



JANUSZ WALCZAK, MICHAŁ LEWANDOWSKI

SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, POLAND

COMPARATIVE DISTORTION EVALUATION METHOD OF A DIGITAL FILTERING PROCESS OF THE NONSTATIONERY SIGNALS

PORÓWNAWCZA METODA OCENY ZNIEKSZTAŁCEŃ PROCESU FILTRACJI CYFROWEJ SYGNAŁÓW NIESTACJONARNYCH

Abstract

In this paper a method of comparative evaluation of phase distortions of nonstationery signals band filtering is described. IIR and FIR filters in their classical form and with delay compensation were evaluated. As a reference filter a zero-phase filter with amplitude characteristic identical with the tested filter were used. As a measure of distortions introduced by the filtering process, a quality factor based on the definition of Sobolev's norm was proposed. As an example application of the method a distortion evaluation of one of the EEG band decomposition filters was presented.

Wstęp

Filtracja pasmowa sygnałów niestacjonarnych znajduje duże zastosowanie w inżynierii biomedycznej [1], w szczególności w analizie sygnałów EEG. Sygnał EEG (elektroencefalogram) jest wielokanałowym sygnałem elektrycznym będącym zapisem bioelektrycznej aktywności mózgu. Analiza tego sygnału jest obecnie powszechnie stosowaną metodą w nieinwazyjnej diagnostyce i terapii medycznej. Rozwinięto wiele metod analizy i klasyfikacji sygnałów EEG. Metody te bazują zarówno na bezpośredniej obserwacji sygnałów EEG w dziedzinie czasu jak i na stosowaniu zaawansowanych przekształceń matematycznych sygnałów, takich jak transformaty falkowe czy analiza składowych niezależnych (ICA) [2]. W wielu przypadkach przed przystąpieniem do właściwej analizy sygnału EEG, celowy jest jego podział na pewne charakterystyczne podpasma: delta (0.3-3Hz), theta (4-7Hz), alpha (8-13Hz), beta (14-30Hz) [3], które odzwierciedlają fizjologiczne stany aktywności mózgu. Podziału tego można dokonać różnymi metodami [3] [4], jednakże ze względu na bardzo dużą popularność w środowisku medycznym analizy sygnału EEG na podstawie bezpośredniej obserwacji przebiegu czasowego, duże znaczenie praktyczne ma bezpośrednia filtracja przy pomocy filtrów typu SOI i NOI. Filtracja w dziedzinie czasu jest również powszechnie wykorzystywana do wstępnego ograniczenia pasma zarejestrowanego sygnału EEG do interesującego zakresu (np. 0.3-30 Hz). Oprogramowanie realizujące ww. filtrację posiada w swoich zestawach wiele firm produkujących stanowiska do diagnostyki EEG i biofeedback'u (np.: „Elmiko” – Polska, „Alien” – Czechy, „Brainmaster” – USA) Istnieją również pakiety oprogramowania naukowo-badawczego służącego do

analizy sygnałów EEG, współpracujące z językami programowania wysokiego poziomu, np. pakietem MATLAB [2]. Przy bezpośredniej analizie sygnałów w dziedzinie czasu istotne jest, aby zniekształcenia wnoszone przez zastosowane filtry możliwie jak najmniej zmieniały kształt sygnałów, gdyż diagnoza jest dokonywana właśnie na podstawie analizy tego kształtu (m.in.: położenia i wielkości ekstremów sygnału, stromości zbroczy, występowanie składowych przejściowych). Wstępnej analizie porównawczej zniekształceń procesu filtracji sygnałów EEG z wykorzystaniem klasycznych filtrów SOI i NOI i wskaźnika jakości opartego na normie średniokwadratowej poświęcona była praca [5]. Artykuł niniejszy poświęcony jest analizie zniekształceń procesu filtracji sygnałów EEG zarówno z wykorzystaniem klasycznych filtrów NOI i SOI a także tych filtrów z programową korektą opóźnienia. Do oceny zniekształceń procesu filtracji zastosowano wskaźnik oparty na normie Sobolewa.

