

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

**SECȚIUNEA 1**

**RAPORTUL ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC (RST) / 20 pagini**

<b>Etapa de execuție:</b>	II
<b>Titlul etapei:</b>	Stabilirea structurii modelului experimental și a metodelor CDD implementate
<b>Titlu proiect:</b>	Model experimental pentru detecția și diagnoza schimbărilor în procese vibratorii folosind tehnici avansate de măsurare și analiză bazate pe model
<b>Cod proiect:</b>	PN-II-PT-PCCA-2013-4-0044
<b>Acronim proiect:</b>	VIBROCHANGE
<b>Autoritate contractantă:</b>	Unitatea Executivă pentru Finanțarea Învățământului Superior, a Cercetării, Dezvoltării și Inovării (UEFISCDI)
<b>Contractor:</b>	Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați
<b>Contract de finanțare nr:</b>	224 / 01.07.2014
<b>Termen etapă:</b>	15.12.2015

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 ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC<sup>1</sup>

(Sinteza 20 pagini)<sup>2</sup>

## 1. Rezumatul etapei

### 1.1. Localizarea cercetării

Proiectul abordează problema detecției și diagnozei schimbărilor (*Change Detection and Diagnosis - CDD*) în procese vibratorii folosind tehnici avansate de măsurare și 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 acestora.

Cercetările din cadrul proiectului se înscriu în tendința și cerințele crescute, din partea utilizatorilor, în ceea ce privește înlocuirea procedurilor de întreținere sistematică a mașinilor și utilajelor industriale prin strategii de întreținere condițională, bazate pe supravegherea continuă sau prin sondaj a comportării lor, cu scopul de a preveni funcționarea anormală a acestora și a evita producerea unor catastrofe de natură economică sau ecologică. În acest context, apare ca soluție necesară, posibilă și eficientă, detecția din timp a funcționării anormale a sistemului în raport cu o caracterizare a sa în modul de lucru normal: fără excitare artificială, schimbare a regimului de lucru sau oprire.

Proiectul își propune să dezvolte două produse, ambele noi, originale și competitive internațional, care să ofere soluții la rezolvarea problemelor CDD pentru procese vibratorii. Primul produs este o bibliotecă de programe, de tip Toolbox Matlab (VIBROTOOL), care să implementeze cei mai buni algoritmi pentru CDD (unii originali, brevetabili, dar și unii existenți, care vor fi optimizați în cadrul proiectului), utilizând tehnici clasice, dar și tehnici noi, bazate pe analiza multirezoluție, soft computing și fuziunea informației. Produsul va constitui o referință pentru problema CDD și va permite evaluarea și raportarea performanțelor algoritmilor noi, dezvoltați în cadrul proiectului, la cei cunoscuți. Al doilea produs este un modul hardware experimental (VIBROMOD), având la bază o aplicație software pentru CDD, ce va fi utilizat în monitorizarea unor procese pilot, în condiții de laborator, și a unui proces industrial complex. Acesta din urmă va implementa anumite componente din VIBROTOOL. Modelul fizic va permite verificarea algoritmilor în condiții reale de exploatare și va constitui baza pentru lansarea comercială a produselor pentru CDD. Cele două componente menționate, VIBROTOOL și VIBROMOD, împreună cu sistemul de măsură VIBROSIG, vor constitui modelul experimental pentru CDD: VIBROCHANGE (Fig. 1).

Proiectul este implementat de un consorțiu format din Universitatea „Dunărea de Jos” Galați (CO), INCD în Informatică din București (P1), INCD pentru Mecatronica și Tehnica Măsurării din București (P2) și SC Teamnet Engineering din București (P3).

---

<sup>1</sup>Documentul este întocmit conform indicațiilor UEFISCDI: Rezumat+Descriere tehnico-științifică

<sup>2</sup>Raportul de cercetare al etapei conține cca 280 pagini și poate fi furnizat la cerere.

## 1.2. Obiectivele proiectului

Obiectivul general al proiectului este 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.

Obiectivele specifice urmărite 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 care vor fi dezvoltate în cadrul proiectului;

**O5:** Realizarea unui modul hardware experimental pentru CDD (VIBROMOD), având la bază o aplicație software, care să aibă ca obiectiv monitorizarea unui utilaj industrial, și care să utilizeze rezultatele la nivel teoretic, algoritmic și metodologic, obținute în cadrul proiectului.

Pentru atingerea obiectivelor menționate, vor fi parcurse următoarele trei etape, conform Actului Adicional nr. 3/2015, semnat cu UEFISCDI:

**Etapa I** (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 va permite definirea unor direcții de aprofundare a domeniului.

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

**Etapa III** (decembrie 2016), **Construcție și testare model experimental**, se vor construi modelul experimental și sistemul de testare. Toolbox-ul Matlab (VIBROTOOL) va fi optimizat, iar parte din funcțiile implementate în acesta vor fi implementate și în modulul hardware pentru CDD (VIBROMOD), având la bază o aplicație software. Cele două module, împreună cu sistemul de măsurare (VIBROSIG), reprezintă principalele componente ale modelului experimental VIBROCHANGE.

## 1.3. Obiectivele Etapei a II-a

Etapa din anul 2015 a avut două obiective de bază. Primul obiectiv se referă la elaborarea unui set de programe dedicate problemei CDD, numit generic Toolbox Matlab pentru CDD (VIBROTOOL). Programele implementează metode, tehnici și algoritmi pentru monitorizarea proceselor vibratorii (mașini și utilaje industriale), bazate pe model. Acestea

inclusiv tehnici de filtrare, tehnici de verosimilitate maximă, diferite „distanțe” dintre modele, detecția schimbărilor multiple/segmentare, extragerea caracteristicilor în domeniile timp și frecvență, demixarea „oarbă” a semnalelor, analiza timp-frecvență, etc.

Al doilea obiectiv constă în stabilirea structurii de bază a modului hardware pentru CDD (VIBROMOD), având la bază o aplicație software, ca echipament independent. Structura va fi folosită la alegerea unei soluții hardware în vederea realizării fizice și a testării acestuia, în diverse scenarii industriale, în cursul **Etapei a III-a** a proiectului.

În Fig. 1 se prezintă legătura dintre principalele module ale modelului experimental VIBROCHANGE: VIBROSIG (Sistemul de măsurare a vibrațiilor), 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, se va construi un sistem electromecanic (VIBROGEN) pentru generarea vibrațiilor în condiții controlate de lucru a proceselor electro-mecanice studiate.

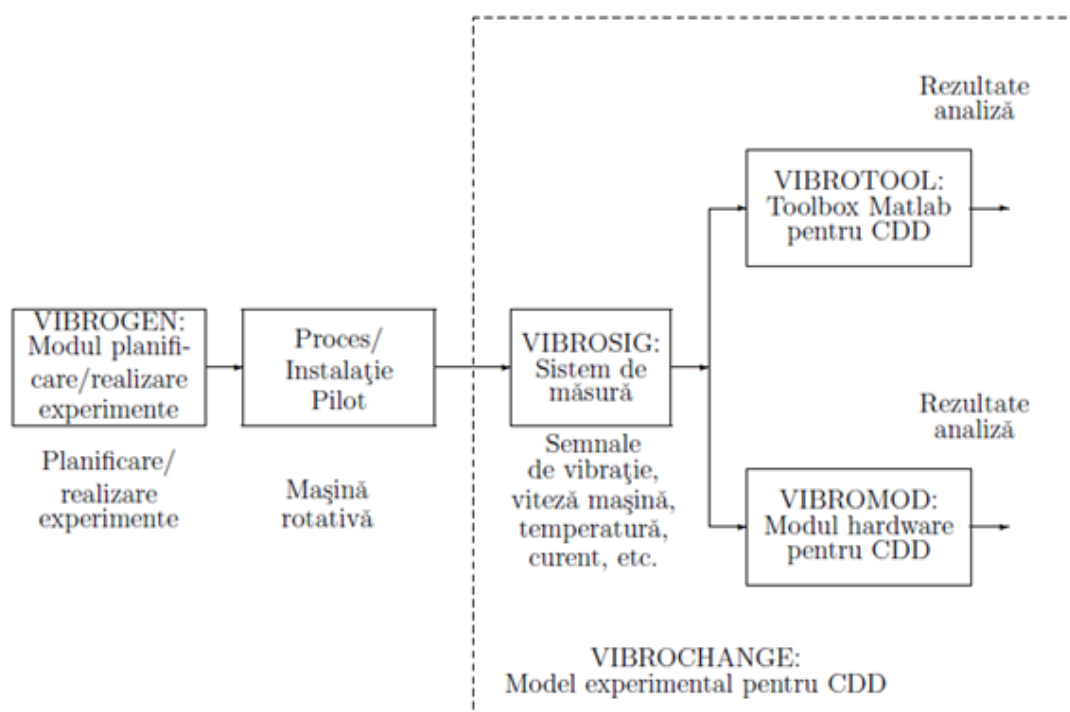


Fig. 1: Sistemele fizice componente ale modelului experimental VIBROCHANGE

## 1.4. Descrierea activităților

Activitățile desfășurate în cadrul **Etapei a II-a** a proiectului au condus la stabilirea structurilor de bază ale celor două produse ce vor fi realizate în cadrul proiectului, Toolbox-ul Matlab pentru CDD (VIBROTOOL) și modulul hardware (VIBROMOD), având la bază o aplicație software, ca echipament independent pentru problema CDD.

