

PROGRAMUL PARTENERIATE ÎN DOMENIILE PRIORITARE
PROIECTE COLABORATIVE DE CERCETARE APLICATIVĂ (PCCA)

RAPORTUL ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC (RST)

- Raport final -

| | |
|----------------------------------|--|
| Titlu proiect: | Model experimental pentru detecția și diagnoza schimbărilor în procese vibratorii folosind tehnici avansate de măsurare și analiză bazate pe model |
| Cod proiect: | PN-II-PT-PCCA-2013-4-0044 |
| Acronim proiect: | VIBROCHANGE |
| Autoritate contractantă: | Unitatea Executivă pentru Finanțarea Învățământului Superior, a Cercetării, Dezvoltării și Inovării (UEFISCDI) |
| Contractor: | Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați |
| Contract de finanțare nr: | 224 / 01.07.2014 |
| Început: | 01.07.2014 |
| Finalizat: | 30.09.2017 |

Parteneriat:

CO - Universitatea Dunărea de Jos Galați, Aiordăchioaie Dorel, *Director proiect*
P1 - INCD în Informatică București, Popescu Dan Theodor, *Responsabil P1*
P2 - INCDMTM București, Cioboată Daniela, *Responsabil P2*
P3 - TeamNet Engineering SRL București, Roman Nicu, *Responsabil P3*

RAPORTUL FINAL ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC

Cuprins

1. Cadrul cercetării
 - 1.1. Localizarea și definirea problemei
 - 1.2. Obiective prevăzute
 - 1.3. Structura activităților
2. Produse realizate și modul de utilizare
 - 2.1. Sistemul experimental VIBROCHANGE
 - 2.2. Toolbox-ul Matlab VIBROTOOL
 - 2.3. Modulul experimental VIBROMOD
 - 2.4. Produsul VIBROGEN
3. Rezultate noi și impactul acestora
 - 3.1. Metoda de detecție CUSUM indirectă, bazată pe conversia dispersiei
 - 3.2. Metoda de detecție a componentelor în imagini timp-frecvență
 - 3.3. Metoda de detecție prin prelucrarea informației din reprezentarea timp- frecvență
 - 3.4. Metoda de detecție robustă
 - 3.5. Metoda de detecție a interferențelor în transformata Wigner-Ville
 - 3.6. Caracteristicile soluției VIBROCHANGE
4. Gradul de realizare a obiectivelor
5. Diseminare și impactul rezultatelor
6. Concluzii

1. Cadrul cercetării

1.1. Localizarea și definirea problemei

În prezent se manifestă o cerință crescută privind înlocuirea procedurilor de întreținere periodică a mașinilor și utilajelor industriale prin strategii de întreținere condițională, bazate pe supravegherea continuă sau prin sondaj a comportării acestora. În acest context, apare ca soluție eficientă, detecția din timp a funcționării anormale a mașinilor și utilajelor industriale, în raport cu o caracterizare a acestora în stare de funcționare normală.

Un mod de abordare al acestei probleme constă în detecția incipientă a deviațiilor mici ale unor semnale de vibrație măsurate, în raport cu datele furnizate de o descriere parametrică a unui model, în condiții normale de lucru ale mașinii sau utilajului. Dacă pot fi detectate astfel de schimbări în faza incipientă, în raport cu schimbările în condițiile normale de operare, se poate realiza prevenirea apariției unor variații mari ale unor mărimi, ca rezultat al producerii unor defecțiuni sau avarii, sau a stării de oboseală, înaintea producerii funcționării anormale a mașinii și, în consecință, să crească disponibilitatea acesteia.

În ultimele două decade, problema întreținerii condiționale, sau preventive, s-a bucurat de o atenție deosebită, atât în cadrul cercetărilor, cât și al aplicațiilor în diferite domenii. Multe aplicații în acest domeniu fac uz de teorii bazate pe statistică, care furnizează instrumente teoretice pentru rezolvarea problemei detecției preventive a producerii unor evenimente nedorite în funcționarea mașinii sau utilajului.

Această abordare presupune existența unui model matematic al mașinii sau utilajului, adesea greu de stabilit. O altă abordare, care face și obiectul proiectului de față, se bazează pe paradigma prelucrării semnalelor care provin de la mașina sau utilajul monitorizat, cel mai frecvent semnale de vibrație. Siguranța, disponibilitatea, eficiența și performanțele unor mașini și utilaje industriale, sau componente electromecanice ale acestora, reprezintă preocupări majore în industrie. Monitorizarea condițională și diagnoza producerii unor defecțiuni este o practică greoaie, care necesită un efort mare. În acest scop au fost propuse diferite metode de extragere a caracteristicilor semnalelor de vibrație, în special pentru mașinile rotative sau componente ale acestora. Problema detecției și diagnozei producerii unor defecțiuni implică următoarele faze: achiziția datelor, extragerea caracteristicilor, detecția producerii unei defecțiuni și identificarea acesteia (diagnoza).

Tehnicile de extragere efectivă a caracteristicilor sunt foarte critice în rezolvarea acestei probleme. Semnalele de vibrație colectate de senzori sunt afectate de zgomot și necesită a fi prelucrate, înainte de utilizarea pentru detecția și diagnoza producerii unei eventuale defecțiuni a mașinii, sau a unor componente ale acesteia. Caracteristicile semnalului (adesea denumite trasături sau "amprente") nu pot fi detectate fără utilizarea unor tehnici specifice. Tehnicile de extragere a caracteristicilor pot crește raportul semnal/zgomot, fie localiza anumite componente în semnal, în scopul asistării deciziei privind producerea unei schimbări. În general, tehnicile de analiză a vibrațiilor aplicate pentru detecție și diagnoză acoperă o arie extinsă, de la tehnici statistice la tehnici bazate pe model și includ diferiți algoritmi de prelucrare a semnalelor pentru extragerea informației necesare în scop de detecție și diagnoza.

1.2. Obiective prevăzute

Proiectul a abordat problema detecției și diagnozei schimbărilor (*Change Detection and Diagnosis - CDD*) în procese vibratorii folosind tehnici avansate de analiză bazate pe model, pentru asigurarea mentenanței predictive a mașinilor și utilajelor industriale. Procesele vibratorii sunt caracterizate de fenomene vibratorii, care includ, în principal, ca efect, semnale de tip vibrații mecanice, rezultate în urma funcționării normale sau anormale a mașinilor și utilajelor industriale. Proiectul și-a propus să dezvolte metode noi, originale și competitive internațional, care să ofere soluții la rezolvarea problemelor CDD pentru procese vibratorii. Acestea au fost testate atât cu date obținute prin simulare, cât și cu date reale, pe echipamente hardware specializate, dezvoltate în cadrul proiectului.

Primul produs este o biblioteca de programe, de tip Toolbox Matlab (VIBROTOOL), care implementează cei mai buni algoritmi pentru CDD (unii originali, brevetabili, dar și unii existenți, care au fost optimizați în cadrul proiectului), utilizând tehnici clasice, dar și tehnici noi, bazate pe analiza multirezoluție, soft computing și fuziunea informației. Produsul constituie o referință pentru problema CDD și permite evaluarea și raportarea performanțelor algoritmilor noi, dezvoltați în cadrul proiectului, la cei cunoscuți.

Al doilea produs este un sistem hardware experimental (VIBROCHANGE/VIBROMOD), utilizat în monitorizarea unor procese pilot, în condiții de laborator, și a unor elemente din procese industriale, prin implementarea și testarea anumitor componente din VIBROTOOL. Modulul fizic permite verificarea algoritmilor în condiții reale de exploatare și constituie baza pentru lansarea comercială a produselor pentru CDD. Cele două componente menționate, VIBROTOOL și VIBROMOD, împreună cu sistemul de măsură VIBROSIG, constituie modelul experimental pentru CDD: VIBROCHANGE.

Obiectivul general al proiectului a constat în realizarea unui model experimental pentru monitorizarea proceselor vibratorii, în vederea detecției și diagnozei schimbărilor în mașini și utilaje industriale, folosind tehnici avansate de analiză bazate pe model.

Obiectivele specifice, urmărite în cadrul proiectului, se referă la:

O1: Dezvoltarea, implementarea și validarea unor metode noi, tehnici și algoritmi pentru detecția și diagnoza schimbărilor în funcționarea mașinilor și utilajelor industriale;

O2: Optimizarea algoritmilor clasici, cunoscuți, pentru CDD și pentru diverse procese vibratorii;

O3: Fuziunea informațiilor rezultate în urma (și în timpul) procesului de detecție și diagnoză a schimbărilor, precum și a efectelor acestora în spectrul de energie de până la 100 kHz;

O4: Realizarea unei biblioteci de programe pentru CDD, de tip Toolbox Matlab (VIBROTOOL), care să implementeze atât metodele CDD clasice (cunoscute) cât și cele dezvoltate în cadrul proiectului;

O5: Realizarea unui modul hardware experimental pentru CDD (VIBROMOD), care să aibă ca obiectiv monitorizarea on-line a unui utilaj industrial, și care să utilizeze rezultatele la nivel teoretic, algoritmic și metodologic, obținute în cadrul proiectului.

