



Paweł Zydrón*

FILTRACJA CYFROWA W POMIARACH WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Streszczenie: W referacie przedstawiono krótkie omówienie zastosowania różnych rodzajów filtrów cyfrowych w pomiarach wyładowań niezupełnych w warunkach występowania zakłóceń wąskopasmowych.

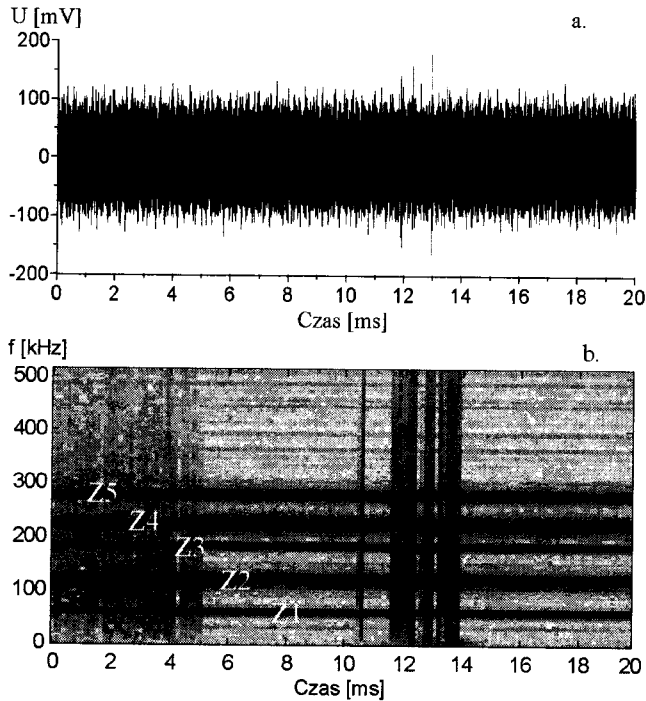
Słowa kluczowe: analiza czasowo-częstotliwościowa sygnałów pomiarowych wnz, filtracja cyfrowa, filtry adaptacyjne

1. Wstęp

Aktualne możliwości cyfrowych technik rejestracji sygnałów oraz zastosowanie metod cyfrowego przetwarzania sygnałów (DSP) pozwalają na dokładniejsze i jakościowo odmienne od tradycyjnych pomiary wyładowań niezupełnych. Pomiary takie są coraz powszechniej stosowane dla oceny jakości bądź stanu układów izolacyjnych wysokiego napięcia [1, 2]. W prezentowanym referacie zawarto krótki opis kilku rodzajów filtrów cyfrowych, które mogą być użyte dla poprawy jakości zarejestrowanych sygnałów pomiarowych zawierających zakłócenia wąskopasmowe. Poprawa ta, powodująca zwiększenie stosunku sygnał/zakłócenie (szum), polega na programowej eliminacji bądź też częściowym wytłumieniu ww zakłóceń. Dla czytelnego przedstawienia problemu na rysunku 1. zaprezentowano przykładowy sygnał pomiarowy oraz jego spektrogram w przestrzeni czas-częstotliwość. Analiza taka jest szczególnie użyteczna dla detekcji i rozpoznawania występowania wyładowań w obecności zakłóceń wąskopasmowych o dużym poziomie. Prezentowany sygnał zarejestrowano podczas pomiarów krótkiego odcinka kabla na 12 kV ze sztucznie utworzonym źródłem wyładowań (inkluzja gazowa o średnicy 3 mm oraz głębokości 0,3 mm zlokalizowana pod ekranem ochronnym kabla) w obecności zespołu zakłóceń wąskopasmowych ($Z1 \div Z5$). Rysunek 1a

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Zakład Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