Activitățile desfășurate în cadrul acestei etape sunt conforme cu cele definite în cadrul **Etapei a II-a**, din planul de realizare al proiectului. De regulă, aceste activități se regăsesc în cadrul diferitelor capitole ale raportului de cercetare. Facem, în continuare, o scurtă descriere a acestor activități.

La activitatea **A.2.1. Selecția componentelor investigate** s-au stabilit criteriile de selecție, din punctul de vedere al modelării și identificării și s-a făcut selecția componentelor mecanice (lagăre și cutii de viteze) ce se urmăresc a fi monitorizate.

Activitatea **A.2.2. Stabilirea cerințelor funcționale ale modelului experimental** a permis stabilirea de funcții, parameetri și rezultate ce se urmăresc a se obține, pentru unele componente mecanice din procese studiate anterior, în vederea creerii unei referințe. S-au stabilit de asemenea funcțiile necesare măsurătorilor.

Activitatea **A.2.3. Stabilirea metodelor și tehnicilor CDD ce vor fi implementate în modelul experimental** a permis selecția metodelor CDD comune pentru Toolbox-ul Matlab (VIBROTOOL), cât și pentru modulul hardware (VIBROMOD), echipament experimental având la bază o aplicație software. Au fost selectate metode și algoritmi pentru CDD în vederea studiului amănunțit.

Activitatea **A.2.4. Stabilirea structurii modelului experimental** a condus la stabilirea componentelor modelului care să realizeze implementarea metodelor propuse. S-a stabilit structura minimă pentru CDD, din punct de vedere algoritmic și al blocurilor de calcul. S-a stabilit structura minimală pentru măsurători și transmisii de date, precum și structura minimală compatibilă cu celelalte echipamente de pe piață și cu procesele ale căror componente mecanice vor fi monitorizate.

Activitatea **A.2.5. Proiectarea componentelor modelului experimental** a avut ca obiect proiectarea principalelor blocuri de calcul și s-a stabilit structura minimală a modelului experimental.

Activitatea **A.2.6. Diseminarea prin comunicarea și publicarea rezultatelor cercetării** a permis publicarea în anul 2015 a trei lucrări la conferințe internaționale, două în străinătate și una în țară. Lucrările sunt la conferințe BDI/ISI și au fost organizate sub egida IEEE. În cadrul consorțiului au avut loc patru întâlniri de lucru, câte una la fiecare din cei patru membri ai acestuia. Aceste întâlniri au permis un contact direct între parteneri și au condus la cunoașterea punctelor de vedere ale acestora, în legătură cu tema de cercetare abordată.

Activitatea **A.2.7. Stabilirea criteriilor de alegere a poziției traductoarelor și de selectare a tehnicilor de măsurare în cazul CDD** a permis studiul și stabilirea celor mai bune metode în alegerea poziționării traductoarelor de vibrație și a tehnicilor de măsurare aferente.

În cadrul activității **A.2.8. Proiectarea sistemului de măsurare și culegere date pentru testarea sistemului experimental** s-a realizat un mini-sistem experimental/fizic de generare a vibrațiilor, comandat de calculator, în vederea testării în laborator a modelului experimental. De asemenea, pentru reproducerea cât mai fidelă a condițiilor industriale de exploatare a mașinilor rotative s-a proiectat un sistem mai simplu, dar mai general, ce va fi realizat în cursul etapei următoare a proiectului.

În cadrul activității **A.2.9 Management proiect** s-au organizat întâlniri de lucru la sediul coordonatorului, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, la sediul partenerului P1 – ICI București, la sediul P2-INCDMTM București și la sediile P3-Teamnet Engineering din București și Galați. Cea mai mare parte a activităților de lucru și de schimb de experiență și de validare reciprocă a rezultatelor obținute s-a desfășurat însă prin comunicare electronică, prin email și telefon. O parte însemnată a timpului a fost alocată negocierii, contractării,

întocmirii, semnării și urmăririi documentelor de raportare și a acelor două Acte Adiționale încheiate în 2015.

Activitățile **A.2.10.** și **A.2.11** (ultima fiind activitate nouă, inclusă în baza Actului Aditonal nr. 3/2015) **Dezvoltare bibliotecă de programe pentru CDD** au permis dezvoltarea unei biblioteci de programe pentru CDD în mediul Matlab (metode clasice și avansate). Aceste programe sunt organizate pe două direcții, un nivel demo și un nivel de lucru, și pot lucra cu semnale generate prin simulare sau înregistrate în procese reale. Biblioteca de programe va fi completată cu o serie de metode avansate pentru CDD și va fi testată cu date reale din laborator, cât și din mediul industrial, în cadrul următoarei etape a proiectului. Parte din metodele dezvoltate în această etapă vor fi implementate și testate și pe modulul hardware (VIBROMOD) pentru CDD, având la bază o aplicație software, ce va fi executat fizic în ultima etapă a proiectului.

Activitatea **A.2.12.** (activitate nouă, inclusă în baza Actului Aditonal nr. 3/2015) **Validarea componentelor software CDD și optimizarea funcțională** a constat în rescrierea unor module program din cadrul Toolbox-ului Matlab (VIBROTOOL), initial testate minimal cu date sintetice, iar ulterior testate în condiții de experimentare complexe, din punct de vedere al zgomotului, și utilizând semnale de vibrație reale (acelerații seismice), fapt ce a condus la creșterea fiabilității și la optimizarea funcțională a acestora.

Raportul final de cercetare al etapei cuprinde 11 capitole și 4 Anexe, în cadrul a 280 de pagini. Majoritatea capitolelor corespund, ca denumire și obiective, cu activitățile și subactivitățile din planul de realizare, însă sunt capitole cu rezultate din mai multe activități. Legăturile de bază dintre capitolele din raportul de cercetare și activitățile din planul de realizare, sunt prezentate în **Tabelul 1.**

**Tabelul 1** – Legăturile primare dintre capitolele raportului de cercetare și activitățile din planul de realizare

Nr.	Denumire capitol	Activități
1.	Introducere	A.2.1...12
2.	Selecția componentelor investigate și a metodelor de modelare și identificare în scopul CDD	A.2.1
3.	Stabilirea cerințelor funcționale ale modelului experimental	A.2.2
4.	Metode CDD implementate în Toolbox-ul Matlab și în modelul experimental	A.2.3
5.	Structura minimală pentru CDD, din punct de vedere algoritmic și a blocurilor de calcul	A.2.4
6.	Proiectarea blocurilor de calcul pentru CDD în modelul experimental	A.2.5, 6
7.	Biblioteca de programe pentru CDD	A.2.10, 11, 12
8.	Structura minimală pentru CDD, din punctul de vedere al managementului datelor	A.2.4, 5
9.	Stabilirea criteriilor de alegere a pozițiilor traductoarelor și de selectare a tehnicilor de măsurare în cazul CDD	A.2.7
10.	Proiectarea sistemului pentru testarea modelului experimental	A.2.8
11.	Concluzii finale	A.2.1...12

În cadrul etapei următoare a proiectului, finală, **Etapa a III-a, Construcție și testare model experimental**, cu termen de predare 15.12.2016, se vor desfășura mai multe activități ce se referă, în principal, la: dezvoltarea bibliotecii de programe pentru CDD (metode avansate); validarea componentelor software CDD și optimizarea funcțională; evaluarea prin simulări

Monte-Carlo a metodelor CDD implementate; proiectarea modulelor software pentru modulul hardware experimental pentru CDD (VIBROMOD); construcția sistemului de măsurare și culegere date pentru testarea modelului experimental; validarea modulelor software CDD în cadrul modulului experimental VIBROMOD.

## 1.5. Rezultate

Rezultatele activității de cercetare, desfășurate în cadrul **Etapei a II-a** a proiectului, sunt prezentate sub forma unui Raport de cercetare ce conține 280 de pagini. Pentru activitatea de predare s-a realizat, conform instrucțiunilor UEFISCDI, prezentul document, ce reprezintă o sinteză a Raportului de cercetare original. Raportul de față poate fi găsit și pe pagina de internet a proiectului <sup>3</sup>.

