

ASPECTE PRIVIND PROCESAREA SEMNALELOR CARE APAR LA TESTAREA PRODUSELOR MECANICE PE STANDURI DE ÎNCERCARE

S. Sisca, G. Mogan

Universitatea Transilvania din Braşov

1. INTRODUCERE

În prezent pentru a scurta timpul de dezvoltare al unui produs mecanic nou sau de alt tip este necesar ca în ciclul de dezvoltare al produsului să se introducă etape de testare încă din faza de proiectare. Informațiile obținute în aceste etape sunt folosite pentru a studia comportarea și performanțele viitorului produs și pentru a corecta, înlătura sau ameliora eventualele deficiențe în design-ul acestuia încă din faza de prototip. Pentru o folosire cât mai eficientă a acestor informații au fost elaborate diverse tipuri de metode de lucru care să înglobeze faze de testare virtuală și reală [1], [2], [3] corespunzătoare diverselor stadii din ciclul de dezvoltare al produsului.

Datele obținute în urma fazelor de testare pe standuri de încercare au la bază, de regulă, semnale analogice sau digitale preluate de către senzorii montați în sistemul produs de încercat-stand. De cele mai multe ori aceste semnalele sunt perturbate de diverși factori (electrici, mecanici, de mediu etc.) care fac ca informațiile utile să fie amestecate cu unele eronate sau forma lor brută nu permite extragerea directă a informațiilor utile. În aceste cazuri se folosesc metode și algoritmi de procesare a semnalelor pentru a se putea evidenția (separa) datele utile culese de la senzori. În această lucrare se va prezenta o nouă metodă de procesare a semnalelor bazată pe teoria wavelet-urilor aplicată la testarea produselor mecanice cu mișcare de rotație.

2. STAND MODULAR DE TESTARE A PRODUSELOR MECANICE CU MIȘCARE DE ROTAȚIE ȘI PROCESAREA SEMNALELOR ACHIZIȚIONATE

Standul de testare, modular (fig. 1), folosit pentru încercări experimentale ale produselor mecanice cu mișcări de intrare și de ieșire de rotație (cuplaje, reductoare, transmisii cu elemente flexibile etc.) existent în laboratorul de Robotică și Realitate Virtuală din Universitatea Transilvania din Braşov compus din: două servo- motoare

Siemens fără perii, primul (poz. 1) este folosit pentru antrenarea (încărcarea) produsului de testat, cel de-al doilea (poz. 2) este folosit pentru simularea încărcărilor exterioare ce pot apărea în mediul real, senzori de turație și moment (poz. 4 și 5), convertoarele de putere PWM (poz. 6), sistem de control și achiziție (poz.7). În figura 1 se prezintă structura acestui stand configurat pentru testarea unui reductor cicloidal cu bolțuri (poz. 3). Pornind de la caracteristicile teoretice ale reductorului și ținând cont de scopul pentru care a fost conceput s-a implementat un program de testare care să cvasireproducă regimul real de funcționare al acestuia prin intermediul servosistemelor antrenor (motor) 1 și a celui antrenat (de frânare) 2.

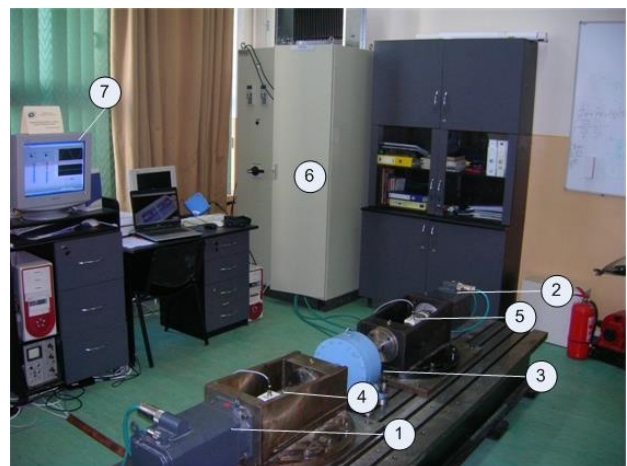


Figura 1. Stand modular de testare a produselor mecanice cu mișcare de rotație.

Pentru determinarea performanțelor acestuia au fost utilizate metodele clasice utilizate în procesarea de semnale ce includ operații ca: medierea, netezirea, diferențierea, transformarea Fourier. Aceste operații utilizând

diverși algoritmi sunt folosite pentru a filtra semnalele afectate de zgomote în vederea reconstituirii acestora pentru analize spectrale, transformări timp-frecvență etc.

