcenia falkowego dla opisu właściwości sygnałów wyładowań z uwzględnieniem wywołujących je zjawisk i procesów fizycznych.

Autorzy: dr hab. inż. Paweł Zydrón prof. n. AGH; dr inż. Józef Roehrich; mgr inż. Michał Bonk, mgr inż. Łukasz Fuśnik, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Kraków, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: pzydron@agh.edu.pl; roehrich@agh.edu.pl; bonkm@agh.edu.pl; lfuśnik@agh.edu.pl

LITERATURA

- [1] Kreuger F.H.: Discharge detection in high-voltage equipment, Butterworth & Co., London, 1989
- [2] Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.: Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wyd. IPPT PAN, Warszawa 2001
- [3] IEC 60270:2000+AMD1:2015 CSV Consolidated version: High-voltage test techniques - Partial discharge measurements
- [4] CIGRE WG D1.33: Guide for electrical partial discharge measurements in compliance with IEC 60270, Technical Brochure 366, 2008
- [5] Florkowska B., Florkowski M., Roehrich J., Zydrón P.: Studies of partial discharges at sinusoidal, non-sinusoidal, and impulse voltages, Przegląd Elektrotechniczny, 86 (2010), nr 11b, 17-21
- [6] IEC TS 61934 (2006), Electrical insulating materials and systems – electrical measurement of partial discharges (PD) under short rise time and repetitive voltage impulses
- [7] CIGRE WG D1.33, Guidelines for unconventional partial discharge measurements, Technical Brochure 444, 2010
- [8] IEC 62478/TS/Ed1: High voltage test techniques – Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods (projekt)
- [9] Florkowska B., Zydrón P., Florkowski M.: Localization and identification of corona forms based on phase-resolved images, Meas. Sci. Technol., 12 (2001), 1304-1310

- [10] Moore P. J., Portugues I.E., Glover I.A.: Radiometric location of partial discharge sources on energized high-voltage plant, IEEE Trans. on Pow. Deliv., 20 (2005), no. 3, 2264-2272
- [11] Zhiguo Tang; Chengrong Li; Xu Cheng; Wei Wang; Jinzhong Li; Jun Li: Partial discharge location in power transformers using wideband RF detection, IEEE Trans. Dielectr. and Electr. Insul., 13 (2006), no. 6, 1193-1199
- [12] Moore P.J., Portugues I.E., Glover I.A.: Partial discharge investigation of a power transformer using wireless wideband radio-frequency measurements, IEEE Trans. Pow. Deliv., 21 (2006), no. 1, 528-530
- [13] Boya C., Rojas-Moreno M.V., Ruiz-Llata M., Robles G.: Location of partial discharge sources by means of blind source separation of UHF signals, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 22 (2015), no. 4, 2302-2310
- [14] Qingshan Shan et al.: Estimation of impulsive noise in an electricity substation, IEEE Trans. on EMC, 53 (2011), no. 3, 653-663
- [15] Jian Li; Peng Wang; Tianyan Jiang; Lianwei Bao; Zhiman He: UHF stacked Hilbert antenna array for partial discharge detection, IEEE Trans. Antenn. and Propag., 61 (2013), no.11, 5798-5801
- [16] Huijuan Hou; Gehao Sheng; Xiuchen Jiang: Localization algorithm for the PD source in substation based on L-shaped antenna array signal processing, IEEE Trans. Pow. Deliv., 30 (2015), no. 1, 472-479
- [17] Zydrón P.: Sygnały probiercze i pomiarowe w technice wysokich napięć i diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Rozprawy i Monografie nr 233, UWND AGH, Kraków, 2011
- [18] Zydrón P.: Wybrane zagadnienia analizy czasowej i częstotliwościowej wyładowań niezupełnych, ISBN 83-908210-3-6, ZEE AGH, Kraków, 2001
- [19] Shim I., Soraghan J.J., Siew W.H.: Detection of PD utilizing digital signal processing methods. Part 3: Open-loop noise reduction, Electr. Insul. Mag., 17 (2001), no. 1, 6-13
- [20] Satish L., Nazneen B.: Wavelet-based denoising of partial discharge signals buried in excessive noise and interference, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, 10 (2003), no. 2, pp. 354-367
- [21] Zhou X., Zhou C., Kemp I J.: An improved methodology for application of wavelet transform to partial discharge measurement denoising, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 12 (2005), no. 3, 586-594
- [22] Florkowski M., Florkowska B.: Wavelet-based partial discharge image denoising, IET Gener. Transm. Distrib., 1 (2007), no. 2, 340-347
- [23] Kyprianou A. et al.: Wavelet packet denoising for online partial discharge detection in cables and its application to experimental field results, Meas. Sci. Technol. 17 (2006) 2367-2379
- [24] Hao L. et al.: Discrimination of multiple PD sources using wavelet decomposition and principal component analysis, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 18 (2011), no. 5; 1702-1711
- [25] Chang C.S. et al.: Separation of corona using Wavelet Packet Transform and neural network for detection of partial discharge in gas-insulated substations, IEEE Trans. Pow. Deliv., 20 (2005), no. 2, 1363-1369
- [26] Chang C.S. et al.: Denoising of partial discharge signals in wavelet packets domain, IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., 152 (2005), no. 3, 129-140
- [27] Youyuan W., Dawei Z., Guojun L., Yanguang H.: Suppression method of partial-discharge interference signal based on the combination of morphological filters and complex wavelet transform, Przegląd Elektrotechniczny, 89 (2013), nr 4, 123-128
- [28] Strang G., Nguyen T.: Wavelets and filter banks, Wesley Cambridge, Press, 1996
- [29] Akansu A.N., Tazebay M.V., Medley M.J., Das P.K.: Wavelet and subband transforms. Fundamentals and communication applications, IEEE Comm. Mag., Dec. 1997, 105-115
- [30] Zydrón P.: Przekształcenie falkowe w pomiarach wysokonapięciowych, VI Ogólnopolskie Symp. Inżynieria Wysokich Napięć IW-2002, Przegląd Elektrotechniczny – Zeszyt Specjalny, 78 (2002), 319-322