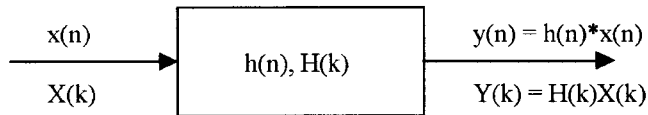
zawiera przebieg czasowy zarejestrowanego sygnału — nie jest możliwe stwierdzenie występowania wyładowań ze względu na duży poziom zakłóceń. Spektrogram STFT (ang. Short Time Fourier Transform) tego sygnału [3] (rys. 1b) uwidacznia zarówno charakter zakłóceń jak i obecność impulsów wyładowań w pierwszej i trzeciej ćwiartce napięcia probierczego. Zakłócenia wąskopasmowe są rozpoznawalne jako poprzeczne pasy o dużym poziomie czerni. Ponadto analiza czasowa amplitud widma sygnału pozwala stwierdzić, że impulsy w ujemnym półokresie napięcia są rzadsze, ale mają większą amplitudę. Dla odtworzenia ukrytych w przebiegu czasowym impulsów wyładowań należy zastosować taką filtrację, która pozwoli na eliminację zakłóceń wąskopasmowych Z1÷Z5.



Rys. 1. Przebieg czasowy (a) oraz spektrogram (b) sygnałów wyładowań rejestrowanych w odcinku kabla ze sztucznym defektem przy napięciu 6 kV

Filtracja sygnałów cyfrowych jest operacją podobną do tej jaka zachodzi w klasycznych filtrach analogowych i prowadzi ona do zmiany dyskretnej charakterystyki widmowej $X(k)$ wejściowego sygnału cyfrowego $x(n)$ przez układ filtru cyfrowego na wyjściowy sygnał cyfrowy $y(n)$ o widmie $Y(k)$ (rys 2).

Własności filtru mogą być opisane zarówno w dziedzinie dyskretnego czasu przez zdefiniowanie jego odpowiedzi impulsowej $h(n)$ jak i przez opis dyskretnej charakterystyki częstotliwościowej $H(k)$. Filtry cyfrowe mogą być projektowane jako układy realizujące algorytmy filtracji w dziedzinie częstotliwości lub w dziedzinie czasu. Współczynniki filtru mogą być opisane funkcją liniową bądź nieliniową, być zależne



Rys. 2. Wpływ parametrów filtru na sygnał wejściowy

od czasu lub nie. W przypadku filtrów zależnych od czasu ważną klasę filtrów stanowią filtry adaptacyjne, których parametry zależą od własności statystycznych samego sygnału wejściowego. W zależności od typu filtru i rodzaju zastosowanego algorytmu różna jest ich złożoność obliczeniowa oraz skuteczność pomiarowa. Badania i prace prowadzone w Zakładzie Elektroenergetyki AGH zmierzają m.in. do określenia optymalnych metod filtracji sygnałów pomiarowych, zaś poniżej zaprezentowano niektóre spośród nich.

2. Filtracja w dziedzinie częstotliwości

Metody częstotliwościowe filtracji bazują na eliminacji składowych wąskopasmowych obecnych w widmie rejestrowanego sygnału. Operacja filtracji dokonywana jest trzypiętowo (rys. 4):

