

## PRZETWARZANIE I ANALIZA IMPULSÓW WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH PRZY ZASTOSOWANIU PAKIETU MATLAB

Paweł ZYDRON, Józef ROEHRICH

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

tel: 012 6172886 fax: 012 6345721 e-mail: pzydron@agh.edu.pl, roehrich@agh.edu.pl

**Streszczenie:** Wyładowania niepełne (wnz) występujące w układach izolacyjnych urządzeń elektrycznych są dynamicznym, nieliniowym zjawiskiem fizycznym wywołującym krótkotrwały przepływ ładunków elektrycznych, ograniczonym jedynie do części powierzchni lub objętości dielektryka. Ze względu na fakt, że występują one z reguły w miejscach, które mogą być utożsamiane z defektami izolacji, ich detekcja, lokalizacja i rozpoznawanie są elementami współczesnej diagnostyki eksploatacyjnej.

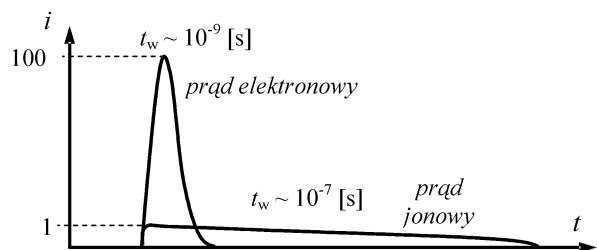
Szerokopasmowy charakter impulsów prądowych generowanych przez wyładowania niepełne oraz stochastyczność procesów prowadzących do ich powstawania sprawiają, że w badaniach stosowane są różne metody detekcji i analizy sygnałów pomiarowych. Wygodnym narzędziem, umożliwiającym testowanie i optymalizację procedur przetwarzania tych sygnałów jest wyposażony w odpowiednie oprogramowanie komputer, sprzężony z urządzeniem dokonującym ich rejestracji.

Artykuł bazując na podstawach detekcji wnz przedstawia przykłady procedur przetwarzania uwzględniających ich właściwości sygnałowe. Wszystkie prezentowane wyniki uzyskano stosując procedury implementowane w pakiecie Matlab®.

**Słowa kluczowe:** wyładowania niepełne (wnz), analiza sygnałów, pakiet programowy Matlab®

### 1. WPROWADZENIE

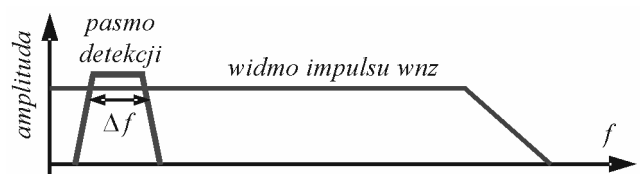
Wyładowanie niepełne zachodzące w układzie izolacyjnym jest dynamicznym procesem fizycznym, podczas którego w przestrzeni lub na powierzchni, na której ono zachodzi, następuje lokalny przepływ elektronów i jonów [1, 2]. Wielkość przepływającego ładunku jest zależna od charakteru pobudzenia (pola elektrycznego), właściwości środowiska i geometrii źródła wyładowań. Zmiana ładunku zgromadzonego w źródle wyładowań wywołuje powstanie krótkotrwałego impulsu prądowego o parametrach związanych z ośrodkiem, w którym występuje wyładowanie oraz z rodzajem nośników ładunku. Rysunek 1 przedstawia relacje pomiędzy amplitudą i czasem trwania  $t_w$  impulsu wyładowania dla prądu elektronowego i jonowego [3]. Najkrótsze impulsy wyładowań niepełnych występują w układach z izolacją gazową oraz w inkluzjach gazowych zlokalizowanych w dielektrykach stałych. Spotykane wartości czasów ich narastania są rzędu  $10^{-10}$  [s], a czasy ich trwania rzędu  $10^{-9}$ .



Rys. 1. Względne amplitudy oraz czasy trwania składowych elektronowej i jonowej impulsu wyładowania

Z zależności między czasowymi i częstotliwościowymi parametrami sygnałów wynika, że górny zakres częstotliwości zawarty w pojedynczym impulsie wyładowania jest odwrotnie proporcjonalny do czasów go opisujących tzn. im krótsze są czasy narastania i trwania impulsu tym szerszy jest zakres widma częstotliwości impulsu.

