

# CONTRIBUȚII LA DEZVOLTAREA UNOR METODE DE DETECTARE A DEFECTELOR LA STRUCTURI MECANICE ȘI ECHIPAMENTE ROTATIVE BAZATE PE ANALIZA SEMNALELOR VIBRO-ACUSTICE

## - REZUMAT al Tezei de Doctorat -

Teză destinată obținerii titlului științific de Doctor la Universitatea Politehnica din Timișoara în domeniul "INGINERIE MECANICĂ" de către

ing. Alexandru TOCARCIUC

Conducător științific:

prof.univ.dr.ing. Liviu Bereteu

Referenți științifici:

prof.univ.dr.ing.DHC. Polidor Bratu  
prof.univ.dr. Gheorghe Drăgănescu  
prof.univ.dr. Ioan Bica

## 1. INTRODUCERE

Detectarea de defecte, metodele de a evaluare a nivelului de zgomot în funcționare, cât și monitorizarea stării de integritate structurală în domeniile mecanic, aeronautic sau al construcțiilor civile, reprezintă unelte sau tehnici importante care aduc beneficii atât de natură economică dar mai ales de siguranță în exploatare. Aceste nevoi s-au transpus în domeniul ingineresc prin dezvoltarea continuă de noi tehnici care au la bază metode de analiză a semnalelor vibratorii sau acustice, fie că este vorba de construcții civile de importanță majoră (baraje, poduri, clădiri turn sau ferme de centrale eoliene), aeronave și autoturisme sau de mașini și echipamente industriale.

O definiție foarte bună a termenului de defect este dată de către Sohn [1]. Acesta definește defectul ca fiind "o schimbare introdusă într-un sistem, care contribuie la proasta sa funcționare, curentă sau viitoare. Implicit în această definiție conceptul de defect ar fi lipsit de conținut fără existența unei comparații între două stări ale sistemului analizat, una care este presupusă inițială și deseori fără defecte".

Astfel, în funcție de tipul de defect care apare, putem avea pierderi de rigiditate (fisuri, ruperi ale punctelor de sudura), modificări ale condițiilor de frontieră, pierderi de material (ruperea unei palete a unei turbine cu aburi) sau modificări ale parametrilor legăturilor (de exemplu slăbirea unui șurub care fixează un echipament de fundație).

În literatura de specialitate sunt cunoscute mai multe clasificări ale metodelor de analiză a defectelor. O clasificare foarte bună este oferită de Sohn [1], și mai apoi întărită de Montalvao în lucrarea sa de sinteză [2].

Astfel, metodele de analiză a defectelor pot fi împărțite în 5 mari grupe, în funcție de nivelul până la care se dorește investigarea defectului și a implicațiilor sale, având metode pentru:

- *Detectarea prezenței defectului.* Există un defect în sistemul analizat?
- *Localizarea defectului.* Se poate spune unde anume este defectul?
- *Detectarea tipului de defect.* Ce fel de defect a apărut în sistemul analizat?
- *Detectarea gradului de severitate al defectului.* Cât de grav este defectul?
- *Estimarea duratei de viață rămase.* Cât timp mai poate funcționa sistemul în condiții normale de exploatare?

## 1.1 Considerații generale

Prezentul studiu, *se limitează la investigarea metodelor pentru a detecta prezența defectului în structuri mecanice și echipamente rotative*, lăsând deschisă calea spre a investiga și celelalte patru grupe ale metodelor enunțate anterior unor studii ulterioare.

Lucrarea este structurată în opt capitole, bibliografie și anexe, care cuprind abordări atât numerice cât și experimentale pentru identificarea unor parametri constitutivi, sensibili la prezența defectelor în structuri mecanice și echipamente rotative. Teza cuprinde o sinteză bibliografică cuprinzătoare de dată recentă privind metode de detectare ale defectelor prezente la structuri mecanice sau echipamente rotative: bare, rotori, transmisii prin curele, angrenaje de roți dințate, rulmenți și lagăre, cutii de transmisii, centrale eoliene, poduri, structuri industriale.