Din cele prezentate în cadrul studiului, ce face obiectul **Etapei a II-a**, etapă intermediară a proiectului, se prezintă rezultatele de bază:

1. Au fost selectate principalele componente ale mașinilor rotative care vor face obiectul detecției și diagnozei. Aceste componente se referă, în principal, la lagărele și cutiile de viteze ale mașinilor rotative, pentru care se prezintă modul de transmisie a vibrațiilor și modelele de vibrații, specifice celor două componente. În scopul diagnosticării acestora au fost stabilite mai multe euristici de diagnosticare, specifice echipamentelor de rotație, care vor servi drept bază în rezolvarea problemei de diagnosticare, după detecția producerii unei schimbări în funcționarea mașinii rotative.
2. Au fost selectate metodele și tehnicile specifice modelării și identificării, în scopul CDD, ce vizează în principal separarea ”oarbă” a surselor de vibrație, extragerea caracteristicilor în timp și frecvență, și detecția schimbărilor în dinamica mașinii rotative, pentru care au fost dezvoltate componentele software, implementate în Toolbox-ul Matlab pentru CDD (VIBROTOOL) și ulterior în modulul hardware pentru CDD (VIBROMOD) (unele dintre acestea).
3. S-au stabilit cerințele funcționale ale modelului experimental VIBROCHANGE, sub forma funcțiilor, parametrilor și a rezultatelor care urmează a fi obținute cu acesta. S-au stabilit și funcțiile necesare măsurătorilor de vibrații, sub aspectul alegerii traductoarelor și a caracteristicilor acestora, în scopul atingerii obiectivelor monitorizării.
4. S-au elaborat programele de bază în cod Matlab ce vor defini toolbox-ul CDD (VIBROTOOL). Acestea sunt organizate pe două direcții: programe demo și subrutine/funcții de lucru. Programele demo au fost testate cu semnale sintetice sau cu semnale de vibrație înregistrate anterior: semnale seismice, accelerații pe diferite mașini, etc., semnale ce constituie o referință pentru celelalte programe de lucru.

Toolboxul Matlab pentru CDD implementează mai mulți algoritmi pentru rezolvarea problemei CDD, dintre care unii originali, dezvoltați în cadrul proiectului, dar și unii preluați din diferite surse publice, în special pentru separarea „oarbă” a surselor și analiza timp-frecvență, care împreună cu cei originali concură la rezolvarea problemei CDD.

---

<sup>3</sup><http://www.etc.ugal.ro/VIBROCHANGE/vibrochange.php>

5. Au fost scrise și testate funcțiile elementare, similare celor din Matlab (standard, deci fără funcții dedicate folosite în toolbox-uri) pentru modulul VIBROMOD, în vederea CDD. Aceste funcții vor fi implementate în final pe o platformă care nu rulează mediul Matlab.

6. S-a stabilit structura minimală a modelului experimental, din punctul de vedere al blocurilor de calcul și algoritmilor utilizați în problemele CDD. Structura conține blocuri de calcul specifice prelucrării primare a semnalelor de vibrație, pentru separarea surselor de vibrație, analiza timp-frecvență, calculul entropiei Renyi, detecție/segmentare. Blocurile pot fi folosite selectiv și pentru alte tipuri de semnale, nu numai cele de vibrație, cum sunt semnalele seismice sau bio-medicale.

7. S-au elaborat trei moduri de utilizare a modelului experimental, care fac uz de componentele VIBROSIG, VIBROTOOL și/sau VIBROMOD, două off-line și unul on-line, care s-au detaliat în cadrul Capitolului 3 al Raportului de cercetare al etapei.

8. S-au stabilit blocurile de calcul ce vor fi incluse în modelul experimental, după cum urmează:

- PRO1. Bloc calcul parametri statistici
- PRO2. Bloc calcul spectru de amplitudine Fourier
- PRO3. Bloc filtrare semnale
- BSS1. Bloc separare surse
- TFR1. Bloc calcul distribuție timp-frecvență
- TFR2. Bloc calcul entropie Renyi
- CDS1. Bloc segmentare

și pot fi interconectate în diferite moduri, contribuind astfel la rezolvarea problemei CDD într-o situație practică.

9. S-au stabilit și elaborat modulele de program pentru Toolbox-ul Matlab. Acesta conține categorii de module software pentru:

- prelucrarea primară a semnalelor (PRO)
- detecția schimbărilor și segmentare (CDS)
- separarea "oarbă" a surselor (BSS)
- analiza timp-frecvență (TFR)

10. S-a definit și realizat fuziunea mai multor categorii de algoritmi în cadrul unor proceduri originale, utilizate în monitorizarea mașinilor rotative, proceduri care se vor regăsi și în cadrul modelului experimental VIBROCHANGE, care va fi finalizat în cadrul **Etapei a III-a** a proiectului (finală) și testat pe date experimentale culese pe echipamente pilot și pe un proces operând în condiții reale/industriale de funcționare.

11. S-a realizat și testat un micro-sistem de generare a vibrațiilor mecanice (VIBROGEN), în condiții controlate de lucru și sarcină. Acesta poate fi folosit în mod independent sau pentru validarea domeniului de lucru al traductoarelor, precum și pentru punerea în evidență a unor defecte în scopul monitorizării mașinii rotative. Pe baza datelor furnizate de acest micro-sistem, în etapa următoare, se va construi un sistem mai general, de testare cu traductoare de vibrație adaptate defectelor mașinilor rotative.



## 2. Descrierea științifică și tehnică

În continuare se descriu, detaliat, obiectivele și rezultatele fiecărui capitol din Raportul de cercetare al **Etapei a II-a**.

Capitolul 2, Selecția componentelor investigate și a metodelor de modelare și identificare în scopul CDD, face o prezentare a principalelor componente ale mașinilor rotative care vor face obiectul detecției și diagnozei, precum și a metodelor și tehnicilor ce vor fi avute în vedere, din punct de vedere al modelării și identificării, pentru detecție și diagnoză. Componentele investigate vizează, în principal, lagărele și cutiile de viteze ale mașinilor rotative, pentru care se prezintă modul de transmisie a vibrațiilor și modelele de vibrații în cele două cazuri.

Capitolul 3, Stabilirea cerințelor funcționale ale modelului experimental, are ca obiectiv stabilirea funcțiilor, parametrilor modelului experimental și a rezultatelor care urmează a fi obținute cu acesta. De asemenea, se face și o trecere în revistă a funcțiilor necesare măsurătorilor, sub aspectul alegerii traductoarelor și a caracteristicilor acestora în scopul scopul atingerii obiectivelor monitorizării mașinilor/echipamentelor rotative.

Modelul experimental se va regăsi sub următoarele variante funcționale:

**V1. O prima variantă** va include sistemul de culegere on-line a datelor experimentale (VIBROSIG) și biblioteca de programe, de tip Toolbox Matlab pentru CDD (VIBROTOOL), prelucrările datelor urmând a se face în mediul Matlab, ceea ce va oferi posibilități extinse de prelucrare și analiză a semnalelor de vibrații.

**V2. O a doua variantă** va include sistemul de culegere on-line a datelor experimentale (VIBROSIG) și anumite module program din Toolbox-ul Matlab pentru CDD (VIBROTOOL), programate într-un limbaj specific și implementate în modulul hardware pentru CDD (VIBROMOD), pentru utilizare independentă de mediul Matlab. Realizarea acestei versiuni a modelului experimental, limitată din punct de vedere a facilităților de calcul, din cauza problemelor pe care le ridică implementarea funcțiilor în noul limbaj, va depinde în mare măsură de finanțarea proiectului în anul 2016.

Modelul experimental urmează să includă mai multe funcțiuni, care vor fi prezentate succint în continuare; acestea se prezintă detaliat în cadrul capitolelor care urmează. Astfel, urmează să se implementeze funcțiuni pentru:

- măsurarea semnalelor;
- prelucrarea primară a semnalului;
- separarea surselor primare de vibrație;
- analiza timp-frecvență;
- detecția schimbărilor în semnale;
- stocarea și regăsirea informației.

În ceea ce privește modelul experimental, considerăm ca posibile următoarele moduri de utilizare:

**M1:** Disponând de o înregistrare de date, semnale de vibrație, acestea pot fi analizate utilizând toate tipurile de prelucrări implementate în cele două module menționate anterior. Rezultatele obținute oferă o imagine de ansamblu asupra proceselor vibratorii specifice mașinii rotative ce face obiectul monitorizării. Acest tip de analiză este una "off-line".

**M2:** În cazul în care se dispune de o înregistrare de probă a semnalelor de vibrație din funcționarea normală a mașinii rotative (înregistrare "martor"), aceasta poate fi concatenată cu o înregistrare curentă din funcționarea mașinii rotative, semnalul rezultat urmând a fi analizat cu toate tipurile de prelucrări implementate în cele două module menționate anterior, în urma analizei rezultând dacă datele celor două înregistrări sunt consistente, sau dacă s-a produs o schimbare în funcționarea mașinii rotative, situație în care se poate trece la diagnoză și localizarea posibilei defecțiuni. Această analiză este tot una "off-line".