Zgodnie z normą międzynarodową IEC-60270 [4] układ detekcji wyładowań niepełnych stanowi obwód pasmowo-przepustowy określany mianem filtra pseudo-całkującego, którego charakterystyka częstotliwościowa obejmuje część widma impulsu w dolnym zakresie częstotliwości – poniżej 1 MHz (Rys. 2).



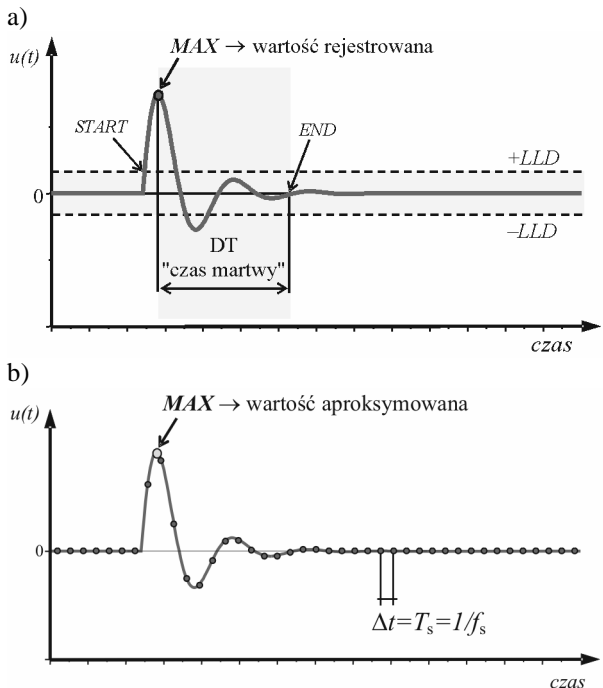
Rys. 2. Pasma układu detekcji zgodnego z normą [4] na tle widma pojedynczego impulsu wyładowań niepełnych

Taki rodzaj detekcji sprawia, że wartość maksymalna impulsu napięciowego uzyskiwanego na wyjściu impedancji detekcyjnej jest proporcjonalna do tzw. ładunku pozornego wyładowania, będącego podstawową wielkością pomiarową opisującą wyładowanie. W związku z tym procedury pomiarowe powinny pozwalać na selekcję impulsów, określenie ich amplitud oraz analizę zbiorów rejestrowanych wyładowań np. metodami statystycznymi.

## 2. DETEKCJA I REJESTRACJA WNZ

Współczesne systemy pomiarowe wnz stosują dwie metody rejestracji impulsów napięciowych [5]:

- A) detekcję i rejestrację amplitud impulsów (rys. 3a);
- B) próbkowanie sygnału i zapis ciągu próbek (rys. 3b).



Rys. 3. Metody rejestracji sygnałów stosowane w pomiarach wylądowań niezupełnych: a) detekcja wartości maksymalnej impulsu, b) próbkowanie równomierne sygnału

Układy wykorzystujące pierwszą z metod umożliwiają bezpośredni pomiar amplitudy impulsu, a więc – po skalowaniu – wartości ładunku pozornego. Wymaganiem niezbędnym jest istnienie odpowiedniego odstępu sygnału  $S$  od szumu  $N$ , umożliwiającego separację impulsów w oparciu o określenie poziomu ich dyskryminacji  $LLD$ . Poziom  $LLD$  stanowi granicę dla tej części rejestrowanego sygnału, która jest uznawana za szum.