Totuși aria de aplicabilitate a acestor metode este restrânsă deoarece pot fi utilizate doar dacă parametrii ce caracterizează natura semnalelor procesate – ca SNR (signal to noise ratio), rata de eșantionare, lungime etc. - îndeplinesc anumite cerințe. De exemplu, în cazul analizei spectrale a

semnalelor cea mai folosită și cunoscută metodă este transformata Fourier care poate furniza informații valoroase privind amplitudinile diferitelor frecvențe ce compun un semnal. În cazul în care nu se respectă anumite cerințe privind lungimea semnalului analizat și/sau a frecvenței de eșantionare rezultatele obținute în urma analizei sunt eronate.

Alte diferențe ce pot apărea între semnalul real și rezultatele obținute în urma analizei cu transformata Fourier țin exclusiv de modul de implementare a algoritmului de calcul, care induce un defazaj de $\pi/2$ și la o înjumătățire a amplitudinii rezultante.

3. METODA WAVELET FOLOSITĂ LA PROCESAREA SEMNALELOR

Pornind de la proprietățile transformatei Fourier și de la limitările menționate mai sus, diverși matematicieni au încercat să găsească alte modalități de reprezentare a semnalelor [5], [6] având la bază spații ortogonale care permit extinderea domeniului de analiză în frecvență clasic.

Dacă în cazul analizei în frecvență a semnalelor folosind transformata Fourier fiecare funcție pătratică integrabilă de perioadă 2π , ce aparține spațiului $L^2(0, 2\pi)$, este reprezentată prin suprapunerea unor serii de funcții exponențiale complexe de tipul

$$w_n(x) = e^{inx}, \quad (1)$$

în care, $n = 0, \pm 1, \dots$.

Pentru transformata de tip wavelet, ideea de bază constă în reprezentarea semnalului prin extensia la spațiul $L^2(\mathcal{R})$ [4], iar transformarea să se facă printr-o funcție de tipul

$$\psi_{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{x-a}{a}\right), \quad (2)$$

în care: $a > 0$, $-\infty < b < \infty$.

Funcția ψ denumită funcție mamă (mother wavelet) reprezintă forma generică pentru funcțiile de tip (2), parametrii a și b luând, de regulă, valorile:

$$a = 2^{-j}, \quad b = k2^{-j}$$

cu $j, k \in \mathbb{Z} = \{0, \pm 1\}$.

Funcțiile definite cu relația (2) au aplicabilitate în diverse domenii: analize statistice [4], meteorologie [9], imagistică medicală [10], mecatronică [11] etc. Varietatea mare de domenii,

fiecare cu particularitățile și cerințele specifice în ceea ce privește analiza semnalelor, care folosesc acest tip de transformată au condus la apariția mai multor tipuri de funcții mamă care au fost definite în funcție de caracteristicile lor și personalizate prin numele cercetătorului care le-a descris pentru prima oară proprietățile (de ex. Daubechies wavelets, Haar wavelets etc.).

Una dintre principale caracteristici, ale transformatelor wavelet este forma de undă de bază asociată semnalelor generate prin funcțiile mamă folosite. Această formă este definitorie în mare măsură pentru acuratețea analizei finale. Două dintre formele de undă de bază folosite frecvent în funcțiile mamă sunt prezentate în fig. 2:

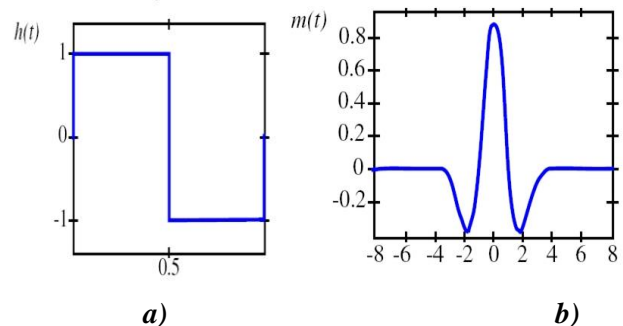


Figura 2. Forme de undă de bază: a) Haar wavelet $h(t)$; b) pălărie mexicană $m(t)$.