**M3:** Disponând de o înregistrare de date, semnale de vibrație, de o anumită lungime  $N$ , acestea pot fi analizate utilizând toate tipurile de prelucrări implementate în cele două module menționate anterior. 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 și analiza continuă. Astfel, se poate realiza o analiză "on-line" a semnalelor de vibrație pe durata funcționării mașinii rotative, rezultând posibilele momente ale producerii unei schimbări în funcționarea acesteia.

**Capitolul 4, Metode CDD implementate în Toolbox-ul Matlab (VIBROTOOL) și în modulul hardware experimental (VIBROMOD),** face o trecere în revistă a principalelor metode și tehnici specifice problematicii CDD. O parte din aceste module software urmează a fi implementate și în modulul hardware experimental VIBROMOD, prin transcriere într-un limbaj specific acestuia, cel mai probabil Java, în cadrul **Etapei a III-a** a proiectului.

Ținând seama de cerințele funcționale ale modelului experimental (VIBROCHANGE), menționate în Capitolul 3 al raportului, au fost implementate metode și tehnici specifice prelucrării primare a semnalelor (calculul parametrilor statistici, calculul spectrului de amplitudine Fourier, filtrare, etc.), detecției și diagnozei schimbărilor (CDD) în semnalele de vibrație, separării "oarbe" a surselor și analizei timp-frecvență.

Procedura complexă de detecție și diagnoză, pe lângă metodele specifice CDD, face apel și la alte metode și tehnici, în scopul punerii în evidență a unor schimbări în dinamica semnalelor care fac obiectul analizei. În acest scop au fost avute în vedere tehnicile de separare "oarbă" a surselor de vibrație, în cazul mixărilor instantanee, caz frecvent întâlnit la mașini rotative, și tehnicile de analiză timp-frecvență, dată fiind variația conținutului spectral al semnalelor de vibrație cu timpul.

Metodele și algoritmi auți în vedere pentru detecție sunt de tip cantitativ și fac uz de modelarea parametrică a semnalelor de vibrație mono- și multivariabile, în final problema de detecție fiind redusă la una de decizie. În acest scop se pot utiliza mai multe teste statistice, aplicate unor reziduuri sau "distanțe" dintre modele. Utilizarea tehnicilor de separare "oarbă" a surselor de vibrație va permite lucrul acestor metode și a algoritmilor CDD pe spații de dimensiuni reduse, precum și operarea cu semnale monodimensionale, fapt deloc de neglijat.

Aplicarea metodelor și algoritmilor CDD în planul bidimensional timp-frecvență, după evaluarea concentrației în timp a energiei semnalului, prin calculul entropiei Renyi, se dovedește mult mai robustă, față de aplicarea acestor metode și tehnici, direct pe semnalele de vibrație, fapt pentru care aceasta procedura a fost reținută în cadrul modelului experimental VIBROCHANGE.

**Capitolul 5, intitulat Structura minimală pentru CDD, din punct de vedere algoritmic și a blocurilor de calcul,** face o trecere în revistă a structurii modelului experimental din punct de vedere al blocurilor de calcul și al algoritmilor utilizați în probleme de detecție și diagnoză a schimbărilor în funcționarea mașinilor rotative, în scopul monitorizării și întreținerii

condiționale a acestora. În Fig. 2 se prezintă principalele blocuri de calcul, de prelucrare a semnalelor de vibrație, ale modelului experimental VIBROCHANGE: complet implementate în cadrul Toolbox-ului Matlab (VIBROTOOL) și parțial în cadrul modulului hardware, având la bază o aplicație software (VIBROMOD).

Fig. 2 prezintă mai multe moduri în care blocurile de calcul pot fi interconectate, în vederea rezolvării unor probleme de monitorizare a mașinilor rotative. Preprelucrarea primară a semnalului de vibrație include o serie de trei module (blocuri), așa cum se prezintă în partea stângă a Fig. 2:

1. Calculul parametrilor statistici ai semnalului; 11 parametri statistici (media, rangul, mediana, dispersia, deviația standard, media rectificată, rădăcina medie pătrată, vârful maxim, factorul de creastă, gradul de oblicitate, coeficientul curtosis), funcția de densitate de probabilitate (histograma) (modulul PRO1);
2. Calculul spectrului de amplitudine Fourier. Informația care rezultă va putea fi utilizată și în scopuri de diagnoză (localizare a unei posibile defecțiuni) (modulul PRO2);
3. Filtrarea componentelor semnalului, în variantele trece-jos, trece-sus sau trece-bandă, în funcție de obiectivul urmărit (modulul PRO3).

Separarea surselor primare de vibrație (prin modulul BSS1) va furniza sursele independente de vibrație precum și modelul de mixare al acestora. Deoarece în cele mai multe dintre cazuri, care apar în monitorizarea mașinilor rotative, mixarea surselor este de tip instantaneu, vor fi implementați algoritmul de separare SOBI (Second Order Blind Identification) și JADE (Joint Approximate Decomposition of Eigen matrices), ce fac uz de statistici de ordinul doi și respectiv statistici de ordin superior.

Pentru analiza timp-frecvență (modulul TFR1), considerăm calculul distribuției cu interferență redusă - RID ca principal instrument utilizat în acest scop. Imaginea timp-frecvență va fi utilizată la calculul entropiei Renyi pe termen scurt, (modulul TFR2) ca instrument de extragere a informației rezultate și utilizare a acesteia într-o problemă de asistare a deciziei pentru CDD. În modulul VIBROTOOL vor fi implementați și alți algoritmi de tip Cohen pentru calculul distribuției timp-frecvență.

Detecția schimbărilor și segmentarea va fi realizată, în principal, de o procedură de detecție/segmentare concepută în cadrul proiectului, ca fiind cea mai robustă dintre toate metodele și tehnicile implementate în cadrul Toolbox-ului Matlab (VIBROTOOL) și necesitând din partea utilizatorului un număr minim de parametri de proiectare (modulul CDS1). Această procedură va putea fi aplicată direct, pe semnalele de vibrație măsurate (mono- sau multidimensionale), pe sursele primare de vibrație, sau pe entropia Renyi pe termen scurt.

Menționăm faptul că datele de intrare specifice modulelor de calcul prezentate anterior vor fi introduse de utilizator printr-o fereastră, de tip întrebare-răspuns, cu validare.

Notă: Modelul experimental va dispune de un sistem de administrare și regăsire a seturilor de date obținute în urma măsurătorilor, și a rezultatelor prelucrărilor efectuate. Rezultatele vor fi afișate sub forma ecranelor unor instrumente virtuale și vor constitui informații care urmează a fi analizate în scopul luării unor decizii pentru CDD. Aceste prelucrări constituie obiectul unui capitol separat, Capitolul 8, dedicat managementului datelor.