1.3. Structura activităților

Pentru atingerea obiectivelor menționate, au fost parcurse patru etape:

Etapa I (finalizată în decembrie 2014), Analiza sistemelor de detecție și diagnoză a schimbărilor (CDD) în procese vibratorii, a avut ca obiectiv evaluarea diverselor metode, tehnici și algoritmi existenți, în vederea obținerii unei referințe definitive, la zi, pentru metodele și algoritmi de CDD, ce a permis definirea unor direcții de aprofundare a domeniului.

Etapa II (finalizată în decembrie 2015), Stabilirea structurii modelului experimental și a metodelor CDD implementate, a constat în definirea structurii modelului experimental, proiectarea componentelor acestuia, inclusiv stabilirea metodelor și tehnicilor CDD care urmează a fi implementate. De asemenea, au fost dezvoltate metode, tehnici și algoritmi pentru monitorizarea proceselor vibratorii (ce apar pe mașini și utilaje industriale), bazate pe model și utilizând tehnici avansate de prelucrare a semnalelor.

Etapa III (finalizată în decembrie 2016), Construcție model experimental și finalizare Toolbox CDD, a constat în elaborarea componentelor VIBROMOD, hardware și software, și a modului de generare a vibrațiilor în condiții controlate, VIBROGEN, pentru testarea modelului experimental, precum și în finalizarea Toolbox-ului Matlab (VIBROTOOL) prin completarea primei versiuni cu funcții avansate și evaluare prin simulare Monte Carlo.

Etapa IV (finalizată în septembrie 2017), Experimentări pentru evaluarea modelului experimental, a constat în efectuarea de experimentări cu date din laborator, dar și din medii industriale, în vederea testării modelului experimental VIBROCHANGE.

2. Produse realizate și modul de utilizare

Produsele realizate în cadrul proiectului sunt:

1. **VIBROCHANGE** – Sistem experimental pentru detecția schimbărilor și diagnoza proceselor vibratorii
2. **VIBROTOOL** – Toolbox Matlab pentru detecția schimbărilor
3. **VIBROMOD** – Echipament experimental pentru monitorizarea vibrațiilor
4. **VIBROGEN** – Sistem de generare vibrații în condiții controlate

pentru care se face o descriere succintă în cele ce urmează.

2.1. Sistemul experimental VIBROCHANGE

Acesta reprezintă sistemul complex hardware și software de testare și dezvoltare pentru problematica CDD. În Fig. 1 se prezintă conexiunile funcționale primare dintre principalele module ale sistemului experimental VIBROCHANGE: VIBROTOOL (Toolbox Matlab pentru CDD) și VIBROMOD (Modulul hardware pentru CDD, care implementează software o parte din componentele VIBROTOOL). Pentru lucrul în condiții de laborator, a fost dezvoltat un sistem electromecanic de testare (VIBROGEN), pentru generarea vibrațiilor în condiții controlate de lucru.

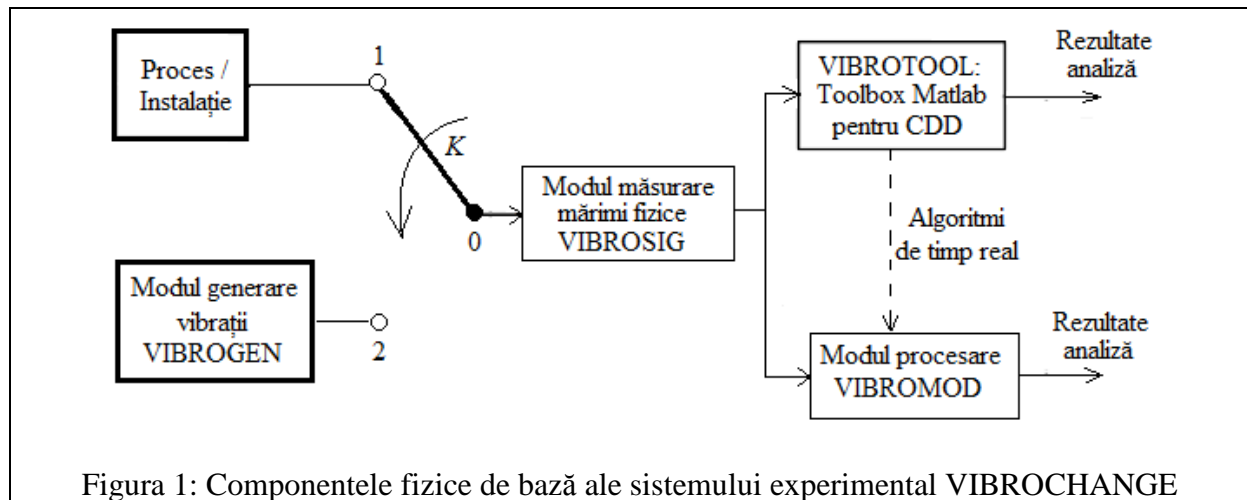


Figura 1: Componentele fizice de bază ale sistemului experimental VIBROCHANGE

În Fig. 2. se prezintă o imagine reală a sistemului VIBROCHANGE. De la stânga la dreapta, se pot distinge partea de comandă a echipamentului VIBROGEN, modelul experimental VIBROMOD și, în final, în partea dreaptă, calculatorul pentru testarea programelor din VIBROTOOL.

Componenta de bază a sistemului VIBROCHANGE este toolbox-ul VIBROTOOL, produs informatic cu programe în cod Matlab, ce conține mai mulți algoritmi pentru rezolvarea problemei de detecție și diagnoză (CDD), dintre care unii originali, dezvoltați în cadrul proiectului, dar și unii preluați din diferite surse publice, care împreună cu cei originali concură la rezolvarea problemei CDD.

2.2. Toolbox-ul Matlab VIBROTOOL

Acesta are ca obiectiv monitorizarea și diagnoza off-line a componentelor mecanice ale mașinilor și utilajelor tehnologice, de regulă mașini rotative. Lagărele și cutiile de viteze reprezintă două componente centrale ale acestor mașini care se pretează la o astfel de analiză, monitorizarea realizându-se pe baza analizei semnalelor de vibrație, măsurate de senzori specifici. Instrumentul realizat în cadrul proiectului poate fi utilizat și la analiza altor categorii de semnale: biomedicale (EEG, EKG), semnale vocale, semnale seismice, etc. unde prezintă interes detecția schimbărilor în dinamica acestora.

Acest modul subsistem a fost conceput sub forma unui set de programe (ce definesc un Toolbox Matlab) pentru rezolvarea unor sarcini specifice problemei detecției și diagnozei schimbărilor (CDD), din semnalele de vibrație măsurate. Acest gen de analiză se realizează off-line, implicând mai multe proceduri complexe de calcul și consumatoare de timp, dar care permit o analiză completă și eficientă.