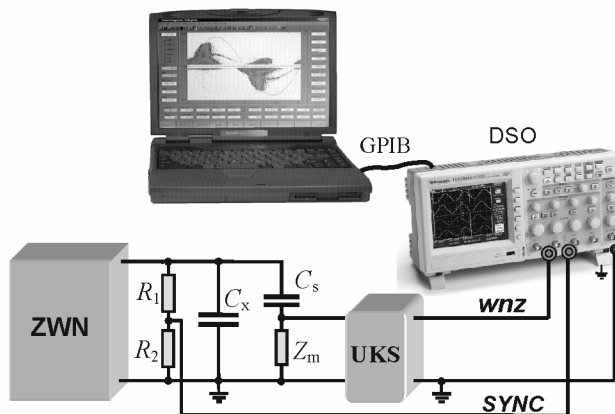
Druga z metod – próbkowania sygnałów ze stałym odstępem czasu – może być stosowana w układach przeznaczonych do pomiaru wylądowań w obecności silnych szumów i zakłóceń (o małej wartości współczynnika  $S/N$ ) oraz do analizy widmowej lub czasowo-częstotliwościowej. Sygnał pomiarowy, próbkowany z częstotliwością  $f_s$  jest poddawany procesom przetwarzania, służącym eliminacji sygnałów niepożądanych. Dla prawidłowego określenia amplitudy impulsów konieczne jest stosowanie dużych częstotliwości pobierania próbek lub odpowiednich aproksymacyjnych procedur obliczeniowych.

W przypadku stosowania do rejestracji sygnałów wnz oscyloskopów cyfrowych można korzystać z trybu detekcji wartości szczytowej *PeakDetect*. Pozwala to implementować algorytmy właściwe dla metody A jednak dla określenia parametrów poszczególnych impulsów konieczna jest programowa realizacja funkcji dyskryminacji szumów  $LLD$  oraz uwzględnienie istnienia „czasu martwego”. Winien on być nie krótszy niż rozdzielczość czasowa  $t_r$  pasmowego układu detekcyjnego o szerokości pasma  $\Delta f$ :

$$t_r = \frac{2 \div 3}{\Delta f} \quad (1)$$

## 3. UKŁAD POMIAROWY

Rysunek 4 przedstawia układ pomiarowy pozwalający na detekcję i rejestrację sygnałów wylądowań niezupełnych.



Rys. 4. Układ do detekcji i rejestracji wylądowań niezupełnych

Wylądowania niezupełne występujące w układzie izolacyjnym o pojemności  $C_x$  są wykrywane na impedancji pomiarowej  $Z_m$  (o charakterze filtra pasmowprzepustowego) sprzęgniętej z badanym obiektem poprzez pojemność  $C_s$ . Uzyskany sygnał *wnz*, przed podaniem go na wejście oscyloskopu cyfrowego DSO, jest kształtowany w układzie kondycjonowania sygnałów UKS. Dodatkowym sygnałem, niezbędnym dla realizacji rejestracji fazowo-rozdzielczej jest sygnał synchronizacji *SYNC* otrzymywany z wyjścia wysokonapięciowego dzielnika pomiarowego  $R_1/R_2$ , który pozwala na określenie parametrów napięcia ze źródła wysokiego napięcia ZWN. Rejestrowane ciągi próbek są transmitowane poprzez interfejs standardu IEEE-488 (GPIB) do komputera realizującego procedury przetwarzania implementowane w programie Matlab®.

## 4. ANALIZA CZASOWO-CZĘSTOTLIWOŚCIOWA

Sygnały wylądowań niezupełnych charakteryzują się szerokim, płaskim widmem (rys. 2) oraz dużą dynamiką zmian, nawet podczas jednego okresu napięcia probierczego. Stosowane wcześniej metody analizy tych sygnałów opierały się bądź to na analizie w dziedzinie czasu, bądź na analizie w dziedzinie częstotliwości. Takie podejście nie w pełni odzwierciedla specyficzny charakter wnz i dlatego w pracy [5] zaproponowano użycie metod łącznej analizy częstotliwościowo-czasowej *JTFA*. Przedstawienie rejestrowanych sygnałów na płaszczyźnie *czas-częstotliwość* pozwala nie tylko na analizę zmian widma związanych z występowaniem wylądowań niezupełnych, ale również umożliwia określenie charakteru i wielkości towarzyszących im zakłóceń. Służyć temu celowi może między innymi metoda tzw. *krótkoczasowego przekształcenia Fouriera STFT* opisanego zależnością:

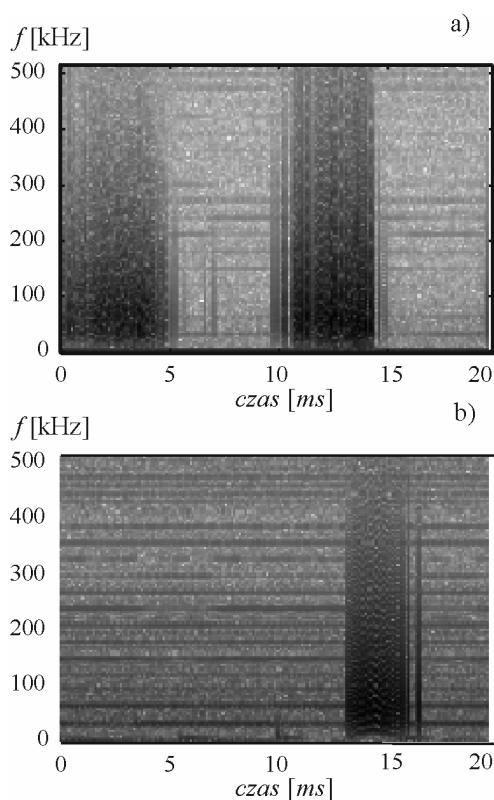
$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} w(\tau)x(t + \tau)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2)$$

gdzie:  $x(t)$  – sygnał poddawany analizie,  $w(\tau)$  – funkcja okna czasowego o wybranym rodzaju i zadanej szerokości, przesuwanego wzdłuż osi czasu  $t$ .

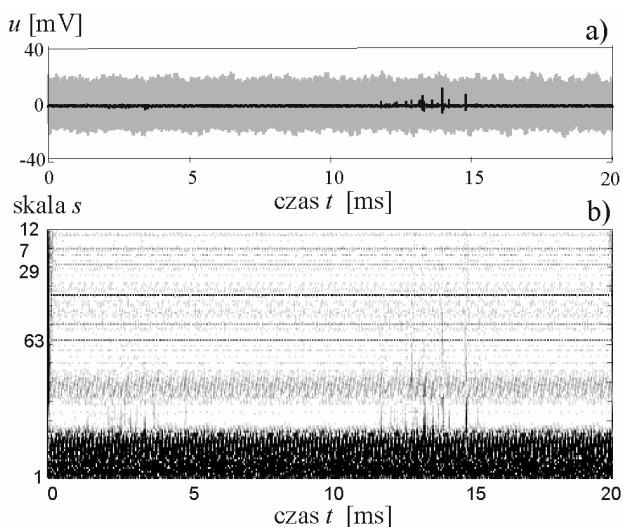
Analizowany przebieg czasowy jest dzielony na mniejsze fragmenty przez zastosowanie okna  $w(t)$ , dokonującego czasowej lokalizacji poszczególnych jego fragmentów oraz ograniczającego efekty rozmycia widma. Rysunek 5 przedstawia obrazy zmian widma sygnałów wnz

dla przypadku badania wyładowań występujących w izolacji termoutwardzalnej (5a) oraz ulotu elektrycznego w układzie modelowym ostrze/płaszczyzna (5b). Pakiet Matlab® posiada duże możliwości analizy czasowo-częstotliwościowej, a standardową funkcją bazującą na przekształceniu *STFT* jest funkcja *spektrogram* określająca czasową zmienność widmowej gęstości mocy sygnału.

Alternatywną metodą analizy *JTFA* jest zastosowanie ciągłego przekształcenia falkowego *CWT* lub dyskretnego przekształcenia falkowego *DWT*. Rysunek 6 przedstawia wyniki analizy sygnałów pomiarowych wyładowań niepełnych przy zastosowaniu przekształcenia *CWT* zaimplementowanego w pakiecie *Wavelet Toolbox* programu Matlab®.