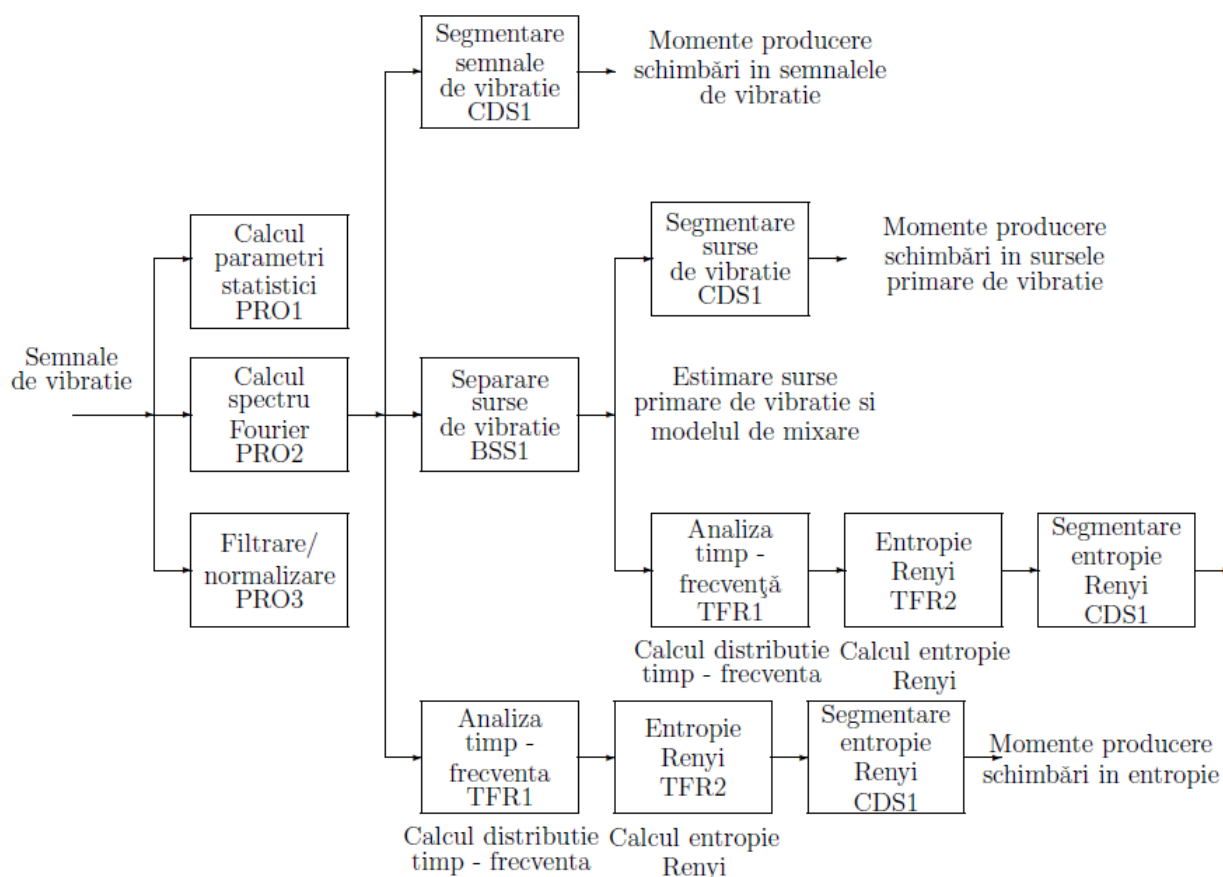


Fig. 2 Principalele blocuri de calcul de prelucrare a semnalelor de vibrație ale modelului experimental VIBROCHANGE

Capitolul 6 se referă la **Proiectarea blocurilor de calcul pentru CDD în modelul experimental**. Capitolul face o sinteză a datelor de intrare și a rezultatelor ce se obțin în cadrul diferitelor blocuri de calcul ale modelului experimental, care au constituit obiectul capitolului anterior. Aceste module de calcul se vor regăsi în cadrul Toolbox-ului Matlab pentru CDD (VIBROTOOL), dezvoltat în cadrul proiectului, dar urmează a suferi unele adaptări pentru a facilita utilizarea lor și în modulul hardware, bazat pe o aplicație software, pentru CDD (VIBROMOD), cu utilizarea unui număr minim de parametri de intrare și valori implicite pentru unii din acești parametri.

Capitolul 7 prezintă **Biblioteca de programe pentru CDD**, o bibliotecă de programe gen Toolbox Matlab (VIBROTOOL), care implementează mai mulți algoritmi pentru rezolvarea problemei CDD, dintre care unii originali, dezvoltați în cadrul proiectului, iar unii preluați din diferite surse publice de referință, care împreună cu cei originali concură la rezolvarea problemei CDD.

Evidențiem modul de fuziune al diferiților algoritmi în cadrul unor proceduri originale, utilizate în monitorizarea mașinilor rotative; unele dintre aceste proceduri se vor regăsi și în cadrul modulului hardware bazat pe o aplicație software pentru CDD (VIBROMOD), care va fi dezvoltat în **Etapa a III-a** a proiectului (finală) și testat pe date experimentale culese pe echipamente pilot și pe un proces ce operează în condiții reale de funcționare.

Anticipăm ca setul de programe dezvoltate în cadrul acestei etape va constitui o referință pentru rezolvarea problemei CDD, urmând a fi evaluați în raport cu cei prezenți în literatura de specialitate. În etapa curentă, Toolbox-ul Matlab conține următoarele categorii de module software:

1. Programe pentru prelucrarea primară a semnalelor (PRO): 3 module + 1 demo
2. Programe pentru detecția schimbărilor și segmentare (CDS): 8 module + 4 demo
3. Programe pentru separarea „oarbă” a surselor (BSS) : 2 module + 2 demo
4. Programe pentru analiza timp-frecvență (TFR): 15 module + 5 demo

Cele patru categorii de module program menționate vor contribui împreună la rezolvarea unei probleme CDD în scop de monitorizare a mașinilor rotative, astfel:

- modulul PRO va permite o primă analiză a caracteristicilor fenomenelor produse în funcționarea mașinii, furnizând informații asupra modului în care vor continua investigațiile; acesta include module pentru calculul parametrilor statistici, calculul spectrului de amplitudine Fourier și filtrarea semnalelor;
- modulul CDS va permite o primă detecție a schimbărilor în semnalele de vibrație măsurate, sau în principalele surse de vibrație, determinate cu programe din modulul BSS, inclusiv segmentarea semnalelor analizate în zone cu caracteristici similare; acesta include module program pentru detecția schimbărilor în valoarea medie a unui semnal afectat de zgomot, detecția schimbărilor utilizând tehnici de filtrare și un singur model de tip autoregresiv (AR) cu diferite criterii de „stop”, detecția schimbărilor utilizând două modele de tip autoregresiv (AR), o fereastră mobilă și diferite „distanțe” între modele și criterii de „stop”, detecția schimbărilor multiple/segmentarea semnalului folosind metoda probabilității maxime a posteriori (MAP); sunt incluse și module program auxiliare pentru simulare, estimare, reprezentări grafice specifice, etc. și se poate opera cu semnale mono- sau multidimensionale.
- modulul BSS va permite separarea „oarbă” a surselor în cazul mixărilor instantanee utilizând statistici de ordinul doi (Second Order Blind Identification – SOBI) și statistici de ordin superior (Joint Approximate Diagonalisation of Eigen matrices – JADE) pentru semnale reale.
- modulul TFR va permite vizualizarea reprezentării timp-frecvență, calculul întârzierii de grup și a dispresiei estimatorului, frecvenței instantanee și a dispersiei estimatorului, calculul marginalelor și a energiei reprezentării, calculul entropiei Renyi, pentru un semnal real în cazul următoarelor distribuții din clasa Cohen: spectrograma, distribuția Winger-Ville, pseudo-distribuția Winger-Ville, pseudo-distribuția Wigner-Ville netezită, distribuția Choi-Williams, distribuția cu interferență redusă pentru nuclee de tip Bessel, binomial, Hanning și triunghiular; pentru distribuțiile menționate anterior se poate realiza și calculul entropiei Renyi normalizate de ordinul 3, care poate face obiectul analizei cu module program de detecție/segmentare. Componentele menționate se dovedesc deosebit de utile în post-procesarea informației din imaginea timp-frecvență, în scopul diagnozei.

Toolbox-ul Matlab pentru CDD (VIBROTOOL) conține toate elementele de bază necesare rezolvării unei probleme de monitorizare și întreținere condițională a mașinilor rotative și constituie punctul de plecare pentru dezvoltarea de aplicații. Toolbox-ul Matlab pentru CDD este operațional în mediul de lucru Matlab, versiunea 6.5 sau una superioară, și face apel la toolbox-urile Matlab: IDENT, destinat identificării sistemelor și SIGNAL, destinat prelucrării semnalelor.

Menționăm că multe din metodele și tehnicile implementate în cadrul instrumentului VIBROTOOL sunt originale, fapt confirmat de publicarea, în ultimii ani, de către autorii acestui proiect a unor lucrări în reviste ISI bine cotate în domeniu: *Mathematics and Computers in Simulation*, North-Holland, (IF = 0.812). *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, (IF=1.371), *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, (IF =1.824). *Digital Signal Processing*, Elsevier, (IF=1.495). Prezentul proiect a creat condițiile valorificării acestei expertize în cercetarea aplicativă ce vizează dezvoltarea sistemului VIBROCHANGE.

Toate modulele program din cadrul Toolbox-ului Matlab pentru CDD (VIBROTOOL) au fost testate cu date sintetice și cu semnale vibratorii de tip accelerații seismice, cu rezultate bune, urmând a face obiectul unor investigații suplimentare (prin simulări Monte-Carlo) în cadrul **Etapei a III-a** a proiectului. Menționăm, de asemenea, utilizarea acestui instrument în cadrul unei aplicații de monitorizare a unei pompe de mare capacitate, acționată de un electromotor. Setul de date care a făcut obiectul analizei provenea de la două pompe identice, una aflată în regim de funcționare normal, iar cealaltă în regim de avarie, după inducerea unei defecțiuni la cutia de viteze. Măsurătorile au fost efectuate pe 7 canale, la sarcina minimă și înaltă frecvență, filtrate „trece-jos” la 5000 Hz. Datele utilizate fac obiectul mai multor lucrări publicate și de alți autori, și au fost furnizate de TechnoFysica, Delft, The Netherlands, în cadrul proiectului "Machine diagnostics by neural networks". Rezultatele obținute au făcut obiectul lucrării „An Application of Renyi Entropy Segmentation in Fault Detection of Rotating Machinery” prezentate și publicate la *The 16th IEEE International Conference on Research and Education in Mechatronics, REM'2015*, 18-20 November 2015, Bochum, Germany, Vol. Deutsche Gesellschaft für Mechatronic Proceedings, IEEE, R. Biesernbach, A. Weinert (Eds.), pp. 228-295. Studiul de caz prezentat face uz de componente software aparținând celor patru categorii de module prezentate anterior: PRO, CDS, BSS și TFR, și reprezintă un prim test în rezolvarea unei probleme CDD cu date reale. Investigațiile vor continua în cursul **Etapei a III-a** și pentru alte categorii de instalații pilot și reale.