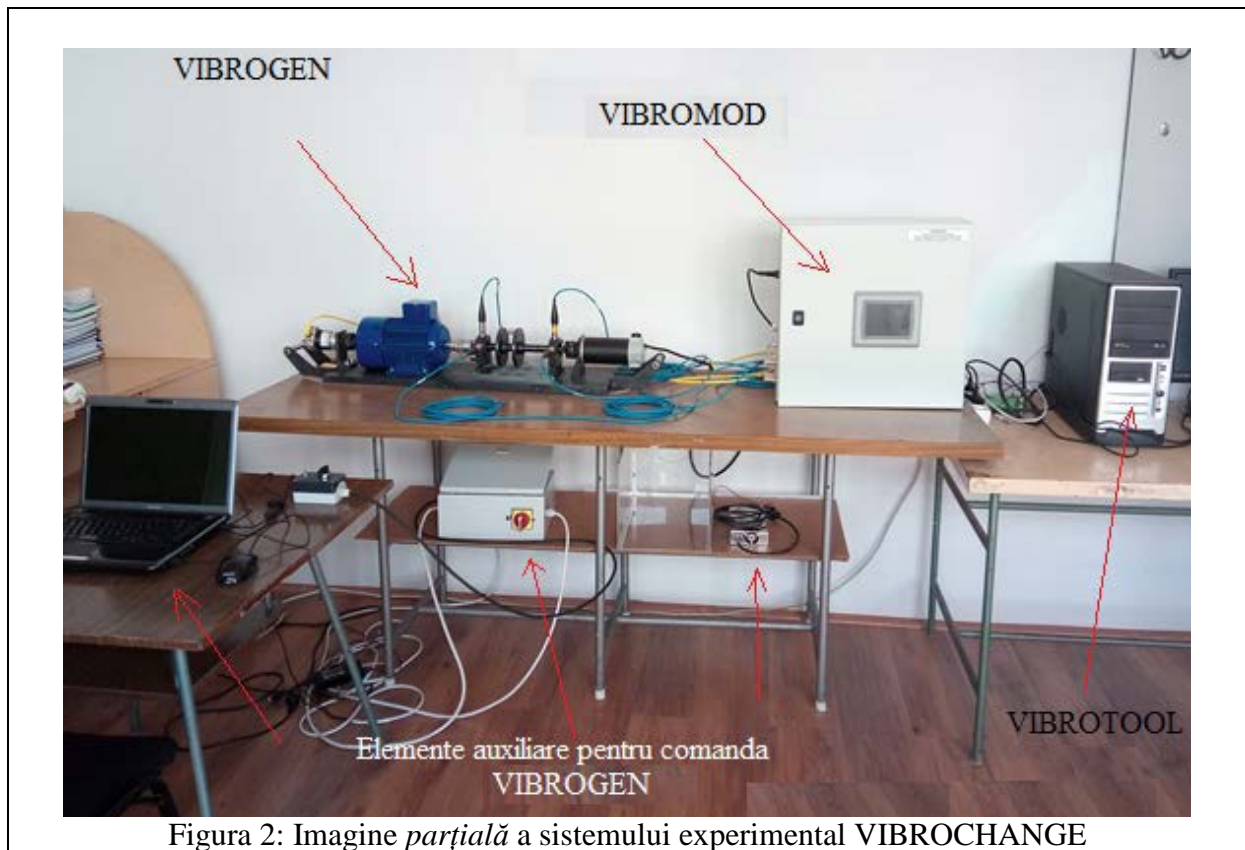


Figura 2: Imagine parțială a sistemului experimental VIBROCHANGE

Algoritmii implementați fac uz de tehnici de recunoaștere a formelor, verosimilitate maximă, tehnici bazate pe model, analiza multirezoluție, soft computing și fuziunea informației, etc., constituind o referință în domeniul CDD. Modulele de calcul implementate pot fi grupate în următoarele categorii:

1. Modulele CDS permit o primă detecție a schimbărilor produse în semnalele de vibrație măsurate, sau în principalele surse independente de vibrație, determinate cu modulele BSS. Printre componentele software implementate menționăm: estimarea punctului de producere a schimbării (*mean change*), detecția schimbărilor folosind un singur model de regresie și diferite măsuri ale "distanței" dintre modele și reguli de "stop", detecția

schimbărilor folosind două modele de regresie, ”ferestre” de date alunecătoare și diferite măsuri ale ”distanței” dintre modele și reguli de ”stop”, detecția și segmentarea semnalelor de vibrație utilizând estimatorul de probabilitate maximă a priori (MAP), detecția și discriminarea producerii schimbărilor în parametri și în dispersia zgomotului modelului semnalului de vibrație.

2. Modulele BSS permit separarea ”oarbă” a surselor de vibrație independente, utilizând algoritmi SOBI (Second Order Blind Identification), și JADE (Joint Approximate Diagonalization of Eigen-matrices) pentru semnale reale. În ingineria mecanică, cel puțin, problema estimării surselor de vibrație endogene necunoscute din măsurătorile exogene reprezintă o preocupare majoră. Utilizarea tehnicilor BSS împreună cu alte tehnici asociate modulelor CDS și TFA se dovedește un succes în rezolvarea problemei CDD. În acest caz, problema CDD este translatată într-un nou spațiu, în locul celui generat de semnalele de vibrație originale, ceea ce simplifică problema de detecție, numărul semnalelor ce fac obiectul analizei fiind mai mic, iar analiza se va realiza pe semnale monodimensionale.
3. Modulele TFR permit calculul și vizualizarea distribuțiilor timp-frecvență, pentru reprezentările din clasa Cohen, calculul marginalelor și a energiei unei reprezentări timp-frecvență, calculul momentelor de ordinul 1 și 2, în frecvență, calculul momentelor de ordinul 1 și 2, în timp, calculul entropiei Renyi pentru diferite distribuții timp-frecvență. Analiza, prelucrarea și estimarea parametrilor semnalelor al căror conținut spectral se modifică în timp sunt cruciale în multe aplicații CDD. Aceste module sunt necesare pentru extragerea caracteristicilor semnalelor de vibrație ce fac obiectul analizei, precum și pentru localizarea anumitor componente în semnal, în scopul asistării deciziei. Mai multe variante de lucru a modulelor incluse în subsistemul VIBROTOOL, utilizate în rezolvarea unei probleme CDS, se prezintă în Fig. 3.

S-a dezvoltat, de asemenea, și un Toolbox pentru rezolvarea problemei detecției semnalelor, folosind tehnici din paradigma „Sparse Computing”. Toolbox-ul VIBROTOOL-SPARSE¹ este constituit dintr-o familie de funcții ce implementează mai mulți algoritmi utilizați pentru detecția și diagnoza defectelor din perspectiva reprezentărilor rare.

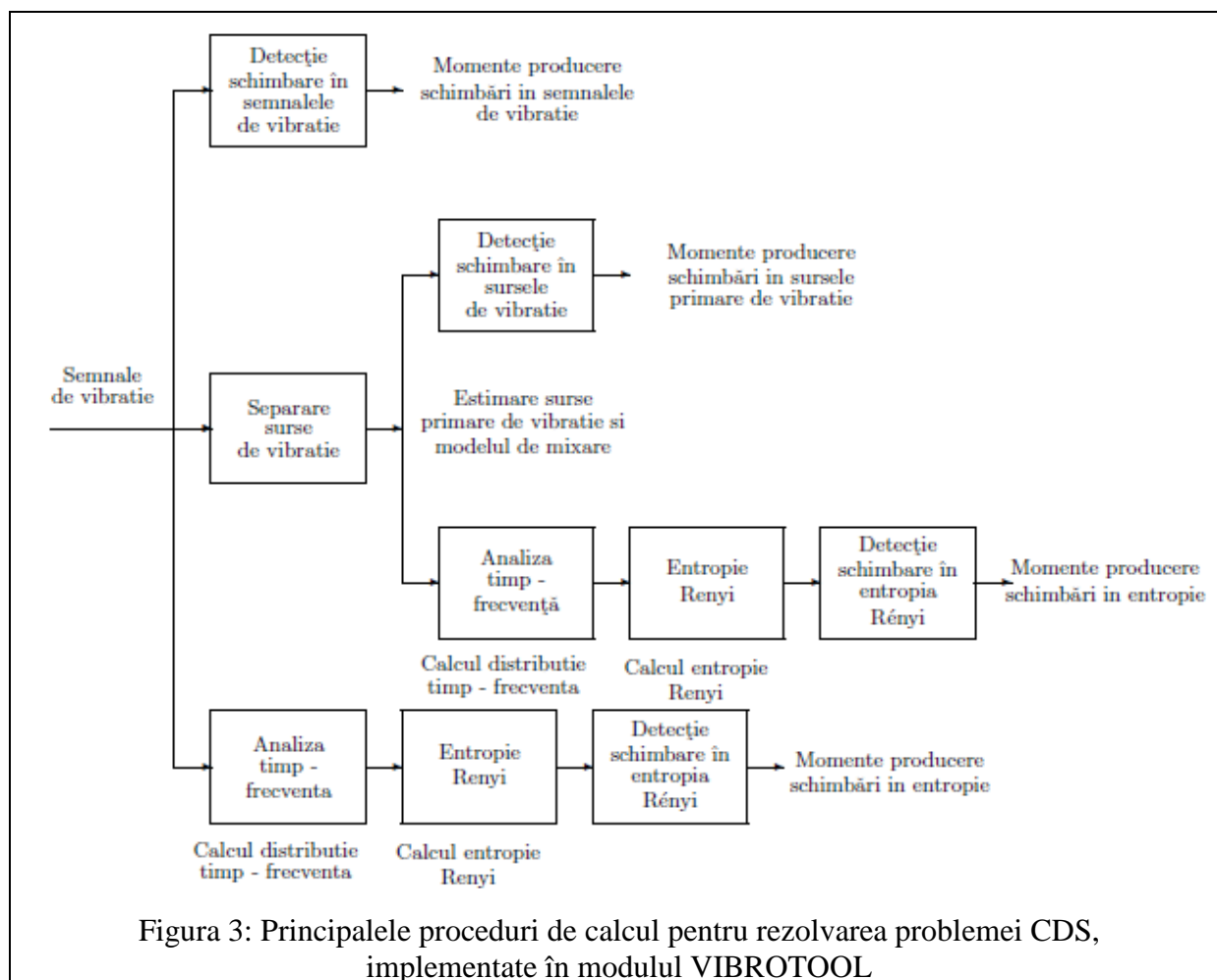
Modulul VIBROTOOL-MOD este un modul de tranziție între VIBROTOOL și VIBROMOD. În VIBROTOOL sunt implementați algoritmi avansați, dezvoltati cu funcții dedicate din mediul Matlab. În VIBROTOOL-MOD sunt numai o parte din algoritmi din VIBROTOOL, implementați însă cu funcții standard/simple din Matlab, compatibile, de exemplu, cu biblioteca standard a limbajului de programe C sau Java. Rezultatele furnizate de algoritmi și funcțiile din VIBROTOOL-MOD sunt identice cu cele furnizate de funcțiile similare implementate în cadrul modulului experimental VIBROMOD.