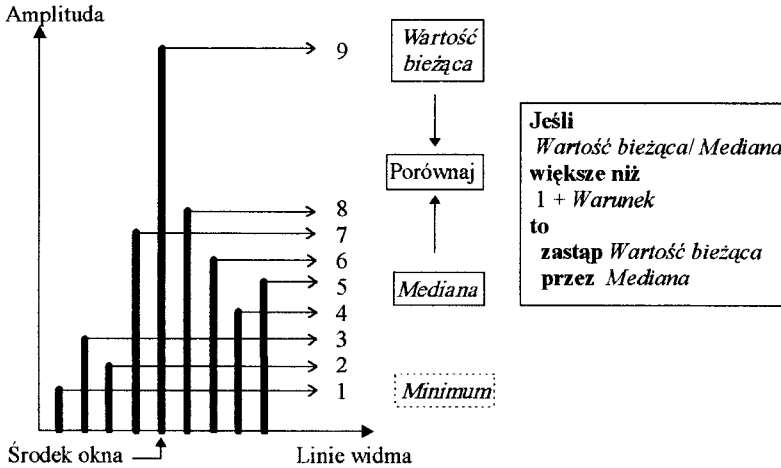
1. sygnał w postaci czasowej podlega szybkiej transformacji Fouriera (FFT),
2. w dziedzinie częstotliwości następuje wytlumienie wybranych prążków widma,
3. dane po filtracji są transformowane ponownie w dziedzinę czasu poprzez algorytm odwrotnej szybkiej transformaty Fouriera (IFFT) w wyniku czego uzyskuje się odfiltrowany przebieg czasowy sygnału.

Filtracja w dziedzinie częstotliwości wymaga dużej wydajności obliczeniowej, a jej efektywność w znacznym stopniu zależy od zastosowanego algorytmu eliminacji składowych wąskopasmowych. Można wymienić kilka różnych metod m.in.:

- I. Metodę polegającą na eliminacji tych prążków widma, których amplituda przekracza określony poziom V_{th} .
Amplituda eliminowanych prążków może być np.:
 - ustawiana na zero,
 - tłumiona o zadaną wielkość tłumienia,
 - tłumiona do zadanego poziomu.
- II. Metodę wykorzystującą zasadę pracy filtru medianowego warunkowego lub filtru minimalnego warunkowego.

Szczegółowe omówienie tych metod znaleźć można w pracy [2]. Oryginalna metoda filtracji widma przy użyciu filtru medianowego wykorzystuje wąskie, przesuwane okno, o szerokości od 15 do 25 linii, analizujące lokalne wartości amplitud widma. Jeżeli amplituda środkowej linii okna odbiega o zadany procent $\Delta\%$ od pewnej wartości charakterystycznej okna (w tym przypadku wartości medianowej) wówczas zastępowana jest przez tę wartość. Filtr ten charakteryzuje się bardzo dobrymi

własnościami adaptacyjnymi przy równoczesnej znacznej wrażliwości na rodzaj okna czasowego stosowanego przed wykonaniem FFT. Na rysunku 3 zobrazowano zasadę pracy filtru medianowego warunkowego na przykładzie okna o szerokości 9 linii. W przypadku gdy warunek procentowy jest zerowy, wówczas filtr pracuje jak prosty filtr medianowy.



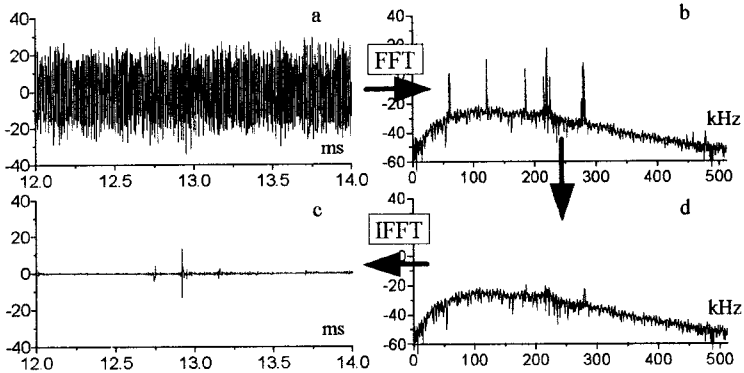
Rys. 3. Algorytm działania filtru medianowego warunkowego