1. PROCEDURA BADANIA ZNIEKSZTAŁCEŃ PROCESU FILTRACJI

1.1 Opis ogólny procedury

Przy wyznaczaniu zniekształceń wnoszonych przez badane filtry, posłużono się procedurą badawczą przedstawioną schematycznie na rys.1. Testowy sygnał EEG oznaczony jako $x[i]$ jest filtrowany jednocześnie przez filtr odniesienia H oraz przez filtr poddawany badaniu G . Wynikiem filtracji są dwa sygnały: sygnał referencyjny $y_0[i]$ i sygnał $y[i]$. W oparciu o te sygnały jest następnie wyznaczany wskaźnik zniekształceń D , bazujący na definicji normy Sobolewa sygnałów. Dla sygnałów czasowo-ciągłych wskaźnik ten określa wzór:

$$D = \sqrt{\frac{\int_0^T \sum_{k=0}^n \alpha_k (D^{(k)} [y(t) - y_0(t)])^2 dt}{\int_0^T \sum_{k=0}^n \alpha_k (D^{(k)} [y_0(t)])^2 dt}}, \quad (1)$$

gdzie:

$D^{(k)}$ – symbol operacji pochodnej k -tego rzędu,
 $k=0,1 \dots n$,
 α_k – nieujemne współczynniki wagi,
 T – czas obserwacji sygnału.

Publishing info:

Walczak J., Lewandowski M.: "Porównawcza metoda oceny zniekształceń procesu filtracji cyfrowej sygnałów niestacjonarnych", Proceedings of XXVIII IC SPETO Conference, vol. II, Ustron, May 2005, , pp. 375-378

(If you like it please make a citation!)

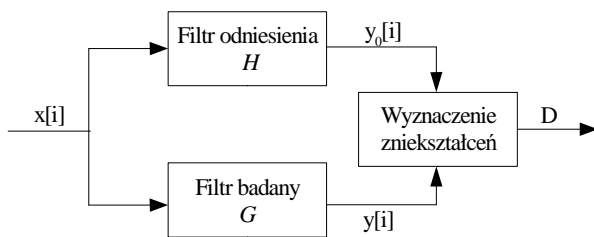
Dla sygnałów czasowo-dyskretnych wzór (1) przyjmuje postać:

$$D = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^n \sum_{i=1}^m \alpha_k (\Delta^{(k)} [y[i] - y_0[i]])^2}{\sum_{k=0}^n \sum_{i=1}^m \alpha_k (\Delta^{(k)} [y_0[i]])^2}}, \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta^{(k)}$ – różnica k-tego rzędu,
 i – numer próbki sygnału.

Norma Sobolewa w dziedzinie czasu stanowi miarę wartości średniokwadratowej sygnału i jego pochodnych do n-tego rzędu włącznie ze współczynnikami wagi α_k .



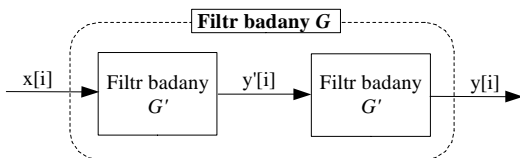
Rys.1. Metoda wyznaczania zniekształceń filtracji.

Wynika stąd, że wskaźnik D stanowi względną miarę sygnału różnicowego układu z rys. 1 i jego pochodnych, określa zatem zniekształcenia procesu filtracji. Wskaźnik ten będzie równy zero, gdy sygnały $y_0[i]$ i $y[i]$ będą takie same, jego wartość natomiast będzie tym większa, im różnica między sygnałami będzie większa.

1.2 Charakterystyka filtrów

1.2.1 Badane filtry klasyczne

Strukturę filtru badanego (por. rys.1) pokazano na rys.2.



Rys.2. Ogólna struktura filtru badanego G.

Widoczna na rysunku struktura filtru badanego G składa się z szeregowego połączenia dwóch identycznych filtrów G' . Połączenie takie jest konieczne w celu uzyskania identycznej charakterystyki amplitudowej jak dla filtru odniesienia, wewnątrz którego również zachodzi podwójna filtracja przez ten sam filtr G' (rys. 3). Dokładny opis filtru odniesienia umieszczono w dalszej części artykułu.

Jako filtry będące elementami układu z rys. 2 (filtry G') wykorzystano następujące klasyczne filtry cyfrowe:

- Filtry Butterworth'a

Z założenia jest to aproksymacja maksymalnie płaska w paśmie przepuszczania i monotoniczna poza nim. Filtry te posiadają lepszą dynamikę i wnoszą mniejsze zniekształcenia fazowe niż filtry eliptyczne, mają jednak mniejszą stromość charakterystyki modułu wzmocnienia przy tym samym rzędzie filtru. Dodatkowo ich

charakterystyka modułu wzmocnienia nie posiada zafalowań.