Capitolul 8 se referă la **Structura minimală pentru CDD, din punctul de vedere al managementului datelor**. Aceasta se referă la modulele VIBROSIG și VIBROMOD. Structura bloc de achiziție a datelor este prezentată în Fig. 3, având rolul de a oferi o primă imagine despre cerințele hardware ale modelului experimental, de la semnalele de vibrații până la memoria de lucru.

Modulul este conceput pentru un număr de  $nv = 4$  canale de vibrații, cu achiziție și conversie sincrone, și un număr de  $ns = 4$  canale suplimentare pentru alte mărimi necesare sau de interes, de ex. viteza, temperatura, curent electric, etc. Numărul total de canale este  $n = nv + ns = 8$ .

În partea inferioară a Fig. 3 se prezintă achiziția semnalelor de vibrații. Se consideră o bandă de frecvență a vibrațiilor de la  $F_{TS} = 100$  Hz până la  $F_{TJ} = 5000$  Hz. Ambele filtre sunt analogice, cu riplu de 1...3 dB în banda de trecere, și de ordin  $n=2$ . Urmează un amplificator, cu amplificare între 10 și 100. Conversia în semnal numeric se face cu frecvența de eșantionare  $FS = 10 \dots 100$  kHz, fiecare eșantion cuantizat pe 12 bit. Pentru fiecare canal de vibrație se memorează (în vederea prelucrării/transmiterii) un număr de  $NV = 4096$  eșantioane. Pentru cele  $nv$  canale rezultă o matrice de eșantioane de vibrații **V** de dimensiune  $nv \times NV$ .

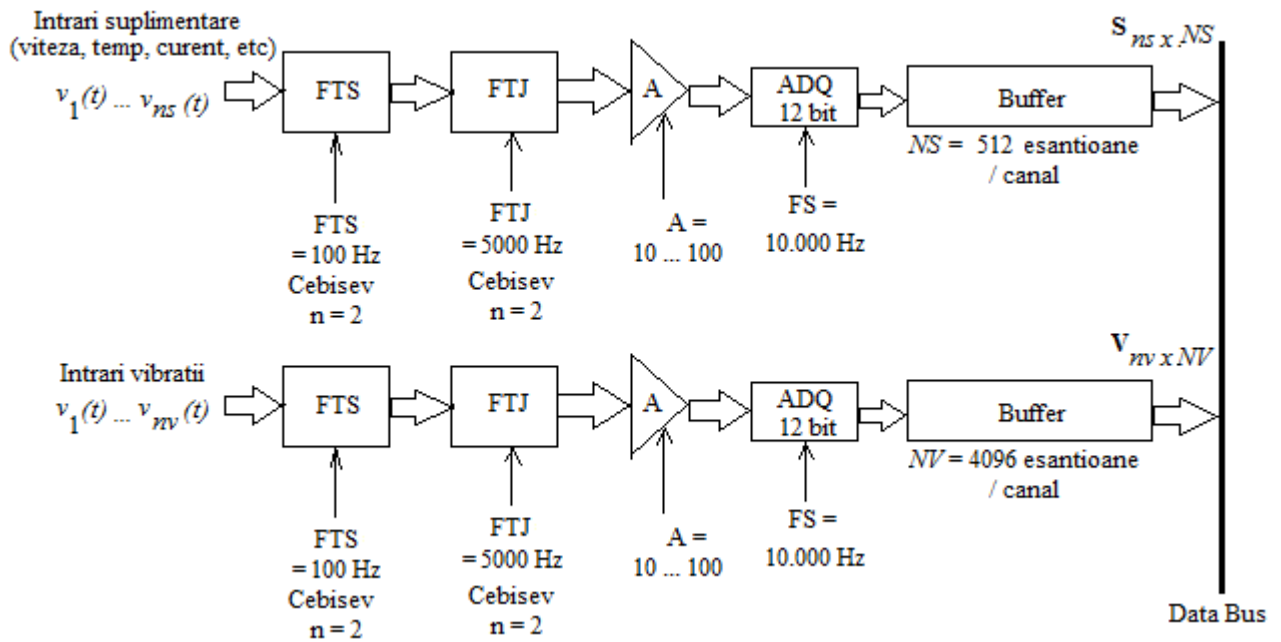


Fig. 3 Structura hardware a modulului de achiziție date (VIBROSIG)

Considerând numărul de eşantioane  $NS$  și frecvența  $FS$  rezultă o durată a semnalului ce poate face obiectul analizei de

$$T = N \cdot TS = N / FS = 4096 / 10.000 = 409.6 \text{ [ms]} \quad (1)$$

și o rezoluție în frecvență de

$$dF = 1/T = FS / N = 10.000 / 4.096 = 2.44 \text{ [Hz]} \quad (2)$$

Observatie: Pentru o rezoluție de 1 Hz, durata înregistrării este de 1 s, iar numărul de eşantioane este  $NV = 10.000$ . Aceste valori se pot ajusta în funcție de rezoluția cerută a metodelor de detecție din domeniul frecvență.

În partea superioara a Fig. 3, se prezintă achiziția unor semnale suplimentare cum ar fi viteza sau diversi curenți. Structura de procesare este similară cu cea a vibrațiilor, numai ca numărul de eşantioane memorate (și implicit frecvența de eşantionare) este mult mai mică, din cauza constantelor de timp mari ale acestor mărimi fizice (viteza, de exemplu). O valoare de  $Ns = 512$  poate fi considerată ca suficientă, și va fi modificată dacă va fi necesar. Datele de la ieșirea acestui lanț de prelucrare sunt memorate într-o matrice de date notată cu  $S$ , de dimensiune  $ns \times NS$ .

În Fig. 4 se prezintă soluția pentru prelucrarea datelor pe trei scări / niveluri de timp: nivel mașina/proces (interval elementar de timp = *ecart mașina* = 1 minut), nivel laborator/secție (interval elementar de timp = *ecart secție* = 1 oră) și nivel întreprindere (interval elementar de timp = *ecart întreprindere* = 1 zi). La nivel de proces, datele numerice, vibrații și mărimi suplimentare, sunt prelucrate pentru calculul unor mărimi statistice în domeniul timp, a unor mărimi în domeniul frecvență și a altor mărimi de interes (de exemplu, entropii) (neprezentate în Fig. 4). Aceste mărimi sunt calculate și salvate la intervale de  $DTP = 1$  min. Numărul acestor mărimi (parametri și variabile) este

$$Q = nv \cdot (\text{nr. momentelor statistice} + \text{nr. de valori ale DFT} + \text{nr. valori PSD} + \text{nr. parametri modele} + \text{nr. variabile din algoritmi CDD} + \dots) + ns \cdot (\dots) \quad (3)$$