Rys. 5. Obrazy czasowej zmienności widma różnych form wyładowań: a) wewnętrznych, b) ulotu elektrycznego w układzie modelowym ostrze-płaszczyzna



Rys. 6. Analiza wyładowań niepełnych w obecności zakłóceń wąskopasmowych z wykorzystaniem ciągłego przekształcenia falkowego *CWT*: a) przebieg zakłócony z ukrytymi wnz; b) współczynniki *CWT* wybór skali o niskiej zawartości zakłóceń

## 5. PROGRAMOWA SELEKCJA IMPULSÓW WNZ Z PRZEBIEGÓW POMIAROWYCH

Jak wspomniano wcześniej, zastosowanie oscyloskopu rejestrującego sygnały w trybie *PeakDetect* oraz implementacja procedury selekcji próbek o wartościach przekraczających określony poziom dyskryminacji *LLD* umożliwia programową realizację metody rejestracji ciągu impulsów wyładowań niepełnych. Istotnym zagadnieniem jest poprawne określenie wartości progu dyskryminacji, a także długości trwania czasu martwego *DT* (rys. 3a). Poprawne zaprogramowanie takiej procedury oraz właściwe określenie jej podstawowych parametrów demonstruje poniższy przykład, związany z realizacją algorytmu selekcji impulsów wnz zawartego w tabeli 1.

Zakładamy, że oscyloskop cyfrowy pozwala na analizę długich ciągów danych o długości  $N = 1.000.000$  próbek. Dla częstotliwości próbkowania równej 1 MHz pozwala to zarejestrować 50 kolejnych okresów napięcia probierczego 50 Hz. Jeżeli szerokość pasma detekcji impedancji pomiarowej wynosi 300 kHz to na podstawie zależności (1) określającej związek pomiędzy czasem rozdzielczym  $t_r$ , a szerokością pasma  $\Delta f$  można stwierdzić, że programowany czas martwy *DT* powinien być nie krótszy niż 10  $\mu s$  tzn. odpowiada on co najmniej 10 próbkom sygnału.

Tabela 1. Przykładowa procedura selekcji impulsów wnz

```

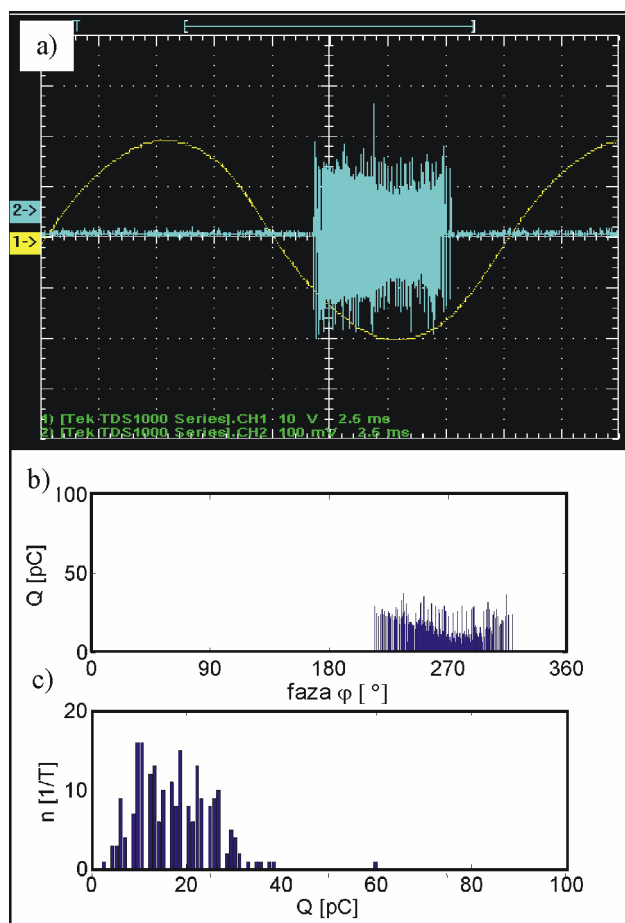
N = Długość_bufora_danych;
i = 0; % numer kolejnej próbki
u[N] % tablica zawierająca próbki
      % sygnału wnz wraz z szumami
pulses[N] % tablica z wykrytymi impulsami
LLD = Poziom_LLD;
DT = Czas_martwy; % DT wyrażony liczbą próbek

while i < N
    if u[i] > LLD
        max=abs(u[i]);
        for k=1: DT
            i=i+1;
            if abs(u[i])>max
                max=abs(u[i]);
            end
        end
        pulses[i-DT]=max;
    else
        i=i+1;
    end
end