- Filtry eliptyczne

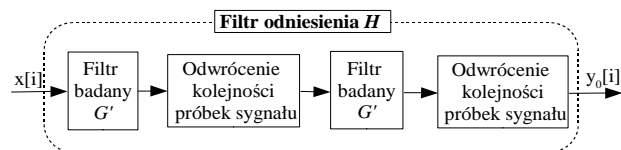
Filtry tego typu posiadają maksymalną stromość nachylenia charakterystyki modułu wzmocnienia kosztem zafalowań zarówno w paśmie zaporowym jak i paśmie przepuszczania. Ta stromość charakterystyki powoduje, że są one chętnie stosowane w sytuacjach, gdzie konieczna jest minimalizacja opóźnień sygnału wnoszonych przez filtr (systemy czasu rzeczywistego). Podstawową wadą tej grupy filtrów jest ich nieliniowa charakterystyka fazowa, co wnosi dodatkowe zniekształcenia do filtrowanego sygnału i może w istotny sposób zmienić jego kształt. Ze względu na swoją nieliniowość zniekształcenia te nie mogą być skompensowane w sposób omówiony przy filtrach SOI. Dodatkową wadą tych filtrów jest ich stosunkowo długi czas ustalania, co również może w istotny sposób wpływać na kształt przenoszonego sygnału.

- Filtry SOI o liniowej fazie

Do podstawowych zalet tych filtrów zaliczyć należy brak wprowadzania do sygnału nieliniowych zniekształceń fazowych oraz dobre własności dynamiczne. Dodatkowo powstałe w trakcie filtracji liniowe przesunięcie fazowe, może zostać w prosty sposób skompensowane przez przesunięcie sygnału na wyjściu o stałą ilość próbek (opóźnienie grupowe jest stałe). Do wad tego typu filtrów należy zaliczyć wysoki rząd filtru (a więc i znaczne opóźnienie sygnału wyjściowego względem wejściowego) przy danym nachyleniu charakterystyki modułu wzmocnienia, co może utrudniać lub wręcz uniemożliwiać ich zastosowanie w systemach czasu rzeczywistego (np. biofeedback).

1.2.2 Filtr odniesienia

Budowa idealnego filtru, który mógłby zostać użyty jako filtr odniesienia, nie jest możliwa [6] (jako filtr idealny należy rozumieć taki, dla którego wzmocnienie w paśmie przenoszenia wynosi 1 a poza tym pasmem 0 i nie wprowadza on żadnych zniekształceń fazowych). Z tego względu do otrzymania sygnału referencyjnego $y_0[i]$ zdecydowano się zastosować filtr o strukturze przedstawionej na rys. 3.



Rys.3. Ogólna struktura filtru odniesienia H.

Struktura ta jest bardzo podobna do struktury filtru badanego G przedstawionego na rys. 2. Zawiera szeregowe połączenie dwóch identycznych filtrów G' z tą jednak różnicą, że pomiędzy filtry G' wprowadzono dodatkowy blok dokonujący odwrócenia kolejności próbek filtrowanego sygnału. Można wyказаć [7], że taka operacja powoduje całkowitą kompensację w drugim filtrze G' zniekształceń fazowych wprowadzonych w pierwszym filtrze G' , w wyniku czego sygnał $y_0[i]$ jest pozbawiony zniekształceń fazowych (zachodzi filtracja z zerowym przesunięciem fazowym). Filtry G i H mają więc taką samą charakterystykę amplitudową (oba zawierają szeregowe połączenie dwóch filtrów G'), natomiast filtr H (z powodu odwracania kolejności próbek sygnału przed drugim filtrem G' (rys. 3)) posiada zerową fazę.

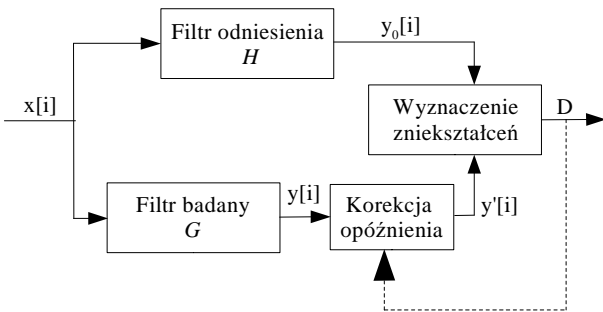
Publishing info:

Walczak J., Lewandowski M.: "Porównawcza metoda oceny zniekształceń procesu filtracji cyfrowej sygnałów niestacjonarnych", Proceedings of XXVIII IC SPETO Conference, vol. II, Ustroń, May 2005, , pp. 375-378

(If you like it please make a citation!)