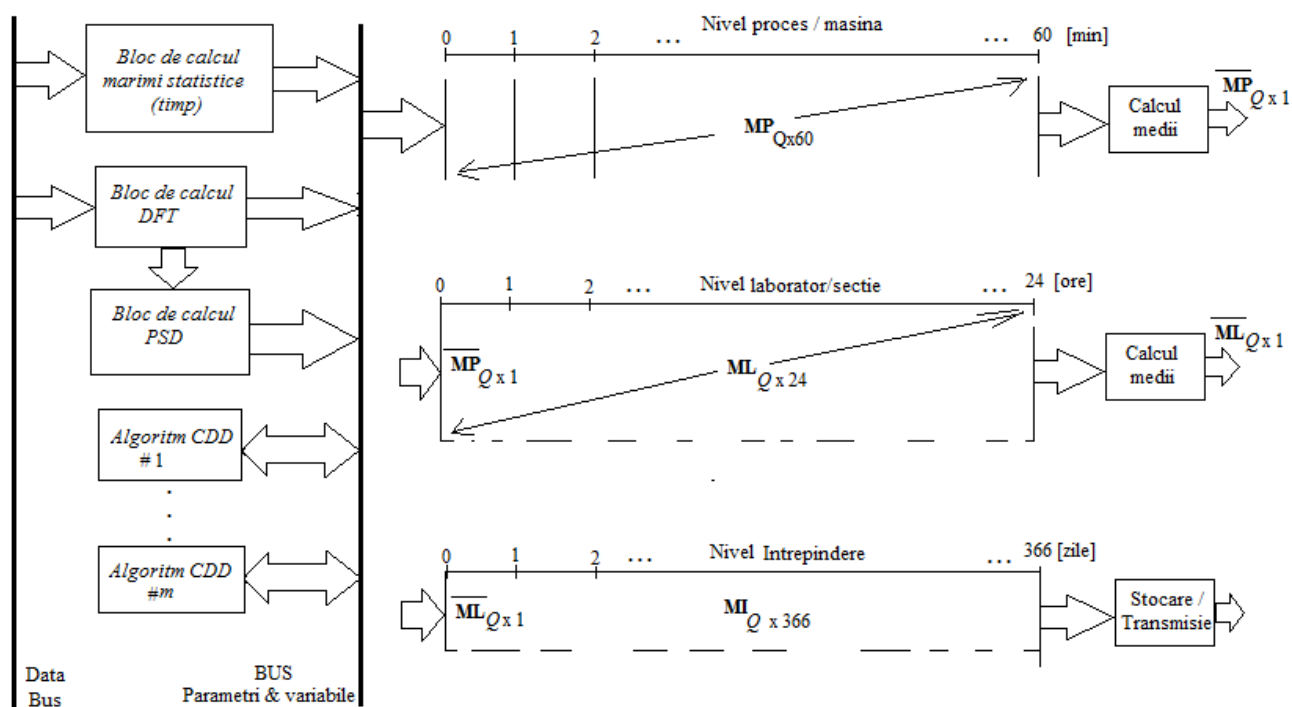


Fig. 4 Fluxul de date în modulul VIBROMOD

Calculul mărimilor statistice și a celorlalte mărimi de interes trebuie făcut într-un interval de timp mai mic decât ecartul de timp la nivel mașina (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:  $MP(Q \times 60)$  la nivel de proces,  $ML(Q \times 24)$  la nivel de laborator și  $MI(Q \times 366)$  la nivel de întreprindere. Numărul de coloane al acestor tablouri este impus de ecartul de timp specific fiecărui nivel.

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 pe linii și aceste valori se transmit la nivelul următor.

La ultimul nivel, nivelul întreprindere, datele prelucrate sau nu, se memorează pe suporturi dure (HDD sau CD-uri) sau/și se transmit la un server pentru prelucrare ulterioară. Simulările efectuate au arătat că un HDD de 1 TB este suficient pentru stocarea datelor prelucrate pe durata unui an de zile.

În Fig. 5 se prezintă un exemplu de vizualizare grafică a mărimilor de interes pe cele trei scări de timp. Pe prima linie orizontală, începând de sus, se evidențiază trei ecrane grafice, câte unul pentru fiecare scară de timp (ora / zi / an). În fiecare ecran, se prezintă evoluțiile mărimilor statistice precum și evoluția densității spectrale de putere în timp. Pentru fiecare algoritm CDD ce va fi implementat în modulul VIBROMOD, va exista o fereastră de intrare, pentru stabilirea parametrilor de lucru, și o fereastră de ieșire – pentru afișarea rezultatelor acestuia. În partea de jos a interfeței grafice, va exista o bară de ferestre ce descrie informații despre starea procesului monitorizat.



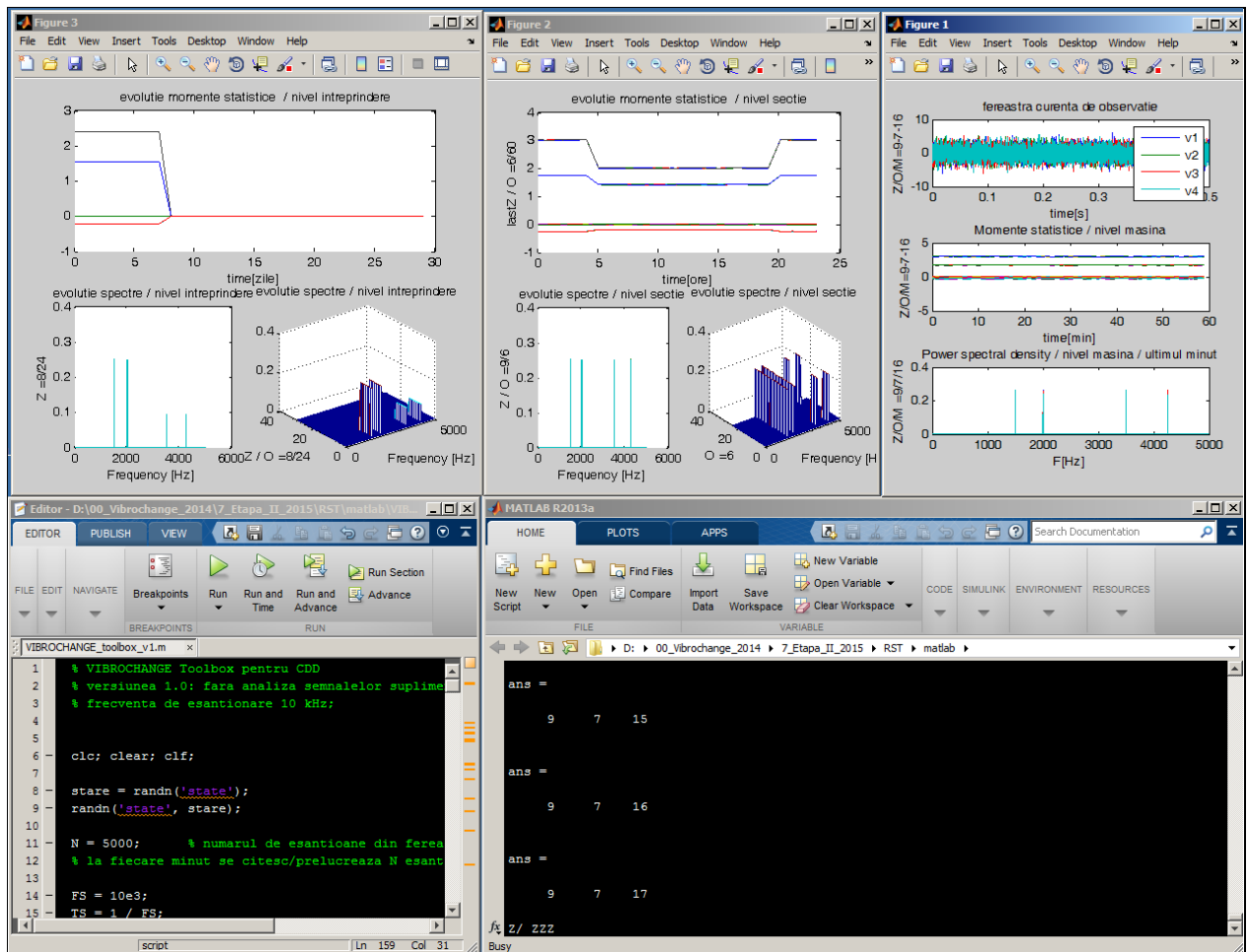


Figura 5: Ecran grafic exemplificativ pentru informațiile afișate de modelul experimental, pe trei nivele de timp (ora/ zi / an)

Arhitectura software propusă este structurată pe două niveluri ierarhice (nivel local și nivel central), reprezentând un sistem distribuit, flexibil, deschis, incluzând două subsisteme distincte.

Arhitectura procesului este descrisă pe câteva nivele de abstractizare. La nivelul cel mai înalt, arhitectura sistemului poate fi ca un set independent de funcții logice integrate într-o rețea de comunicație inter-task-uri și, de asemenea, mai multe module hardware conectate în LAN sau WAN. Pot exista simultan mai multe rețele logice care partajează aceleași resurse fizice.

Arhitectura logică a sistemului asigură în primul rând cerințele funcționale ale acestuia și oferă serviciile necesare utilizatorilor săi. Sistemul este descompus într-un set de elemente cheie, luate (mai ales) din domeniul problemei, în formă de module. Ele exploatează principiile abstractizare, încapsulare și moștenire.

**Capitolul 9, Stabilirea criteriilor de alegere a pozițiilor traductoarelor și de selectare a tehnicilor de măsurare în cazul CDD**, are ca obiect analiza și stabilirea criteriilor de alegere a traductoarelor de măsurare pentru vibro-diagnoza transmisiilor mecanice: parametrii de măsurat, impedanța mecanică, sensibilitatea și precizia, domeniul frecvențelor, condițiile de mediu și durabilitate.

Au fost analizate următoarele tipuri de traductoare, utilizate la măsurarea vibrațiilor: traductoare de deplasare (numite și traductoare de proximitate), traductoare de viteză, accelerometre. Întrucât accelerometrele piezoelectrice oferă cele mai bune caracteristici, vor fi selectate și folosite în etapa următoare, în cadrul măsurătorilor experimentale.

Au fost analizate principalele metode de fixare a accelerometrelor (montarea cu știfturi filetate pe o suprafață plană, cu adeziv sau ciment, cu coliere, cu adaptoare magnetice) specificându-se pentru fiecare metodă în parte avantajele și dezavantajele și sursele de erori. Pentru sistemul de testare se va folosi soluția industrială, aceea cu știft filetat pe o suprafață plană.