```

Procedura wykrywa obecność impulsów wnz poprzez selekcję sygnałów przekraczających ustalany eksperymentalnie poziom odcięcia szumów *LLD*. Pierwsza próbka sygnału przekraczająca ten poziom otwiera okno czasowe o szerokości *DT* próbek, w którym poszukiwana jest próbka o największej amplitudzie (dodatniej lub ujemnej, w zależności od biegunowości impulsu wnz oraz właściwości obwodu detekcyjnego). Jej wartość jest zapisywana w odpowiedniej komórce wyjściowego bufora danych jako wartość amplitudy wykrytego impulsu wnz. Właściwy dobór poziomu odcięcia szumu *LLD* powinien eliminować impulsy przypadkowe – występujące w całym okresie napięcia probierczego i pozwalać na selekcję impulsów wnz zlokalizowanych w określonych przedziałach fazowych.

Na rysunku 7 przedstawiono: obraz sygnałów napięciowych wyładowań o charakterze ulotu elektrycznego, zarejestrowanych oscyloskopem TDS1012 podczas jednego okresu napięcia probierczego (rys. 7a) oraz uzyskane przy zastosowaniu opisanej metody rozkłady – fazowy  $Q = f(\varphi)$  (rys. 7b) i amplitudowy  $n = f(Q)$  (rys. 7c); gdzie:  $Q$  – ładunek impulsu,  $\varphi$  - faza impulsu,  $n$  - liczba impulsów.



Rys. 7. Przykład działania procedury programowej selekcji impulsów wnz: a) oscyloskopowy obraz sygnału uzyskanego z impedancji detekcyjnej, b) rozkład fazowy wykrytych impulsów wnz, c) uzyskany po przetworzeniu danych rozkład amplitudowy

## 6. PODSUMOWANIE

1. Poprawne przetworzenie sygnałów pomiarowych wnz wymaga znajomości ich właściwości czasowych, konstrukcji i parametrów opisujących właściwości układów detekcyjnych oraz wymagań dokumentów normatywnych.
2. Możliwe jest zbudowanie wirtualnego przyrządu do pomiaru i analizy wnz z zastosowaniem oscyloskopu cyfrowego oraz komputera wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie.
3. Środowisko programu MATLAB umożliwia wydajne tworzenie procedur przetwarzania i selekcji impulsów wyładowań niezupełnych. Dodatkowo, możliwe jest tworzenie i testowanie nowych procedur diagnostycznych, pozwalających na rozpoznawanie rodzajów występujących wyładowań.

## 7. BIBLIOGRAFIA

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. Boggs S., Stone G.: Fundamental limitations in the measurement of corona and partial discharge, IEEE Trans. EI, Vol. EI-27, No. 2, pp. 143-150, 1982
4. IEC-60270: High-Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements, ed.3 (2000-12)
5. Zydrón P.: Zastosowanie analizy czasowej i częstotliwościowej do badania wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia, Rozprawa doktorska, AGH Kraków, 2001

## PROCESSING AND ANALYSIS OF PARTIAL DISCHARGE PULSES USING OF THE MATLAB® PROGRAM PACKAGE

**Key-words:** partial discharges, signal analysis, Matlab® program package

The partial discharges (PD) are dynamic, non-linear phenomenon occurring in high voltage insulating system. It produces very short local current pulses connected usually with specific defects of insulating system. Detection, localization and recognition of PD sources are used in modern measuring systems for diagnostics of high voltage insulation.

Wide-band character of PD pulses and stochastic nature of PD processes lead in practice to application of many different detection and analysis methods. Suitable tool for testing and optimization of PD data processing procedures is computer connected with PD signal measuring instrument and equipped with dedicated properly prepared software.

The paper starting from basics of PD signal detection presents examples of advanced PD data processing methods implemented in Matlab® program package.