Reprezentarea sub formă de semnal a funcției mamă de tip Haar cît și cea tip pălărie mexicană (fig. 3) au ca și caracteristică comună delimitarea exactă ca durată de timp, dar modul variație a amplitudinii diferă în ceea ce privește viteza de variație. Această viteză de variație face ca forma de undă a semnalului descris de funcția $h(t)$ (fig. 3, a) să fie caracterizată de schimbări bruște în unități de timp mici, recomandând-o pentru analiza semnalelor ce prezintă salturi bruște care trebuie localizate foarte precis în raport cu timpul. Caracteristicile undei descrisă de funcția $m(t)$ (fig. 3, b), cu baza de timp mărită și cu oscilații ale frecvenței mai mici, o recomandă mai mult pentru determinarea tendinței generale de continuitate a unui semnal

În cazul sistemelor mecatronice (inclusiv a standului de testare din fig.1), de regulă, semnalul de analizat este compus dintr-o succesiune de semnale de scurtă durată, în care primele semnale sunt de durată mare și cu viteză de variație redusă iar ultimele sunt scurte și cu viteză variație rapidă. Pentru a putea prelucra semnalul ca un întreg este nevoie de o reprezentare de tipul timp-frecvență care să folosească o fereastră cu intervale de timp „lungi” la începutul analizei și „scurte” la sfârșit. Astfel calculul transformatei de tip wavelet trebuie

să folosească ferestre de timp autoadaptive. Pentru aceasta se poate folosi ca funcție mamă o funcție de tipul celei descrisă în relația (2), de forma

$$\psi(s, t) = \sqrt{s} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot \psi(s(\tau - t)) d\tau, \quad (3)$$

în care, $s = \frac{\omega}{\omega_0}$, este un parametru numit factor de

scară, iar ω_0 este pulsația centrală a filtrului trece bandă utilizat [8]. Variația parametrului s permite scalarea (modificarea amplitudinii semnalului prin înmulțirea cu un factor s) funcției mamă, iar variația parametrului τ translatează funcția mamă pe toată lungimea semnalului. Dacă se înlocuiește s în relația (3) se obține

$$\psi(\omega, t) = \sqrt{\frac{\omega}{\omega_0}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot \psi\left(\frac{\omega}{\omega_0} \cdot (\tau - t)\right) d\tau \quad (4)$$

reprezentarea adaptivă de tipul timp-frecvență a semnalului de analizat.

Din punct de vedere al procesării de semnale transformata de tip wavelet este văzută ca o descompunere a semnalului original prin intermediul a două filtre trece bandă fig.3.

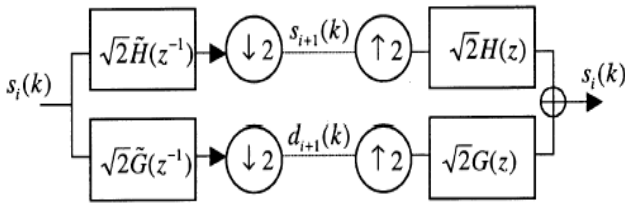


Figura 3. Descompunerea semnalului pentru reprezentarea wavelet [7].

Descompunerea semnalului $s_i(k)$ folosind transformata de tip wavelet se face în 3 etape distincte:

1) Împărțirea semnalului de analizat în două jumătăți $s_{i+1}(k)$, $d_{i+1}(k)$ trecerea acestuia prin două filtre conjugate unul trece bandă sus și altul trece bandă jos, urmând micșorarea ratei de eșantionare conform noii cantități de date pe care cele două secvențe filtrate le conțin.

2) Reunirea semnalelor $s_{i+1}(k)$, $d_{i+1}(k)$ într-un singur semnal prin reeșantionare la o rată egală cu cea din prima etapă, urmată de refiltrare și însumare pentru a obține, cel puțin teoretic semnalul $s_i(k)$ inițial.