2.3. Modulul experimental VIBROMOD

Acesta este o componentă a sistemului experimental VIBROCHANGE, realizat utilizând o soluție bazată pe dispozitive PLC (Programmable Logic Controllers) în vederea asigurării

¹Din motive de simplitate, VIBROTOOL-SPARSE și VIBROTOOL-MOD nu sunt prezentate distinct în figura 3.

unei integrări ușoare a acestora în structura unor mașini și echipamente industriale existente, în scopul mentenanței predictive a acestora.



Structura de bază a componentei VIBROMOD, din punctul de vedere al managementului datelor, este prezentată în Fig. 4. Dispozitivele PLC sunt programate pentru prelucrarea primară a acestora și transmiterea lor către nivelul superior (un calculator PC). Pe calculatorul de nivel 2, datele sunt prelucrate folosind algoritmi de nivel superior, din cei implementați în cadrul modulului VIBROTOOL-MOD.

În cadrul modulului VIBROMOD au fost implementate în limbajul Java funcții care realizează:

1. Filtrarea datelor
2. Calculul parametrilor statistici
3. Calculul spectrului de amplitudine Fourier
4. Extragerea anvelopei și estimarea frecvenței cu transformata Hilbert
5. Analiza timp-frecvență cu transformata Wigner-Ville
6. Extragerea trăsăturilor (localizare și dispersie) din imaginea timp-frecvență
7. Extragerea informației prin calculul entropiei Rényi pentru semnale 1D și 2D

Aplicația software este reprezentată de o interfață cu utilizatorul prin care pot fi vizualizate atât datele de intrare cât și cele prelucrate prin intermediul unui tabel și a unor grafice reprezentative pentru modulele de prelucrare. Tabelul este conectat la o baza de date în care

sunt stocate informațiile relevante pentru mașina sau utilajul ce face obiectul monitorizării. Dimensiunea tuturor semnalelor măsurate se poate alege prin inserarea numărului dorit și se poate tipări fereastra ce se deschide după apelarea funcției. Interfața dezvoltată conține tabelul cu variabilele de interes, un buton de printare, unul de avarie și unul de help. Graficele 2D au opțiuni de minimizare/maximizare/autoscalare, de afișare a coordonatelor unui punct selectat din grafic, de export în diferite formate, printare și schimbare de culoare pentru a facilita procesul de analiza și detecție. Graficele 3D (de tip mesh) au aceleași opțiuni ca cele 2D, în schimb, ele pot fi rotite în jurul axelor (x,y,z). De asemenea, se poate schimba modul de reprezentare al axelor: liniar vs logaritmic.

Pentru funcțiile implementate în cadrul VIBROMOD au fost create clase specifice fiecărui modul în parte, fiecare având metode și opțiuni proprii de calcul. O metodă (funcție) este o colecție de instrucțiuni, grupate astfel încât să conducă la rezultatul dorit.

Declararea datelor de intrare precum și a variabilelor folosite în cadrul prelucrărilor, s-a realizat folosind tipul de date double - numere reale, reprezentate în virgulă mobilă, cu dublă precizie (reprezentate pe 64 bit), față de tipul de date float (reprezentat pe 34 de bit). Pentru reprezentarea numerelor complexe a fost creată clasa Complex, ce generează obiecte de tip Complex, și au fost implementate diferite prelucrări uzuale asupra acestui tip de date.

În Fig.4 se prezintă modul în care se prelucrează datele pe cele trei scări (niveluri) de timp: nivel mașină (proces) (interval elementar de timp = *ecart mașina* = 1 minut), nivel secție (interval elementar de timp = *ecart secție* = 1 oră) și nivel întreprindere (interval elementar de timp = *ecart întreprindere* = 1 zi).

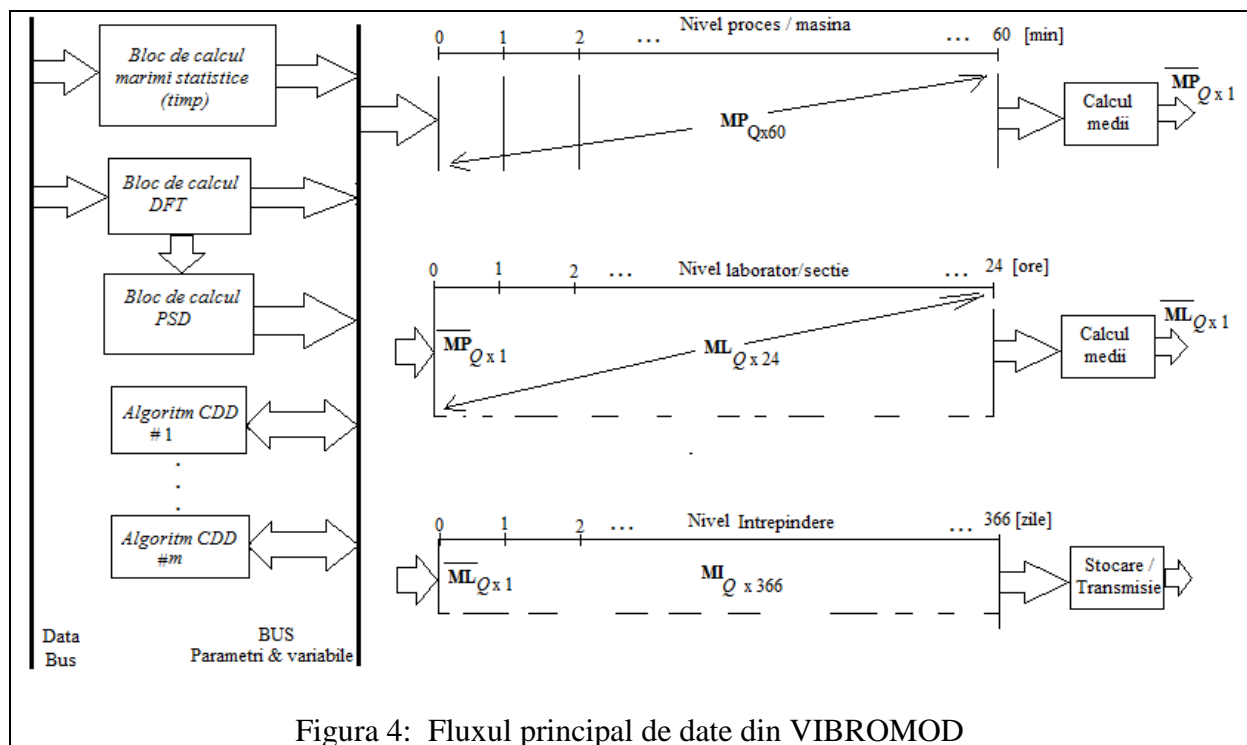


Figura 4: Fluxul principal de date din VIBROMOD

La nivel proces, datele numerice din mașina monitorizată, vibrații și mărimi suplimentare, sunt prelucrate pentru calculul unor mărimi statistice (în domeniul timp) și a unor mărimi în domeniul frecvență sau a altor mărimi de interes (de exemplu, entropii) (neprezentate în Fig. 4). Aceste mărimi sunt calculate și salvate la intervale de timp de $DTP = 1$ min. Calculul

mărimilor statistice și a celorlalte mărimi de interes se face într-un interval de timp mai mic decât ecartul de timp la nivel proces (1 min). La nivel de secție, datele sunt salvate la interval de o oră. La nivel de întreprindere, datele se actualizează la sfârșitul fiecărei zile, deci la 24 de ore.

La fiecare nivel, datele sunt descrise prin tablouri bidimensionale (matrici) de dimensiuni corespunzătoare: **MP** la nivel de proces, **ML** la nivel de laborator și **MI** la nivel de întreprindere. Numărul de coloane al acestor tablouri este impus de ecartul de timp specific fiecărui nivel. Numărul de linii este Q . La fiecare nivel, datele se salvează în prima coloană. Înainte de salvare, datele sunt permutate ciclic la dreapta pentru actualizare. Când o matrice de date a fost complet actualizată, se calculează (de exemplu) mediile statistice pe linii și se transmit la nivelul următor. La ultimul nivel, nivelul întreprindere, datele prelucrate suplimentar sau nu, se memorează pe suporturi HDD sau CD-uri și se transmit la un server pentru prelucrări și analize ulterioare.

2.4. Produsul VIBROGEN

Acesta este un echipament electromecanic generator de vibrații, în condiții controlate de viteză și sarcină. A fost dezvoltat în vederea efectuării de experimente, cât mai aproape de specificul proceselor industriale, și pentru realizarea unor diferite scenarii de lucru. Echipamentul are la bază o transmisie mecanică, de la o mașină electrică la o sarcină, emulată printr-un motor electric de c.c. Comanda mașinii electrice se face prin intermediul calculatorului printr-o interfață specializată. Se pot impune traiectorii de viteză sau valori individuale ale acesteia. Comanda se poate face și manual, printr-o intrare analogică în echipamentul de comanda al motorului. Legătura dintre mașină și sarcină se face prin arbore și cuplaje specializate. Pe ax sunt prevăzute două discuri pentru introducerea unor asimetrii mecanice. În configurația actuală se pot studia defecte în lagăre (rulmenți) și în arbore. Cu modificări adecvate, se pot studia și defecte în mașina electrică. Vibrațiile sunt preluate de patru senzori pizeoelectrice de tip industrial, monodirecționali. Echipamentul este prevăzut cu circuite de protecție și oprire automată, cu acționare manuală, în caz de pericole. Prin structura și modul de funcționare el poate fi folosit și independent, prin conectarea la alte sisteme de monitorizare. În Fig. 5 se prezintă o imagine parțială de ansamblu a acestui produs.