Rysunek 4 przedstawia trzy etapy filtracji w dziedzinie częstotliwości z zastosowaniem filtru medianowego. Sygnał czasowy (rys. 4a) zarejestrowany w postaci cyfrowej przez system pomiarowy zostaje przetransformowany w dziedzinę częstotliwości. Analiza widma sygnału (rys. 4b) uwidacznia występowanie zakłóceń wąskopasmowych o amplitudach znacząco większych od szerokopasmowego widma impulsów wyładowań. Zakłócenia te zostają usunięte przez działanie filtru medianowego, a wynikiem tego jest widmo przedstawione na rysunku 4d. Po zastosowaniu odwrotnego przekształcenia Fouriera uzyskany wynikowy sygnał czasowy (rys. 4c) uwidacznia grupę impulsów wyładowań. Filtracja w dziedzinie częstotliwości pozwala na uzyskanie poprawy stosunku sygnał/zakłócenie o ok. 20÷30 dB przy równoczesnym dobrym odtworzeniu kształtu i amplitudy impulsów wyładowań.

3. Filtracja w dziedzinie czasu

Istnieją dwie podstawowe klasy filtrów cyfrowych opisywanych w dziedzinie czasu. Jeżeli funkcję realizowaną przez pewien układ cyfrowy zapiszemy w postaci równania różnicowego, to dla fizycznie wykonywalnych układów przetwarzania sygnału przyjmie ona postać ogólnego wyrażenia:

$$y(n) = \sum_{i=0}^M b_i x(n-i) + \sum_{i=0}^N a_i y(n-i) \quad (1)$$



Rys. 4. Praktyczny przykład działania filtru medianowego dla eliminacji zakłóceń wąskopasmowych w widmie sygnału wyładowań

gdzie: $y(n)$ – sygnał wyjściowy, $x(n)$ – sygnał wejściowy, a_i – współczynnik (waga) dla opóźnionej o i próbki $y(n)$, b_i – współczynnik (waga) dla opóźnionej o i próbki $x(n)$.

Pierwsza klasa filtrów nosząca nazwę filtrów ze skończoną odpowiedzią impulsową — SOI lub FIR (ang. Finite Impulse Response) charakteryzuje się tym, że wszystkie współczynniki a_i są równe 0. Oznacza to, że o wartości sygnału wyjściowego decydują tylko wartości próbek sygnału wejściowego. Filtry te charakteryzują się skończonym czasem trwania odpowiedzi na sygnał impulsowy oraz wynikającą z tego bezwzględną stabilnością. Drugą klasę filtrów określa się nazwą filtrów z nieskończoną odpowiedzią impulsową — NOI lub IIR (ang. Infinite Impulse Response). Funkcja realizowana przez ten typ filtru może charakteryzować się nieskończonym czasem trwania sygnału wyjściowego jako odpowiedzi na wejściowy sygnał impulsowy. W ogólnym przypadku filtr IIR opisany jest pełnym równaniem (1), zaś współczynniki b_i i a_i mogą przyjmować dowolne wartości. Filtry FIR oraz IIR o stałych współczynnikach umożliwiają efektywną eliminację zakłóceń wąskopasmowych w środowisku o znanych parametrach tych zakłóceń. Przed określeniem współczynników takiego filtru konieczne jest dokonanie analizy widma lokalnego sygnału pomiarowego oraz wyznaczenie wymaganej charakterystyki częstotliwościowej filtru [4].