3) Pentru verificarea transformatei wavelet, semnalul obținut trebuie să respecte condițiile de reconstituire perfectă (Perfect Reconstitution) [7]:

$$\overline{H}(z^{-1})H(z) + \overline{G}(z^{-1})G(z) = 1 \quad (10)$$

$$\overline{H}(z^{-1})H(-z) + \overline{G}(z^{-1})G(-z) = 0 \quad (11)$$

Avantajele folosirii analizei cu transformată wavelet, față de analiza cu transformata Fourier constau într-o precizie mai mare în localizarea fenomenelor tranzitorii [11] deoarece chiar și în cazul folosirii transformatei Fourier cu ferestre adaptive de timp frecvențele prea mari sau prea mici față de nivelul stabilit pentru fereastra de analiză, rezultatul este afectat de erori datorită fenomenului de alising (eșantionarea semnalelor fără respectarea teoremei lui Nyquist). Aplicațiile cele mai cunoscute ale transformatei de tip wavelet sunt cele legate de compresia semnalelor, filtrarea, eliminarea zgomotelor, detectarea și eliminarea de singularități din cadrul semnalelor.

4. ANALIZA SEMNALELOR OBȚINUTE ÎN URMA TESTĂRILOR FOLOSIND METODA WAVELET

Utilizând standul experimental din fig.1 au fost efectuate mai multe teste pentru diverse regimuri de funcționare în vederea determinării comportării dinamice pentru reductorul cicloidal cu bolțuri aflat în faza de prototip. La prima vedere semnalele achiziționate asociate parametrilor funcționali ai reductorului nu permit o analiză a comportării dinamice a produsului datorită numeroaselor armonice care perturbă semnalul asociat momentului de torsiune transmis. În fig. 4

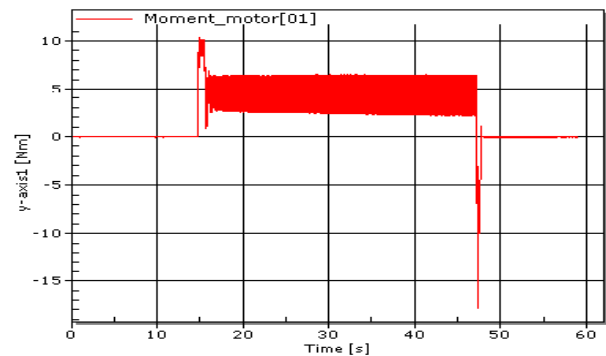


Figura 4. Semnal asociat momentului motor.

se observă că între semnalul util și perturbațiile asociate momentului de antrenare este o diferență insesizabilă (valoarea SNR-signal to noise ratio-este 5-8 dB) ceea ce face imposibilă studiarea

forme de undă a semnalului util asociat momentului de torsiune. Chiar în cazul prelucrării semnalului utilizând metode clasice, rezultatele obținute sunt distorsionate neputând fi separate de toate nivelurile de zgomote și dacă s-ar opta pentru o prelucrare a semnalului utilizând un filtru clasic s-ar pierde din acuratețea datelor de intrare, mai ales, în zonele semnalului unde apar fenomene tranzitorii de tipul porniri/opriri (fig.5). Acest lucru poate fi observat prin compararea valorilor semnalului nefiltrat asociate momentului de antrenare de pornire (fig. 5, a) cu același semnal filtrat utilizând un filtru clasic. În primul caz valoarea maximă a momentului este de 15 Nm (fig. 5, a) iar în al doilea este de 10 Nm (fig. 5, b) cu abatere neacceptabilă de 30%. Aceeași situație apare și în cazurile când sistemul funcționează în regim staționar sau în cazul opririi.

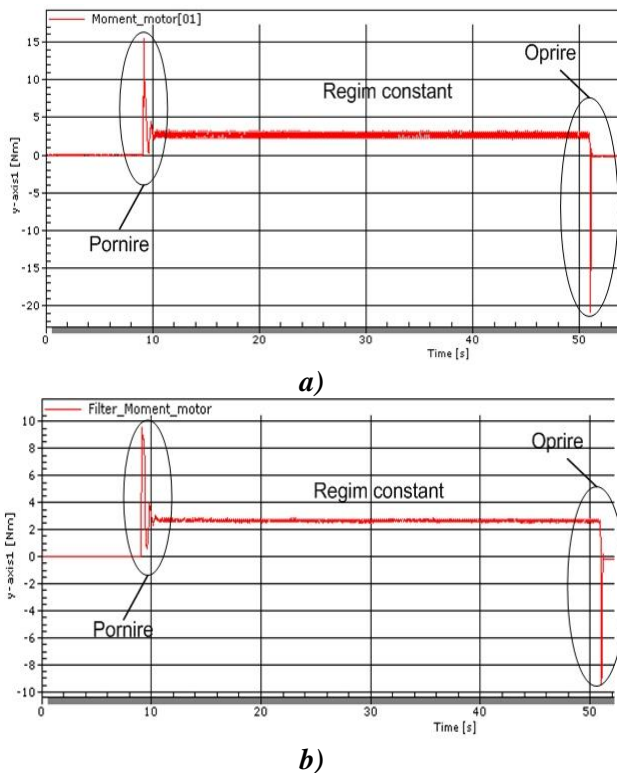


Figura 5. Comparație între semnalul a) inițial și b) filtrat clasic.