Figura 5: Imagine *parțială* a echipamentului VIBROGEN (partea de execuție/generare)

3. Rezultate noi și impactul acestora

3.1. Metoda de detecție CUSUM indirectă, bazată pe conversia dispersiei

Metoda are la bază preprocesarea datelor, înainte de aplicarea metodei/criteriu CUSUM, astfel încât să se transforme variațiile dispersiei în variații ale mediei, parametru pentru care criteriul CUSUM este optimal din punctul de vedere al detecției, așa cum se prezintă în Fig. 6. Rezultatele obținute prin simulare pe calculator arată obținerea unor performanțe superioare față de varianta clasică, fără preprocesare.

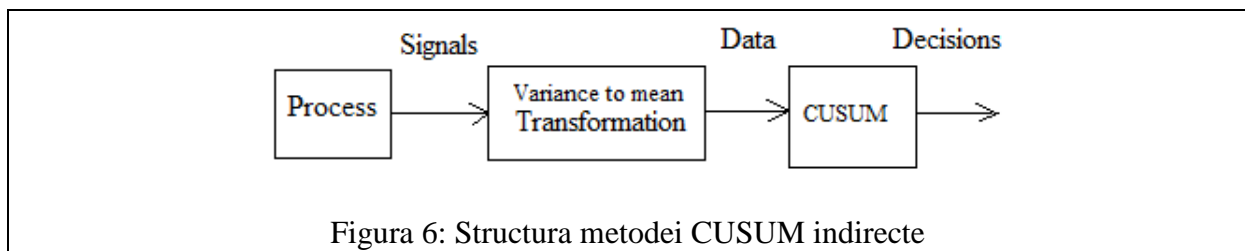


Figura 6: Structura metodei CUSUM indirecte

3.2. Metodă de detecție a componentelor în imagini timp-frecvență

Metoda utilizează imaginea asociată unei transformări timp-frecvență, de exemplu de tip Wigner-Ville. Componentele semnalelor de tip vibrații sunt detectate prin tehnici de corelație, folosind forme de referință, determinate și memorate a priori într-o bază de date adecvată.

Structura sistemului este prezentată în Fig. 7 și include un bloc de calcul TFT, un bloc de descompunere în blocuri/imagini de bază/elementare de dimensiune $n \times n$, un bloc de calcul a intercorelației XCORR, un bloc de filtrare/mascare și un bloc de reformatare.

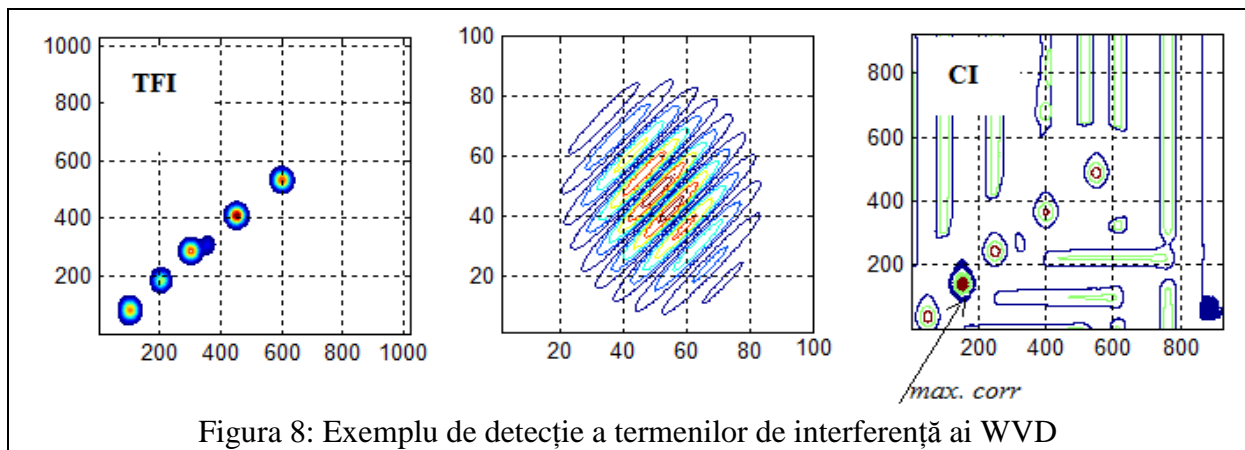
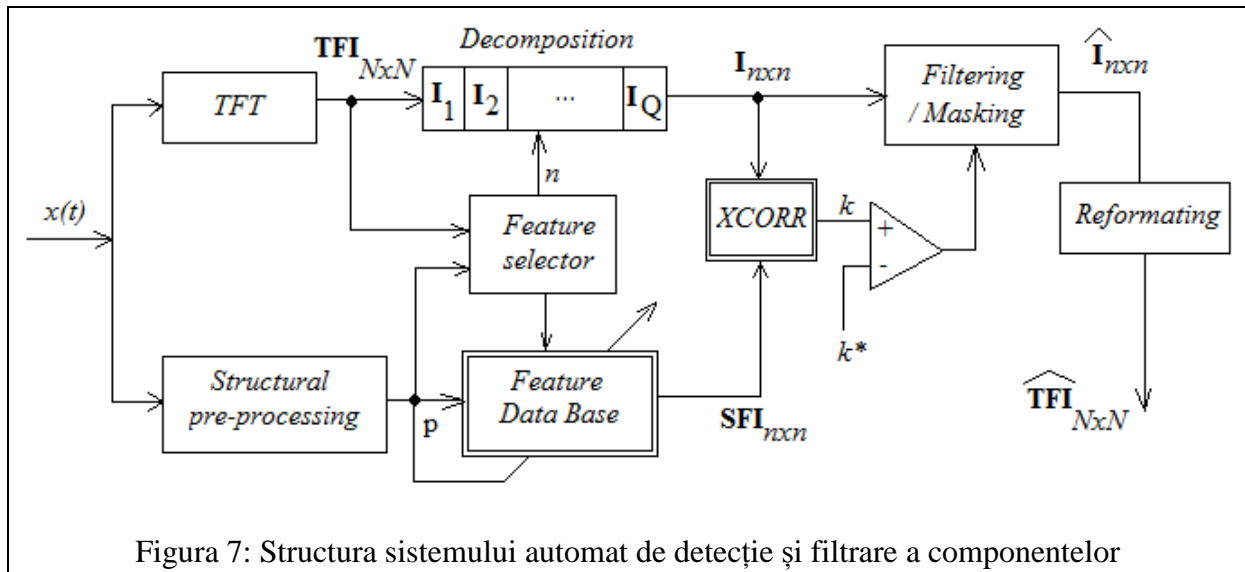
Blocul de preprocesare structurală estimează numărul de componente ale semnalului, extrage parametrii componentelor în timp și frecvență, prin memorarea tuturor acestor informații în vectorul parametrilor \mathbf{p} .

În funcție de obiectiv, sistemul poate lucra ca detector al schimbării sau ca detector/clasificator de componente (auto/proprie sau de interferență, în cazul WVD).

Sistemul lucrează în două etape. În prima etapă, etapa de învățare, sistemul își completează baza de date cu trăsăturile specifice ale semnalului de analizat, real sau virtual. În etapa a doua are loc comparația între blocuri, unul din imaginea analizată și celălalt din baza de date. Comparația are la bază intercorelația a două blocuri de tip imagine.