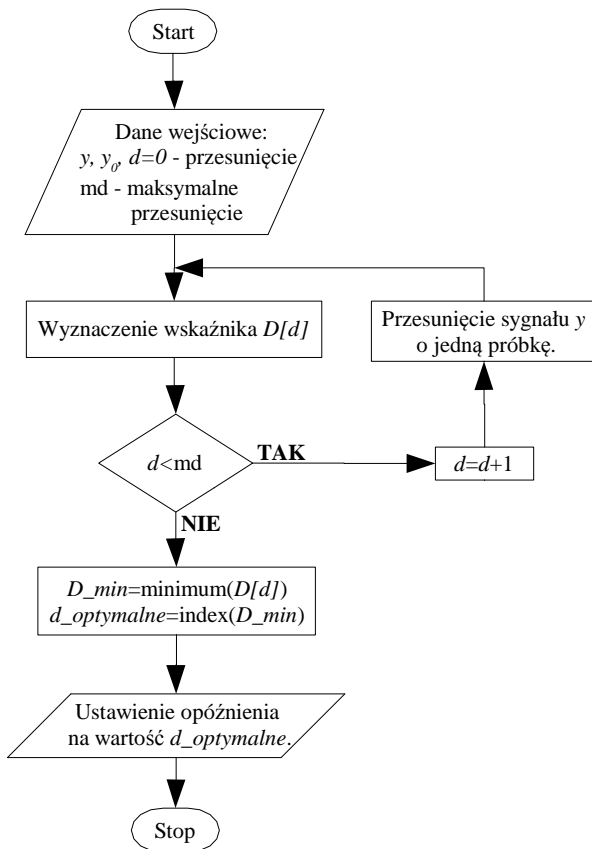
1.2.3 Filtry z programową korekcją opóźnienia

Klasyczne filtry cyfrowe wprowadzają przesunięcie fazy między sygnałem wejściowym i wyjściowym [6]. Przesunięcie to można wyeliminować stosując procedurę filtracji z zerową fazą (rys. 3), jednakże procedura ta nie może być efektywnie stosowana w czasie rzeczywistym ze względu na operację odwracania wektora próbek sygnału. Z tego względu podjęto próbę prostej korekcji przesunięcia fazy wprowadzanej przez filtr badany G , polegającą na wprowadzeniu przesunięcia sygnału $y[i]$ o stałą ilość próbek, co odpowiada liniowej korekcji fazy. Układ wzbogacony o człon korekcji opóźnienia przedstawiono na rys.4.



Rys.4. Układ z dodaną korekcją opóźnienia wyznaczaną na podstawie wskaźnika D .

Wartość przesunięcia jest stała i optymalna w rozumieniu wskaźnika D , a do jej wyznaczenia zastosowano procedurę przedstawioną na rys.5.



Rys.5. Schemat blokowy algorytmu wyznaczania wartości opóźnienia optymalnego.

Procedura przedstawiono na rys.5 w pierwszym kroku wyznacza wektor wskaźników zniekształceń $D[d]$ będący funkcją opóźnienia sygnału d . Maksymalna wartość opóźnienia md jest równa maksymalnemu opóźnieniu grupowemu filtru badanego G . Następnie znajdujemy minimum wektora $D[d]$. Indeks d dla minimalnej wartości wskaźnika D stanowi optymalną wartość korekcji opóźnienia dla danego sygnału $x[i]$.

2. BADANIA

2.1 Sygnały testowe

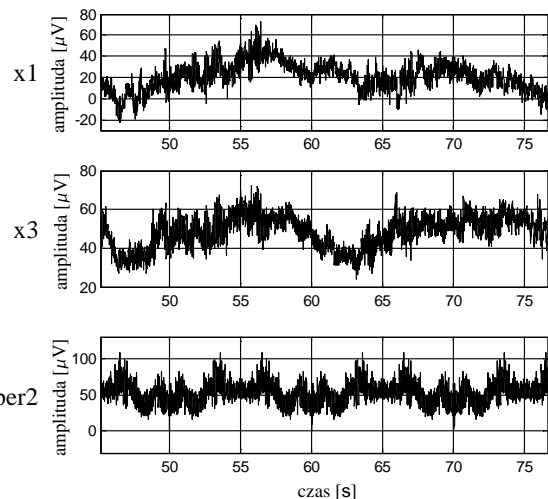
W badaniach zastosowano cztery sygnały testowe, których parametry zestawiono w tabeli 1. Występujące w tabeli oznaczenia elektrod Fz, Cz i Pz są zgodne z międzynarodowym standardem rozmieszczania elektrod o nazwie: 10-20 i odpowiadają odpowiednio elektrodom: czołowej, centralnej i potylicznej.