Pentru a înlătura aceste neajunsuri s-a implementat metoda prezentată în paragraful 3 în combinație cu metode de filtrare clasice. Folosind pachetul software Matlab 7.0.1 care are deja implementat un toolbox, cu algoritmi de prelucrare a semnalului utilizând metoda wavelet au fost analizate semnalele obținute în urma testărilor (fig. 4). Așa cum s-a arătat în paragraful 3 în prima etapă semnalul asociat momentului de antrenare folosit la testarea reductorului studiat este descompus în elementele sale componente (fig. 6).

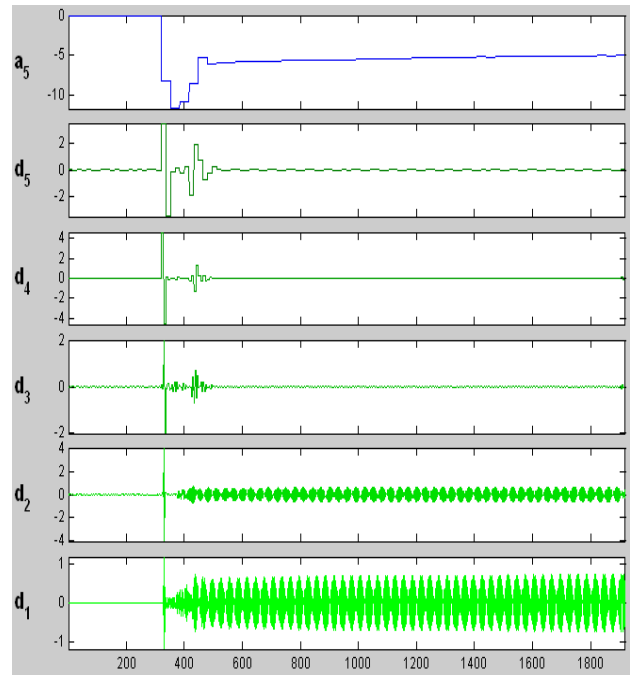


Figura 6. Componentele semnalului asociat momentului de antrenare obținute cu ajutorul metodei wavelet.

Descompunerea din fig. 6 respectă condițiile (10) și (11) de reconstituire perfectă, deoarece folosește ca și funcție mamă, funcția de tip Haar (fig. 3a). Descompunerea în semnale mai simple permite o filtrare diferențiată pe componente, a semnalului inițial astfel că semnalul rezultat are o mai mare fidelitate deoarece în acest caz elementele indesezirabile pot fi eliminate cu ușurință. Diferența între valoarea nominală și cea obținută în urma analizei wavelet este de 5%.

Un alt avantaj al metodei wavelet este legat de posibilitatea de vizualizare construită pe seama parametrilor calculați la descompunerea semnalului. După cum se poate observa din fig. 7 a), reprezentarea semnalului inițial înainte de filtrare este de forma unei imagini ce poate fi interpretată ca un semnal 2D în care zgomotele și modificările bruște ale amplitudinii semnalului asociat momentului de antrenare produc o decolorare proporțională ca intensitate cu modulul amplitudinii semnalului. Imaginea din fig. 7, b. reprezintă semnalul filtrat utilizând metoda wavelet, unde se poate observa o diminuare semnificativă a zgomotului de pe semnalul asociat momentului motor, față de situația precedentă (fig. 7, a) acesta având o pondere foarte mică în cadrul semnalului rezultat.