Un exemplu de utilizare a metodei este prezentat în Fig. 8. În partea stângă a figurii se găsește imaginea TFI (WVD), cu 6 componente detectate. În partea centrală a figurii este reprezentat blocul elementar asociat unui termen nedorit, de tip interferență. În partea dreaptă, se prezintă rezultatul intercorelației dintre imaginea analizată și blocul selectat, cu indicarea poziției în care se găsește termenul cel mai apropiat de blocul ales, din punct de vedere al gradului de similitudine. După detecția blocurilor nedorite se aplică o operație de filtrare/înlăturare a

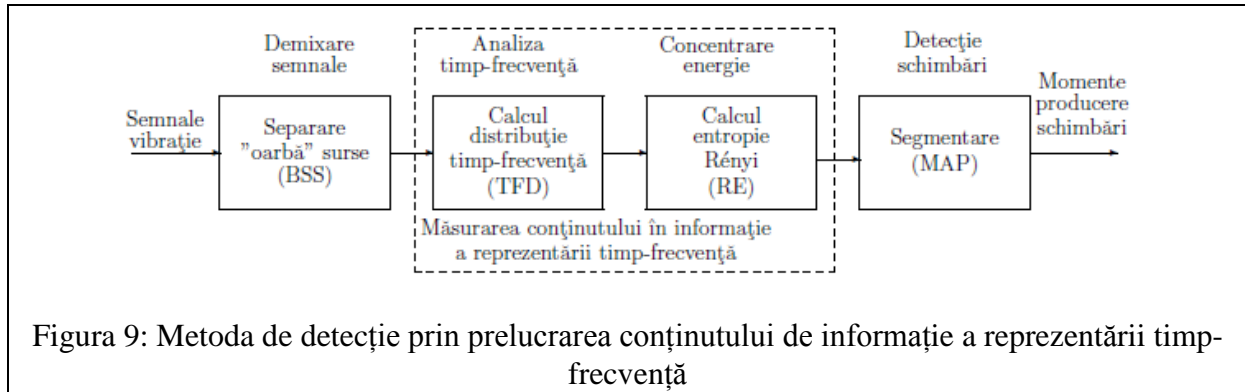
termenilor de interferență și, în final, are loc reformatarea datelor pentru a genera imaginea estimată/corectată.



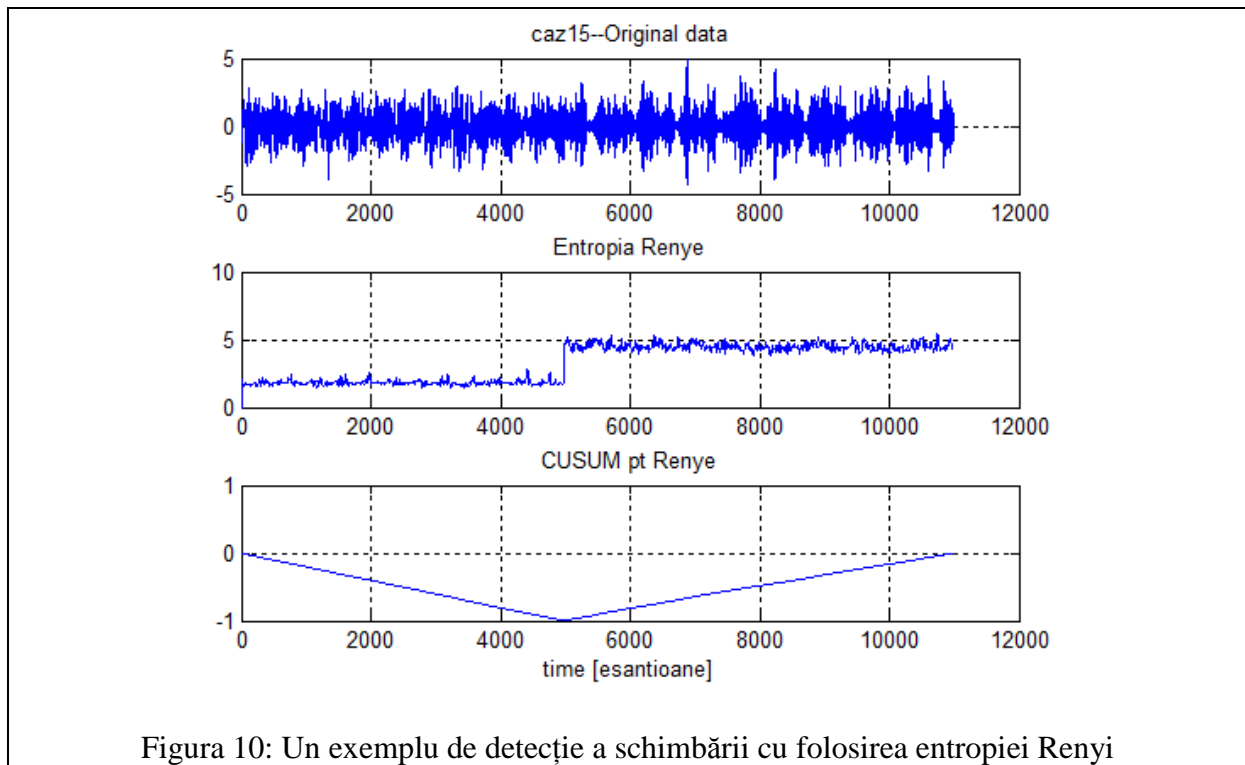
3.3. Metoda de detecție prin prelucrarea informației din reprezentarea timp-frecvență

Structura generală a metodei este prezentată în Fig. 9. Metoda poate fi precedată de o transformare de tip BSS, pentru a separa sursele de semnal, dacă este cazul. Semnalele de vibrație sunt analizate în domeniul timp-frecvență din punct de vedere informațional, aici cu ajutorul entropiei Renyi. În esență se calculează entropia Renyi, separat pe linii și coloane, sau global – pe întreaga imagine, pentru a pune în evidență schimbările informaționale. Aceasta din urmă este considerată semnal de analiză, și prelucrata corespunzător pentru detecție.

Operând pe entropia Renyi pe termen scurt, ca un nou spațiu de decizie, în locul semnalelor originale, se obține o detecție mai robustă a schimbărilor produse în dinamica semnalelor de vibrație și ajută la localizarea componnetelor deterministe din semnalele analizate.



În Fig. 10, se prezintă un exemplu mai simplu de detecție (fără BSS și TFD), prin folosirea entropiei Renyi, ca semnal intermediar, semnal de intrare pentru procedura de detecție bazată pe CUSUM. Semnalul original supus analizei este compus din două înregistrări de vibrație concatenate, corespunzătoare unui regim normal de funcționare (5000 elemente) și a unui regim cu defect (6000 de elemente).



3.4. Metoda de detecție robustă

Detecția robustă utilizează mai multe tehnici ce implică fuziunea de metode/informații, astfel încât rezultatele detecției să fie mult îmbunătățite. În varianta de față, se folosește analiza timp-frecvență și analiza unui model rezultat din identificarea unor semnale auxiliare, în cazul de față entropia Renyi.

Structura metodei este prezentată în Fig. 11. Există trei blocuri de analiză, A, B și C. Blocul A realizează o analiză preliminară timp-frecvență pentru a extrage unele proprietăți de bază,

primare, în timp și în frecvență, cum sunt: numarul de componente, banda de frecvență, durata componentelor, etc. Blocul B calculează o transformare timp-frecvență, din mai multe posibile, în funcție de obiectiv și natura semnalului analizat: Wigner (W), Wigner-Ville (WV), Pseudo Winger-Ville (PWVD), Choi-Williams (CW), transformata cu interferență redusă (RI), etc. Blocul C realizează o identificare a semnalului asociat entropiei Renyi, semnal calculat din imaginea timp-frecvență generată de blocul B. Informațiile de la ieșirile celor trei blocuri sunt reunite prin fuziune și folosite împreună pentru a rezolva robust problema detecției schimbării în semnalul analizat $x(t)$.

Algoritmul de detecție robustă dezvoltat se bazează pe verosimilitate. Pentru momentul de schimbare t_0 se utilizează modelul

$$y(t) = \begin{cases} \boldsymbol{\varphi}_t^T \cdot \boldsymbol{\theta}_0 + e_t, & E\{e_t\} = \sigma_0 \quad \text{dacă } t \leq t_0 \\ \boldsymbol{\varphi}_t^T \cdot \boldsymbol{\theta}_1 + e_t & E\{e_t\} = \sigma_1 \quad \text{dacă } t > t_0 \end{cases}$$

unde y_t este valoarea măsurată, $\boldsymbol{\varphi}_t$ este vectorul conținând valorile anterioare ale intrării și/sau ieșirii, $\boldsymbol{\theta}$ este vectorul parametrilor, și e_t este zgomotul de măsurare. $\boldsymbol{\theta}_0$ și $\boldsymbol{\theta}_1$ sunt parametri necunoscuți. S-au folosit următoarele ipoteze:

$$H_0 : \boldsymbol{\theta}_0 = \boldsymbol{\theta}_1 \quad \text{și} \quad \sigma_0 = \sigma_1$$

$$H_1 : \boldsymbol{\theta}_0 \neq \boldsymbol{\theta}_1 \quad \text{și} \quad \sigma_0 = \sigma_1$$

$$H_2 : \boldsymbol{\theta}_0 = \boldsymbol{\theta}_1 \quad \text{și} \quad \sigma_0 \neq \sigma_1$$

ce reprezintă situațiile ce pot apare, în cazul aplicării metodei de detecție robustă.