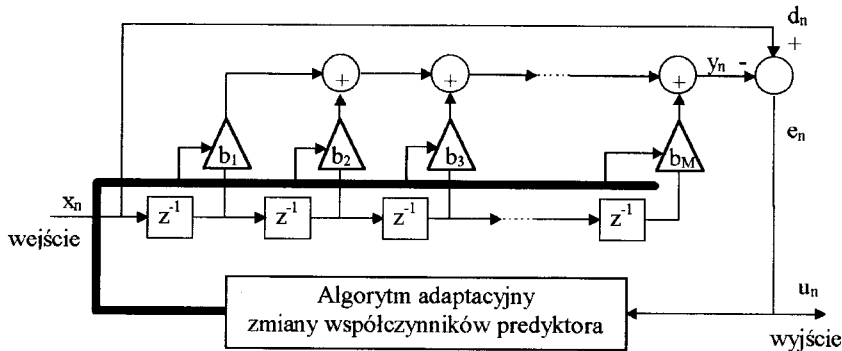
Oprócz filtrów FIR oraz IIR ze stałymi współczynnikami interesujące jest zastosowanie filtrów adaptacyjnych dopasowujących swe wagi do aktualnych parametrów sygnału. Ze względu na łatwość projektowania filtry te są budowane przede wszystkim na bazie struktury filtru FIR. Tego rodzaju filtry cyfrowe są szczególnie użyteczne dla eliminacji wąskopasmowych sygnałów zakłócających występujących podczas pomiarów wzn. W filtrze adaptacyjnym w układzie sprzężenia zwrotnego dochodzi do zmiany wartości jego współczynników zależnej od wyliczeń przeprowadzonych na podstawie m.in. bieżących wartości wektora sygnału wejściowego, a więc z uwzględnieniem statystyki tego sygnału. W czasie estymacji sygnału pomiarowego możemy mieć do czynienia z [5]:

filtracją — gdy bieżący sygnał wyjściowy jest obliczany na podstawie próbki bieżącej sygnału wejściowego oraz próbek wcześniejszych,

wygładzaniem — gdy sygnał wyjściowy jest obliczany na podstawie próbki bieżącej sygnału wejściowego oraz próbek wcześniejszych i późniejszych,

predykcją (prognozowaniem) — gdy bieżący sygnał wyjściowy jest obliczany wyłącznie na podstawie próbek poprzedzających.

Na rysunku 5 przedstawiono strukturę adaptacyjnego filtra predycyjnego, którego współczynniki b_i modyfikowane są przez pewien algorytm adaptacji ich wartości na podstawie wielkości sygnału błędu e_n (oznaczenia: x_n , d_n — sygnał wejściowy filtra; y_n — sygnał wyjściowy predyktora; e_n , u_n — sygnał wyjściowy filtra; z^{-1} — jednostkowe opóźnienie sygnału). Sygnał ten (e_n) jest równocześnie poszukiwanym sygnałem wyjściowym filtra odtwarzającym niezakłócony sygnał pomiarowy.



Rys. 5. Przykładowa struktura adaptacyjnego filtra predycyjnego

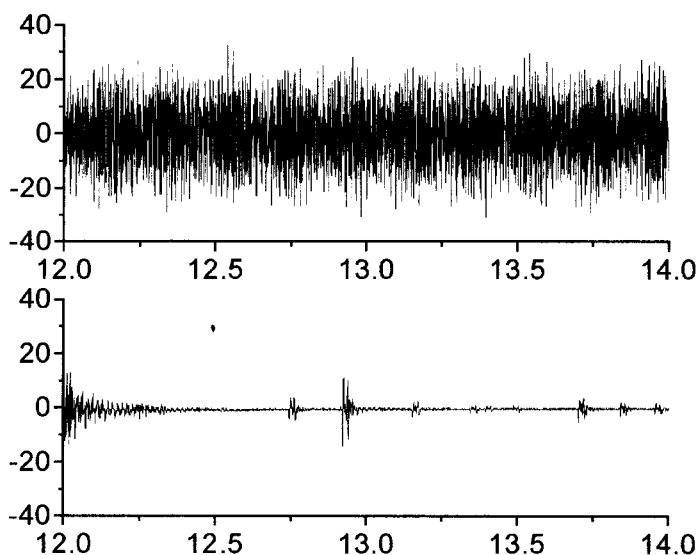
Na rysunku 6 przedstawiono przykład filtracji sygnału pomiarowego wyładowań przy użyciu adaptacyjnego filtra predycyjnego z algorytmem LMS (ang. Least Mean Squares) opisanym równaniem Widrowa-Hoffa [5]:

$$\mathbf{B}_{n+1} = \mathbf{B}_n + 2\mu e_n \mathbf{X}_n \quad (2)$$

gdzie: \mathbf{B}_n — wektor wag filtra w kroku bieżącym (n), \mathbf{B}_{n+1} — wektor wag dla kroku następnego ($n + 1$), \mathbf{X}_n — wektor próbek sygnału wejściowego w kroku bieżącym (n), e_n — sygnał błędu w kroku n , μ — zadawany parametr decydujący o stabilności, zbieżności i dokładności procesu adaptacji wag filtra.