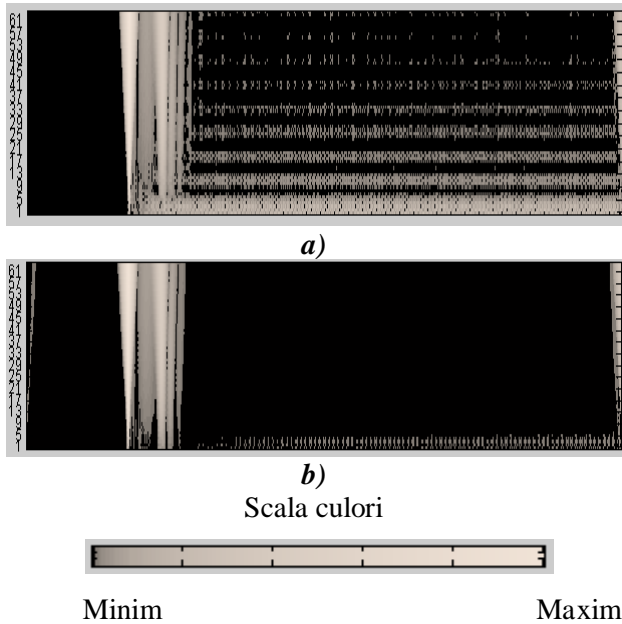


Figura 7. Reprezentare 2D a) a semnalului inițial
b) a semnalului filtrat

5. CONCLUZII

Rezultatele obținute în urma utilizării metodei wavelet în combinație cu cele clasice sunt net superioare celor obținute în cazul folosirii exclusive a metodelor clasice.

Folosirea transformatei wavelet în cazul analizei semnalelor puternic perturbate reprezintă o alternativă viabilă la metodele clasice de analiză. Folosirea Wavelet Toolbox-ului, din cadrul softului Matlab are ca avantaj integrarea rapidă a transformatei wavelet în cadrul aplicațiilor de monitorizare, diagnosticare a sistemelor dinamice simulate cu ajutorul Matlabului.

Datorită timpului de calcul mare necesar în cazul implementării software a algoritmilor necesari nu se recomandă folosirea acestei metode pentru aplicații real-time care necesită un timp de răspuns foarte mic.

O soluție a pentru a înlătura acest neajuns ar putea fi implementarea hard a acestei metode folosind un microcontroller dedicat de tip DSP (digital signal processing).

Bibliografie

1. **Gausemeier, J.** *From Mechatronics to Self-optimizing Concepts and Structures in Mechanical Engineering*; Heinz Nixdorf Institute, University of Paderborn, 2002.
2. **Bernardi, M. Bley, H.** *Integrating a Mechatronics-oriented Development Process into a Development Department*, Bernd Schmitt Institute of Production Engineering, Saarland University, 2002.
3. **Șișcă S., Mogan G.** *Stand Modular pentru Testarea Subansamblelor și Componentelor Mecanice cu Mișcare de Rotație*; p.773-780 COMEFIM 2006.
4. **Pedro A.M.** *WAVELETS IN STATISTICS*; Institute of Mathematics and Statistics; University of Sao Paulo; *The Third International Conference on Statistical Data Analysis Based on The L1 Norm and Related Methods*; Neuchatel Switzerland; August 11-15;1997.
5. **Meyer. Y.** *Wavelets_ Algoritms and Applications_ Philadelphia_ SIAM*; 1997.
6. **Daubechies, I.** *Orthonormal bases of wavelets with nite support Connection with discrete lters_ In Wavelets, Time_Frequency Methods and Phase Space. First Int. Wavelets Conf.;Marseille, , 38-66. Springer-Verlag, 1987.*
7. **Unser, M.; Blu ,T.** *Wavelet Theory Demystified, IEEE Transaction on Signal Processing, Vol. 51;pp 470-483, No. 2, February 2003.*
8. **Isar, A., Naforniță, I.** *Reprezentări Timp-Frecvență*; Editura "Politehnica"; Timișoara; 1998.
9. **Torrence, C., Compo, G. P.** *A Practical Guide to Wavelet Analysis; Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Colorado.; Bulletin of the American Meteorological Society: Vol. 79, No. 1, p. 61-78.*
10. **Unser, M.** *Splines and Wavelets: New Perspectives for Pattern Recognition*; Biomedical Imaging Group, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFLNCS 2781, pp. 244-248, Springer-Verlag Berlin Heidelberg , 2003.
11. **Singh, A., Tharian, J., Plusquellic, J.** *Path Delay Estimation using Power Supply Transient Signals: A Comparative Study using Fourier and Wavelet Analysis Proceedings of the International Conference on Computer Aided Design (ICCAD'03) 1092-3152/03; 2003.*

Aprobat spre publicare: 23.03.2007