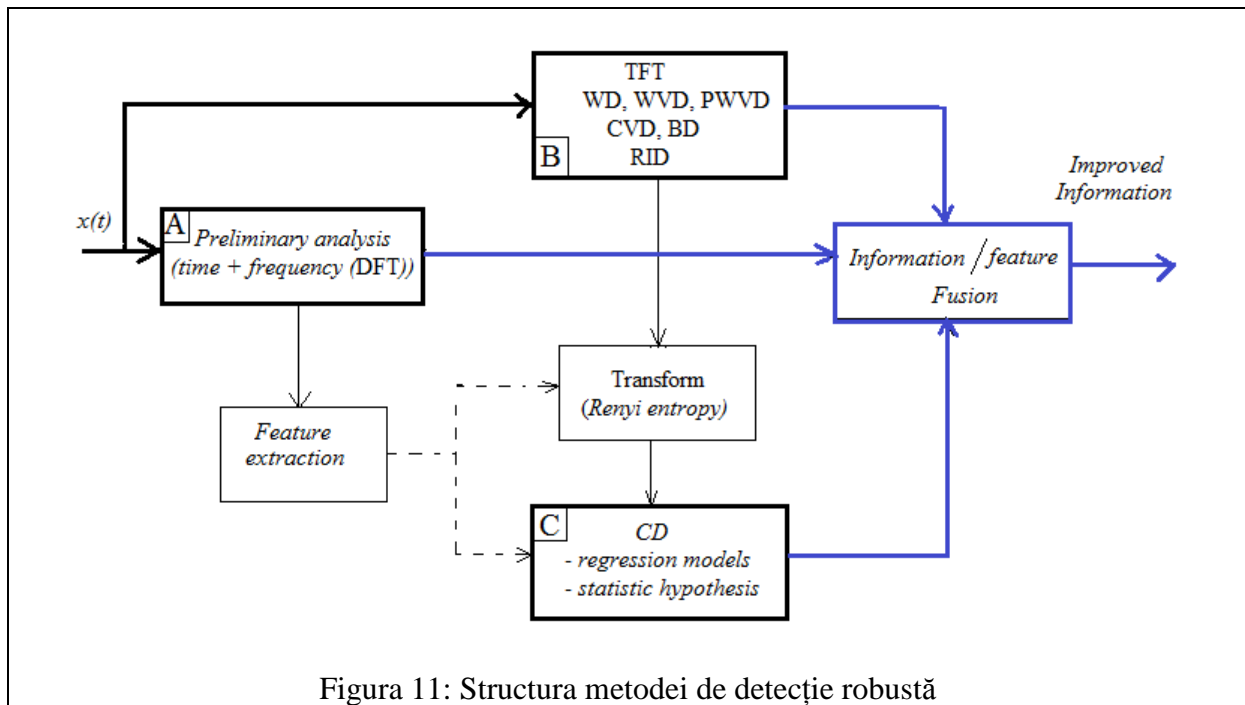


Figura 11: Structura metodei de detecție robustă

3.5. Metoda de detecție a interferențelor în transformata Wigner-Ville

Transformata timp-frecvență Wigner-Ville prezintă avantaje teoretice și practice deosebite (de exemplu, rezoluție și valori reale), dar și unele dezavantaje, cel mai important fiind dat de termenii de interferență. În consecință, s-a propus o metoda pentru detecția și filtrarea termenilor de interferență.

Metoda propusă este de tip calitativ și se poate aplica semnalelor cu mai multe componente, posibil netaționare, nesuprapuse – în același timp – în timp și în frecvență. Metoda face uz de ideea ca termenii de interferență sunt generați și plasați între termenii generatori (auto-termeni). Ca urmare, dacă o componentă reală dispăre sau este atenuată și termenii de tip interferență vor fi afectați/atenuați. Structura metodei este prezentată în Fig. 12. Blocurile au următoarele semnificații : PSBF = Filtru programabil oprește bandă; WVD = Bloc de calcul transformata/distribuție Wigner-Ville; RH = Bloc de calcul entropie Renyi; FE = Bloc extractor de trăsături; f_{oi} – frecvența centrală; B_{oi} – banda de frecvență a filtrului PSBF, pentru componenta “i” a semnalului prelucrat/analizat.

Algoritmul de detecție analizează componentele semnalului, în timp sau în frecvență, și detectează un termen real (auto-termen). După filtrare se compară termenii detectați. Termenii care sunt afectați sunt clasificați/interpretați ca fiind termenii de interferență, și urmează a fi filtrați. În Fig. 13 se prezintă un exemplu simplu de filtrare a termenilor de interferență, pentru un semnal cu cinci componente sinusoidale modulate cu impulsuri Gaussiene.

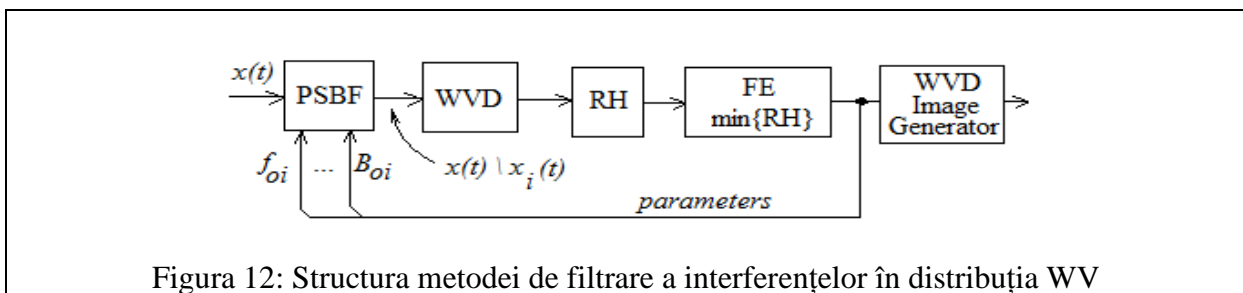


Figura 12: Structura metodei de filtrare a interferențelor în distribuția WV

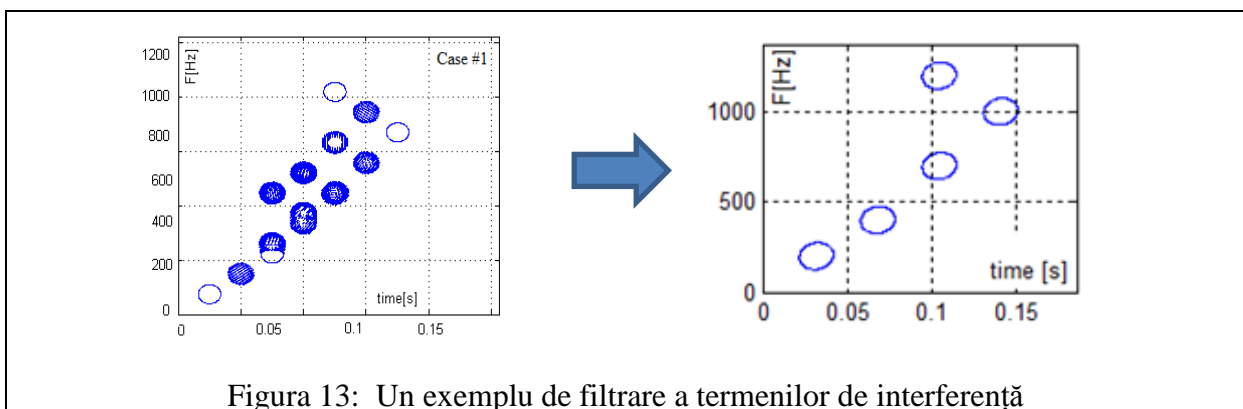


Figura 13: Un exemplu de filtrare a termenilor de interferență

3.6. Caracteristicile soluției VIBROCHANGE

3.6.1. Avantajele soluției propuse (sistemul experimental VIBROCHANGE), comparativ cu soluțiile cunoscute în prezent, sunt:

1. Sistemul VIBROCHANGE permite efectuarea unor prelucrări avansate de semnal pentru rezolvarea problemei CDD, prezentate în Fig.3, și care - după informațiile noastre - nu se regăsesc în alte sisteme similare, menționând în mod special:
 - Segmentarea semnalelor de vibrație utilizând estimatorul de probabilitate maximă a priori (MAP).
 - Detecția și discriminarea schimbărilor produse în parametri și în dispersia zgomotului modelului, ceea ce permite determinarea momentelor de timp ale producerii acestora în condițiile experimentale (mediu) și în dinamica sistemului (procesul fizic), în special pentru sisteme cu intrări arbitrare și nestaționare, cunoscute sau necunoscute;
 - Detecția schimbărilor utilizând entropia Renyi pe termen scurt, ca un nou spațiu de decizie, ceea ce permite o detecție mai robustă a schimbărilor în semnalele de vibrație, decât în cazul aplicării procedurii de segmentare pe semnalele originale.
2. Prin aplicarea procedurilor implementate în cadrul sistemului, se realizează și fuziunea informației rezultate în urma etapelor de prelucrare menționate anterior, în scopul unei monitorizării eficiente a mașinii sau utilajului, cu evitarea unor alarme false privind necesitatea efectuării unei revizii, și furnizarea de informații suplimentare în scop de diagnoză.
3. Prin procedurile cu care se operează în cadrul sistemului, cum ar fi separarea ”oarbă” a surselor de vibrație independente, se realizează o pre-procesare a datelor de măsură, ceea ce permite facilitarea detecției schimbărilor produse în funcționarea mașinii (acestea apar mult mai vizibile în sursele de vibrație independente, decât în semnalele originale), dar și o post-procesare a rezultatelor detecției, prin calculul unor mărimi specifice, ce permit extragerea informației din planul timp-frecvență.
4. Sistemul poate fi folosit la testarea în timp real a algoritmilor CDD, folosind lucrul în tandem al subsistemelor VIBROTOOL și VIBROMOD, prin adaptarea la procesul fizic. După optimizarea parametrilor în subsistemul VIBROTOOL, algoritmi sunt exportați și implementați în VIBROMOD, urmând să fie testați pe procese fizice reale. Prin această funcție de testare, se asigură atât îndeplinirea unor condiții de robustețe a algoritmilor folosiți pentru CDD, dar și rezolvarea unei mari probleme din practica inginerescă, când algoritmi utilizați în laborator nu furnizează aceleași soluții când sunt aplicați în procese și echipamente reale.