Algorytm ten określa w kolejnych krokach procesu adaptacji nowe wartości współczynników filtra zmierzając do takiej zmiany wektora ich wartości, aby w sposób najlepszy przybliżyć wektor optymalnego filtra Wienera. Algorytm LMS jest bardzo często stosowany ze względu na swą prostotę i łatwość implementacji w systemach przetwarzania pozwalających na pracę w czasie rzeczywistym — realizowanych w oparciu o układy szybkich procesorów sygnałowych.

Wadą tego typu filtrów jest, uwidaczniająca się w sygnale wyjściowym (rys. 6b), tendencja do zaburzenia kształtu impulsów wyładowań. Powoduje to powstanie błędów określenia amplitudy impulsu oraz zmniejszenie rozdzielczości czasowej.



Rys. 6. Filtracja sygnału pomiarowego wnz przy użyciu filtru predykcyjnego a) sygnał wejściowy, b) sygnał wyjściowy

4. Podsumowanie

W referacie przedstawiono niektóre zagadnienia związane z filtracją cyfrową sygnałów zastosowaną do pomiarów wyładowań niezupełnych. Omówiono wybrane metody filtracji zakłóceń wąskopasmowych w dziedzinie częstotliwości i czasu oraz zaprezentowano praktyczne efekty ich zastosowania. Właściwy dobór algorytmów przetwarzania danych pomiarowych umożliwia wykonywanie badań układów elektroizolacyjnych nawet w warunkach występowania znacznych zakłóceń. Zaprezentowane metody są wykorzystywane w jednym z systemów pomiarowych opracowanych w Zakładzie Elektroenergetyki AGH dla potrzeb diagnostyki układów izolacyjnych wysokiego napięcia [6].

Literatura

- [1] **Ward B. H.:** *Digital techniques for partial discharge measurements — A report on the activities of the working group on digital analysis of partial discharges.* IEEE Trans. PWRD, Vol. 7, No. 2, pp. 469–479, 1995
- [2] **Zydrón P.:** *Zastosowanie analizy czasowej i częstotliwościowej do badania wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia.* Rozprawa doktorska (skrypt), Kraków 1997
- [3] **Cohen L.:** *Time-frequency distributions — A review.* Proc. IEEE, Vol. 77, No. 7, pp. 941–981, 1989
- [4] **Köpf U., Feser K.:** *Rejection of narrow-band noise and repetitive pulses in on-line PD measurements,* IEEE Trans. DEI, Vol. 2, No. 6, pp. 1180–1191, 1995

- [5] **Haykin S.**: *Adaptive filter theory*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1986
- [6] **Włodek R, Zydrón P.**: *Rozpoznawanie sygnałów wyładowań niezpełnych dla celów diagnostyki urządzeń wysokiego napięcia*, IW-94 II Krajowe Sympozjum „Inżynieria Wysokich Napięć”, s. 227–232, Kiekrz, 1994

DIGITAL FILTERING IN PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENTS

Some aspects of different digital signal filtering methods for partial discharge measurements under narrowband disturbances conditions have been presented in the paper. Methods of filtering in frequency and time domain including adaptive filtering method are shortly described and shown in selected examples.

Część prac i badań prezentowanych w niniejszym referacie
zrealizowano w ramach Projektu Badawczego Nr: 8T10A 065 10
finansowanego przez Komitet Badań Naukowych