Tabela 1

Charakterystyka zastosowanych sygnałów testowych.

per1	Sygnał prostokątny unipolarny o okresie 0.2 Hz, amplitudzie 1 i czasie trwania 100 s.
x1	Sygnał z elektrody Fz, o czasie trwania 125 s.
x2	Sygnał z elektrody Cz, o czasie trwania 125 s.
x3	Sygnał z elektrody Pz, o czasie trwania 125 s.
per2	Sygnał okresowy o okresie 0.2 Hz, utworzony z fragmentu sygnału x1.
Częstotliwość próbkowania dla wszystkich sygnałów jest taka sama i wynosi 200 Hz.	

Aby umożliwić oszacowania wnoszonych przez filtry zniekształceń dynamicznych uwzględniono zarówno sygnały stacjonarne (sygnały okresowe: per1 i per2) jak i sygnały niestacjonarne, będące rejestracją sygnału EEG człowieka zdrowego (sygnały: x1, x2, x3).



Rys.6. Fragmenty przebiegów czasowych wybranych sygnałów testowych (opis w tabeli 1).

Fragmenty wybranych przebiegów czasowych sygnałów testowych zaprezentowano na rys.6.

Publishing info:

Walczak J., Lewandowski M.: "Porównawcza metoda oceny zniekształceń procesu filtracji cyfrowej sygnałów niestacjonarnych", Proceedings of XXVIII IC SPETO Conference, vol. II, Ustronie, May 2005, , pp. 375-378

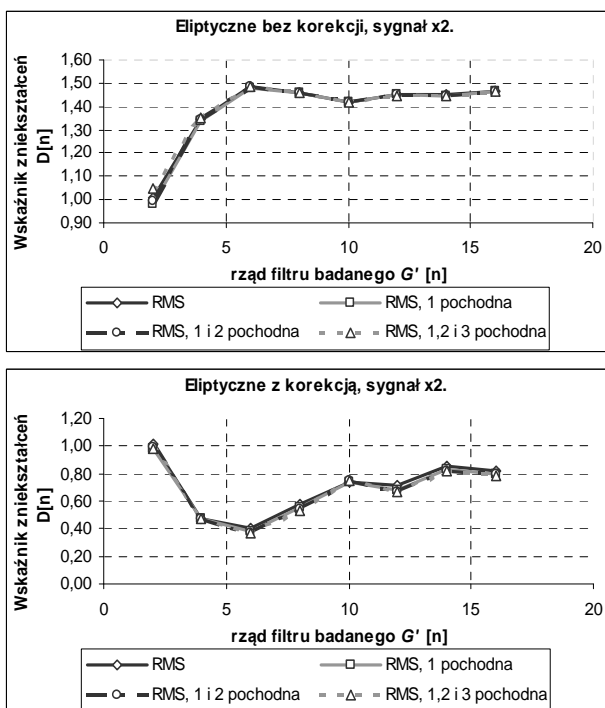
(If you like it please make a citation!)

2.2 Wyniki badań

Z przeprowadzonych badań procesu filtracji sygnałów testowych (por. tabela 1) dla pasma beta, wynikają następujące wnioski:

- Wartości wskaźnika zniekształceń D (2) praktycznie nie zależą od użytych sygnałów testowych i od tego, czy do oceny procesu filtracji użyto normy średniokwadratowej ($\alpha_0=1, \alpha_1=0, \alpha_2=0, \alpha_3=0$, por. wzory (1), (2)) czy też normy Sobolewa z uwzględnieniem pochodnych przebiegów ($\alpha_0=1, \alpha_1=1, \alpha_2=1, \alpha_3=1$), niezależnie od rodzaju filtru typu NOI.
- Dla filtrów Butterworth'a i eliptycznych bez korekcji opóźnienia, wskaźnik D jest sigmoidalną rosnącą funkcją rzędu filtru n , osiagającą nasycenie dla $n=6$.
- Dla filtrów Butterworth'a i eliptycznych z korekcją opóźnienia, wartość wskaźnika D jest unimodalną funkcją rzędu filtru n , przyjmującą wartość minimalną dla $n=6$.
- Dla filtrów typu SOI bez korekcji opóźnienia, wartości wskaźnika D nie zależą od przyjętych współczynników wagi (por. (1), oraz wniosek a)), zależą natomiast silnie od rodzaju użytych sygnałów testowych. Są one multimodalnymi funkcjami rzędu filtru o nieregularnie rozłożonych ekstremach.
- Dla filtrów SOI z korekcją, niezależnie od użytych sygnałów testowych (z uwagi na liniowość charakterystyk fazowych tych filtrów) uzyskuje się pełną kompensację zniekształceń a wyznaczony wskaźnik D jest równy zero. Dla pozostałych typów filtrów minimalna wartość wskaźnika D wynosi około 0.4 dla filtrów eliptycznych szóstego rzędu z korekcją opóźnienia i odpowiednio 0.33 dla filtrów Butterworth'a szóstego rzędu z korekcją opóźnienia.

Przykładowe wykresy zależności wskaźnika D od rzędu filtru n dla filtrów eliptycznych przedstawiono na rys.7.



Rys.7. Przykładowe wykresy zależności wskaźnika D od rzędu filtru n .

Kompleksowy przegląd zależności $D[n]$ dla różnych typów filtrów zostanie zaprezentowany na konferencji.

3. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania umożliwiają uszeregowanie testowanych filtrów pod względem wnoszonych do sygnału zniekształceń w rozumieniu zaproponowanego wskaźnika opartego na normie Sobolewa. Najlepsze wyniki dla wszystkich rodzajów filtrów uzyskano przy zastosowaniu korekcji opóźnienia filtru. W przypadku filtrów SOI pozwala to zredukować wskaźnik D do zera, natomiast w przypadku filtrów Butterworth'a i eliptycznych znacznie go obniżyć. Badania wykazały, że dla pasma beta i zastosowanych filtrów NOI minimum zniekształceń występuje nie dla filtrów o najniższym rzędzie ale dla filtrów szóstego rzędu i jest niższe dla filtrów Butterwortha niż dla filtrów eliptycznych.

4. LITERATURA

- Branzino J.D.: *The Biomedical Engineering Handbook*. Electrical Engineering Handbook, vol. 16, University of California, Davis, USA
- Delorme A., Makeig S.: *EEGLAB: An Open Source Toolbox for Analysis of Single-trial EEG Dynamics Including Independent Component Analysis*. Journal of Neuroscience Methods 134, 2004, pp. 9-21
- Principe J.C., Smith J.R., Balakrishnan S.K., Paige A.: *Microcomputer-Based Digital Filters for EEG Processing*. IEEE Transactions on Acoustic, Speech and Signal Processing, 1979, vol. ASSP-27, No. 6, pp. 697-705.
- Ruey-Song Huang, Ling-Ling Tsai, Chung J. Kuo.: *Selection of Valid and Reliable EEG Features for Predicting Auditory and Visual Alertness Levels*. Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(B), 2001, Vol. 25, No. 1, pp. 17-25.
- Walczak J., Lewandowski M., *Multiband Decomposition of EEG Signals*. Proc. of the X-th Conference : Applications of Computers in Electrical Engineering – ZKwE'05, Poznań, 2005.
- Lyons Richard G.: *An Introduction to Digital Signal Processing*. Warszawa: WKŁ, 2000.
- Oppenheim, A.V., Schaffer R.W.: *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice-Hall, 1989, pp. 311-312.

prof. dr hab. inż. Janusz WALCZAK

email: janusz.walczak@polsl.pl

mgr inż. Michał LEWANDOWSKI

email: michal.lewandowski@polsl.pl

INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI
TEORETYCZNEJ I PRZEMYSŁOWEJ
POLITECHNIKA ŚLĄSKA,
ul. Akademicka 10,
44-100 GLIWICE, POLSKA

Publishing info:

Walczak J., Lewandowski M.: "Porównawcza metoda oceny zniekształceń procesu filtracji cyfrowej sygnałów niestacjonarnych", Proceedings of XXVIII IC SPETO Conference, vol. II, Ustroń, May 2005, , pp. 375-378

(If you like it please make a citation!)