3.6.2. Modul de utilizare a sistemului VIBROCHANGE constă în utilizarea sistemului într-o problemă de monitorizare a unei mașini rotative, a unui utilaj tehnologic, sau a unor componente ale acestora. Considerăm posibile următoarele moduri de utilizare:

1. Dispunând de o înregistrare de date, semnale de vibrație, obținută cu modulul VIBROSIG, se pot analiza utilizând funcțiile de prelucrare primară implementate în cadrul modulului VIBROMOD, sau cu funcții din modulul VIBROTOOL. Rezultatele obținute oferă o imagine de ansamblu asupra proceselor vibratorii specifice mașinii rotative, sau componentelor acesteia, ce fac obiectul monitorizării.
2. În cazul în care se dispune de o înregistrare de probă a semnalelor de vibrație din funcționarea normală a mașinii rotative, sau a componentelor acesteia, (înregistrare martor), aceasta poate fi concatenată cu o înregistrare curentă din funcționarea mașinii rotative, sau a componentelor acesteia, semnalul rezultat urmând a fi analizat cu procedurile de calcul implementate în cadrul modulului VIBROTOOL, în urma analizei rezultând dacă datele celor două înregistrări sunt coerente, sau dacă s-a produs o

schimbare în funcționarea mașinii, sau a componentelor acesteia. Pe baza acestor rezultate și a unor informații ce țin de experiența utilizatorului se poate trece la diagnoză și localizarea posibilei defecțiuni.

3. Dispunând de o înregistrare de date, semnale de vibrație, de o anumită lungime N , aceasta poate fi analizată utilizând toate tipurile de prelucrări din modulul VIBROTOOL. Din setul de date se poate renunța, de exemplu, la primele $N/3$ din date, setul de date urmând a fi completat cu alte $N/3$ date recente, furnizate de modulul VIBROSIG, și analiza continuă. Astfel, se poate realiza analiza on-line a semnalelor de vibrație, pe durata funcționării mașinii rotative, rezultând posibilele momente ale producerii unei schimbări în funcționarea acesteia, informațiile obținute urmând a fi utilizate în scop de diagnoză.

4. Gradul de realizare a obiectivelor

În Tabelul 1 se prezintă comparativ și sintetic modul în care au fost îndeplinite obiectivele generale și specifice asumate în cadrul proiectului.

Tabel 1: Gradul de îndeplinire a obiectivelor

| Obiectiv | Mod de realizare | Grad de real. |
|---|---|---------------|
| Obiectivul general: realizarea unui model experimental pentru monitorizarea proceselor vibratorii în vederea detecției și diagnozei schimbărilor în mașini și utilaje industriale, folosind tehnici avansate de măsurare și analiză bazate pe model. | S-a realizat sistemul experimental VIBROCHANGE, împreună cu subsistemele VIBROTOOL, VIBROMOD și VIBROGEN. | 100 % |
| O1: Dezvoltarea, implementarea și validarea unor metode noi, tehnici și algoritmi pentru detecția și diagnoza schimbărilor în funcționarea mașinilor și utilajelor industriale. | S-au dezvoltat metode noi împreună cu algoritmi aferenți de prelucrare a semnalelor pentru detecție și diagnoza. | 100 % |
| O2: Optimizarea algoritmilor clasici, cunoscuți, pentru CDD și pentru diverse procese vibratorii. | S-au stabilit domenii de valori pentru parametrii algoritmilor de estimare, filtrare și detecție, utilizați în cadrul metodelor de detecție și diagnoză, în funcție de specificul proceselor ce fac obiectul CDD. | 100 % |
| O3: Fuziunea informațiilor rezultate în urma (și în timpul) procesului de detecție și diagnoză a schimbărilor, precum și a efectelor acestora în spectrul de energie. | S-a elaborat o metoda de detecție robustă ce folosește fuziunea informațiilor de la mai multe surse. | 100 % |
| O4: Realizarea unei biblioteci de programe pentru CDD, care să implementeze atât metodele CDD clasice (cunoscute) cât și cele care vor fi dezvoltate în cadrul proiectului. | S-a realizat Toolbox-ul Matlab pentru CDD, VIBROTOOL, ce conține mai multe module pentru rezolvarea problemelor BSS, CDS și TFR, specifice CDD. | 100 % |
| O5: Realizarea unui modul hardware experimental pentru CDD, care să aibă ca obiectiv monitorizarea unui utilaj industrial, și care să utilizeze rezultatele la nivel teoretic, algoritmic și metodologic, obținute în cadrul | S-a realizat un modul complex, hardware și software, VIBROMOD, pentru monitorizarea vibrațiilor din procese reale. Acesta folosește parte din algoritmi testați în VIBROTOOL | 100 % |

| | | |
|--------------|--|--|
| proiectului. | și adaptați la o implementare distribuită pe mai multe nivele. | |
|--------------|--|--|

Considerăm că obiectivele generale și specifice ale proiectului VIBROCHANGE au fost îndeplinite.

5. Diseminare și impactul rezultatelor

Rezultatele cercetărilor au fost prezentate și publicate la diferite manifestări științifice internaționale și reviste, majoritatea referite în Web of Science (WOS). În total, cantitativ, s-au publicat un număr de 28 lucrări științifice la conferințe IEEE, majoritatea indexate ISI, după cum urmează ²: 4 lucrări în 2014; 3 lucrări în 2015; 9 lucrări în 2016; 11 lucrări în 2017.

În 2017, s-a publicat un articol într-o revistă indexată ISI, de clasa Q2, *Circuits Systems and Signal Processing*, Springer, (IF = 1.694).

S-a depus o Cerere de brevet de invenție la OSIM pentru sistemul VIBROCHANGE cu nr. 10571/20.06.2017, înregistrată la OSIM : A/00400/20.06.2017, *VIBROCHANGE.DS - Sistem pentru detecția schimbărilor în procese vibratorii folosind tehnici avansate de analiză bazate pe model.*

În cadrul simpozionului ISEEE-2017 (The 5th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering, Galati, 20-22 October 2017) se va organiza o Sesiune specială "Change detection in vibrational processes" în care vor fi prezentate, de fiecare partener, contribuțiile și realizările din cadrul proiectului VIBROCHANGE.

6. Concluzii

Ca urmare a celor prezentate, se poate considera că obiectivele generale și specifice ale proiectului VIBROCHANGE au fost îndeplinite în totalitate.

S-au proiectat, construit și testat o serie de produse hardware și software, asamblate în cadrul unui sistem experimental complex de testare și dezvoltare numit VIBROCHANGE.

S-au elaborat o serie de metode avansate și tehnici de prelucrare a semnalelor, în scopul îmbunătățirii performanțelor algoritmilor clasici pentru detecția schimbărilor și diagnoză.

Rezultatele obținute pot fi aplicate nu numai în domeniul monitorizării stării de bună funcționare a mașinilor rotative și a componentelor acestora, ci și în alte domenii cum ar fi: industria energetică (turbine, generatoare, etc.), ingineria civilă (clădiri mari supuse acțiunii vântului sau mișcărilor seismice, poduri, baraje, platforme marine), aeronautică (structuri și componente supuse solicitărilor), automobile și sisteme de transport, etc.

² Titlurile publicațiilor se găsesc pe pagina web a proiectului : <http://www.etc.ugal.ro/VIBROCHANGE/index.php?Lang=Ro>

Prin prisma consorțiului format și prin produsele practice realizate, proiectul a oferit șansa valorificării, dezvoltării și diversificării competențelor tehnico-științifice ale partenerilor.

Proiectul a oferit oportunitati de afirmare atat pentru cercetatorii cu experiență, dar mai ales pentru tinerii doctoranzi și post-doctoranzi din cadrul consorțiului.

Prin prezentarea și publicarea lucrărilor științifice, proiectul a permis aprofundarea cunoașterii problematicii detecției schimbării și diagnozei proceselor, prin tehnici de prelucrare a semnalelor, și a permis abordarea unor noi direcții de cercetare cu trăsături specifice fiecărui partener.

Galați, 20.09.2017

Director proiect,

Prof.dr.ing Dorel Aiordăchioaie