Au fost analizate configurațiile de poziționare a traductoarelor/ rețelelor de traductoare pentru analiza vibrațiilor arborilor, carcaselor și lagărelor de rotație. Au fost stabilite, de asemenea, modul de alegere a direcțiilor de măsurare, pentru fiecare punct de măsurare în parte, după cum urmează:

- pentru măsurarea vibrațiilor pe arbori, traductoarele se vor dispune în fiecare lagăr, pe două direcții perpendiculare între ele, în același plan radial și orientate în aceleași direcții în toate lagărele unei linii de arbori; pentru un arbore trebuie cel puțin o măsurătoare axială;
- pentru măsurarea vibrațiilor carcaselor traductorul trebuie localizat pe carcasa lagărului, cât mai aproape de cuzinet sau de inelul exterior al rulmentului, astfel încât între suprafața senzorului și cea a lagărului să fie cât mai puține piese intermediare, pentru a nu amortiza vibrațiile și cât mai puține spații goale, deoarece acestea presupun existența unor pereți, în general subțiri, care pot intra în rezonanță, generând informații eronate; traductorul trebuie montat astfel încât axa lui longitudinală să intersecteze perpendicular axa longitudinală a lagărului, deoarece vibrația se propagă radial;
- pentru vibro-diagnoza corectă a mașinilor, trebuie să se aleagă pentru fiecare punct de măsurare trei direcții de măsurare, deci se vor folosi traductoarele triaxiale;
- accelerometrele vor fi montate permanent.

Au fost analizate și diferite forme de adaptoare de izolare sau montaj precum și materialele recomandate pentru executarea acestora. La alegerea adaptoarelor de izolare sau de montaj pentru accelerometre trebuie ținut cont de faptul că acestea devin parte a structurii, comportamentul lor fiind măsurat și acționează ca un sistem suplimentar de masă seismică, a cărei funcție de transfer trebuie să fie cunoscută înainte de utilizare. Un bun bloc de montaj sau adaptor trebuie să fie cât mai mic, cu greutate redusă și rigid. În acest sens, accelerometrele trebuie calibrate împreună cu blocul de montare sau adaptorul.

**Capitolul 10** abordează **Proiectarea sistemului de măsurare și culegere date pentru testarea sistemului experimental**. În cadrul acestuia s-a propus și construit un mini-sistem experimental pentru generare și măsurare de vibrații, în condiții controlate.

Platforma de test dezvoltată este în spiritul principiilor care stau la baza proiectului. Au fost determinate limite pentru puterea electrică necesară operării sistemului mecanic și au fost achiziționate seturi de date caracteristice vibrațiilor ce vor face obiectul analizei, produse de functionarea unor rulmenți cu defecte. Spectrul acestor semnale a fost utilizat pentru alegerea corectă a traductoare industriale de vibrații.

S-a realizat separarea celor două procese, de generare și măsurare, prin utilizarea a două calculatoare, fiecare dotat cu câte o placă de achiziție, astfel încât achiziția semnalelor de

vibrații să se facă independent de algoritmul de generare a vibrațiilor. Generarea și testarea unor algoritmi on-line de identificare a defectelor poate necesita însă un efort de calcul semnificativ.

După analiza rezultatelor obținute pe acest stand experimental, s-a stabilit un caiet de sarcini pentru construirea, în etapa următoare, a unui sistem mai general și cu o putere mai mare. Detaliile sunt prezentate în Anexa 4. În Fig. 6 se prezintă - cu titlu de exemplu - spectrul de putere al semnalelor de vibrații pentru un rulment defect, la două viteze de rotație a arborelui, de 500 și respectiv, 2000 rot/min.

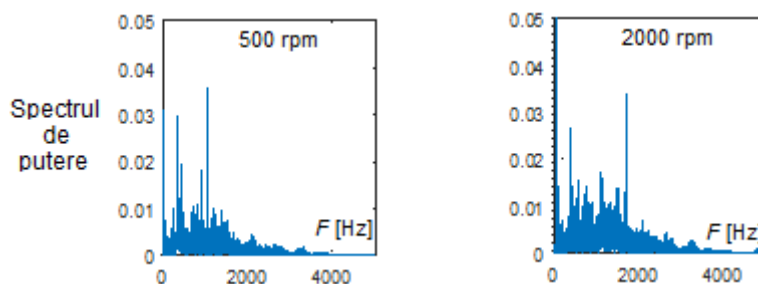


Fig. 6 Spectrul de putere al vibrațiilor în cazul unui rulment defect, la 500 RPM și 2000 RPM

Capitolul 11, Concluzii finale, vizează principalele rezultate obținute și recomandări făcute în urma cercetării ce a făcut obiectul acestei etape a proiectului, și care au fost menționate deja în secțiunile anterioare ale prezentului Raport Științific și Tehnic (RST) .

Raportul de cercetare extins conține **4 Anexe**, astfel:

**Anexa 1.** Relații de calcul pentru evaluarea unor mărimi în modelul experimental

**Anexa 2.** Funcții elementare, în cod Matlab standard, pentru modelul experimental

**Anexa 3.** Lucrările prezentate și publicate, realizate în cadrul **Etapei a II-a** a proiectului

**Anexa 4.** Caiet de sarcini pentru sistemul de testare a modelului experimental

### 3. Diseminare

În anul 2015 au fost prezentate și publicate trei lucrări în cadrul unor conferințe internaționale, două în străinătate și una în țară. Conferințele au fost organizate sub egida IEEE, iar lucrările acestora sunt referite BDI/ISI (Web of Science).

1. Theodor D. Popescu, Mihaela Andrei, Multiple Hypothesis Testing with Application in Vibrating Signals Analysis, *The IEEE International Symposium on Systems Engineering, IEEE ISSE 2015*, Rome, Italy, 28-30 September 2015, pp. 71-76.
2. Siviu Epure, Bogdan Dumitrascu, Dorel Aiordachioaie, VIBROGEN - An experimental system to study vibration waveforms generated by faults under arbitrary load conditions, *The IEEE International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging, SIITME2015*, Brasov, Romania, 22 - 25 October 2015, pp. 239-244.
3. Theodor D. Popescu, Bogdan Dumitrascu, An Application of Renyi Entropy Segmentation in Fault Detection of Rotating Machinery, *The 16th IEEE International Conference on Research and Education in Mechatronics, REM2015*, Bochum, Germany, 18-20 November 2015, pp. 288-295.

În plus, sunt în pregătire două lucrări care vor fi trimise – în perioada imediat următoare - la conferințe pentru evaluare, prezentare și publicare:

4. Mihaela Andrei and Dorel Aiordachioaie, *On change detection based on ARMA models and spectra classification*.
5. Culea-Florescu Anisia and Dorel Aiordachioaie, *On sparse signal processing for detection of dynamic and random faults*.

## 4. Activități viitoare

Prezenta etapă a proiectului, desfășurată pe parcursul anului 2015, a fost necesară pentru stabilirea structurii și a blocurilor de calcul, inclusiv realizarea unora dintre acestea, pentru modelul experimental VIBROCHANGE. Acestea urmează a fi dezvoltate, testate și optimizate în cadrul următoarei etape a proiectului, etapa finală.

În ceea ce privește Toolbox-ul Matlab pentru CDD (VIBROTOOL), metodele propuse în cadrul acestei etape vor fi testate intensiv și optimizate funcțional. Se vor adăuga funcții noi, asociate implementării unor metode adaptive de estimare a parametrilor, precum și a unor metode bazate pe tehnici de recunoaștere a formelor, cu procese de învățare și clasificare. Rezultatele obținute cu aceste metode vor fi comparate cu cele implementate deja în cadrul proiectului, sau cu unele similare din literatură, și vor fi testate intensiv cu diferite categorii de semnale, în cadrul unor scenarii de lucru, specifice mediului industrial.

În ceea ce privește modulul VIBROMOD, echipament fizic independent, bazat pe o aplicație software, pentru CDD, dificultățile majore în realizarea acestuia țin de compromisul ce trebuie făcut între promovarea unui model valid din punct de vedere comercial, deci cu performanțe foarte bune și cu metode avansate de CDD, și mulțimea proceselor la a căror monitorizare poate fi utilizat un astfel de model, fără schimbarea semnificativă a configurației hardware sau software. S-au reținut mașinile rotative cu spectru mediu de vibrații, până la 5 kHz. Metodele CDD implementate în modulul VIBROMOD vor fi din cadrul celor prezente în Toolbox-ul Matlab, VIBROTOOL, în limita capacităților de calcul ale modulului VIBROMOD, operarea acestuia facându-se fără utilizarea mediului Matlab.

În concluzie la cele prezentate, ca urmare a rezultatelor obținute în cadrul prezentei etapei a proiectului, care fac obiectul prezentului Raport Științific și Tehnic (RST), se poate considera că **obiectivele generale și specifice ale Etapei a II-a a proiectului VIBROCHANGE au fost îndeplinite în totalitate.**

Galați, 26.11.2015

Manager proiect,  
Prof. Dr. Ing. Dorel Aiordăchioaie