## 1.2 Actualitatea temei

În funcție de structura sau echipamentul care este investigat, în literatura de specialitate sunt prezente studii care prezintă metode de detectare a defectelor la următoarele tipuri de structuri mecanice și echipamente rotative: rotori, bare sau țevi, lagăre sau rulmenți, motoare electrice sau la înfășurarea rotorică, dinților roților dințate sau la cutia de transmisie, echipamente și mașini rotative, centrale eoliene, alte structuri mecanice.

Tot în literatura de specialitate, sunt prezentate mai multe metode utilizate pentru detectarea defectelor. Unele dintre acestea sunt rezultatul direct al investigațiilor modale (ceea ce implică o testare experimentală folosind aparatură adecvată testării modale), altele sunt rezultatul investigațiilor asupra echipamentelor la funcționarea acestora în condiții operaționale (ceea ce implică măsurarea semnalelor operaționale: deplasări, presiuni acustice, viteze, accelerații). În cele ce urmează sunt prezentate unele dintre metodele folosite recent, pentru detectarea de defecte la structuri mecanice și echipamente rotative: **Statistica de ordin superior** [3-5], **Transformata Hilbert – Huang** [6, 7], **Coerența de ordin superior** [8], **Kurtosisul spectral** [9], **Spectrele de ordin superior** [10], **Bispectrul** [11, 12], **Trispectrul** [13], **Spectrul de putere instantaneu, mediat** [14], **Transformata Wavelet Continuă sau Transformata Wavelet Discretă**.

Transformata Wavelet singură, sau împreună cu alte tehnici de prelucrare de semnale reprezintă metode pentru detectarea prezenței defectelor, atât la structuri mecanice simple, cât și la echipamente și mașini rotative. Metodele de prelucrare a semnalelor care au la baza atât waveleturile cât și Transformata Wavelet raportează detectarea prezenței fisurilor în bare, a defectelor în motoare electrice (arbori cu fisuri, rulmenți deteriorați, înfășurarea rotorică deteriorată) sau echipamente (pompe monobloc) și mașini rotative.

În continuare sunt prezentate cele mai noi metode de detectare a defectelor la structuri mecanice și echipamente rotative, care au la bază Transformata Wavelet.

### 1.2.1 Metode bazate pe Transformata Wavelet

O primă lucrare care sintetizează teoria waveleturilor pentru detectarea de defecte a fost publicată în 1998 de către Liew și Wang în *Journal of Engineering Mechanics* [15]. O lucrare de sinteză, mai cuprinzătoare, publicată de Avdakovic în anul 2012 [16] în *Electrical Power Systems Research Journal*, abordează tipurile de defecte care pot fi detectate cu ajutorul **Transformatei Wavelet** în dinamica sistemelor de putere. Tot cu ajutorul Transformatei Wavelet, Chen raportează identificarea amortizării modale cât și a frecvențelor proprii [17]. Nagaraju a identificat defecte în sisteme rotorice [18] în timp ce Al-Badour a analizat vibrațiile mecanice ale unei mașini rotative [19]. Ebrahimi a raportat găsirea unor parametri bazați pe transformata wavelet ai prezenței defectului în arborele unui motor cu inducție [20].

Tot pentru detectarea de defecte [21], Cusido a folosit Transformata Wavelet, în timp ce Kankar raportează detectarea cu ajutorul Transformatei Wavelet a defectelor la rulmenți [22]. Pentru detectarea de fisuri în bare, Jiang folosește panta barei împreună cu Transformata Wavelet complexă [23]. Muralidharana folosește Transformata Wavelet pentru detectarea de defecte la pompe centrifugale monobloc [24].

Boškoski, raportează în anul 2012, în lucrarea sa [25] publicată în *Mechanical Systems and Signal Processing*, un algoritm pentru detectarea de defecte la transmisii prin roți dințate, supuse

unor sarcini variabile, folosind o metodă combinată bazată pe **Transformata Wavelet și Entropia Renyi**.

### 1.3 Obiectivul principal al prezentului studiu

Prezentul studiu se limitează la investigații numerice și experimentale asupra identificării prezenței defectelor la structuri mecanice și echipamente rotative, folosind metode de analiză a semnalelor bazate pe **entropii statistice și transformata wavelet** sau **entropii statistice și distribuții de probabilitate**.

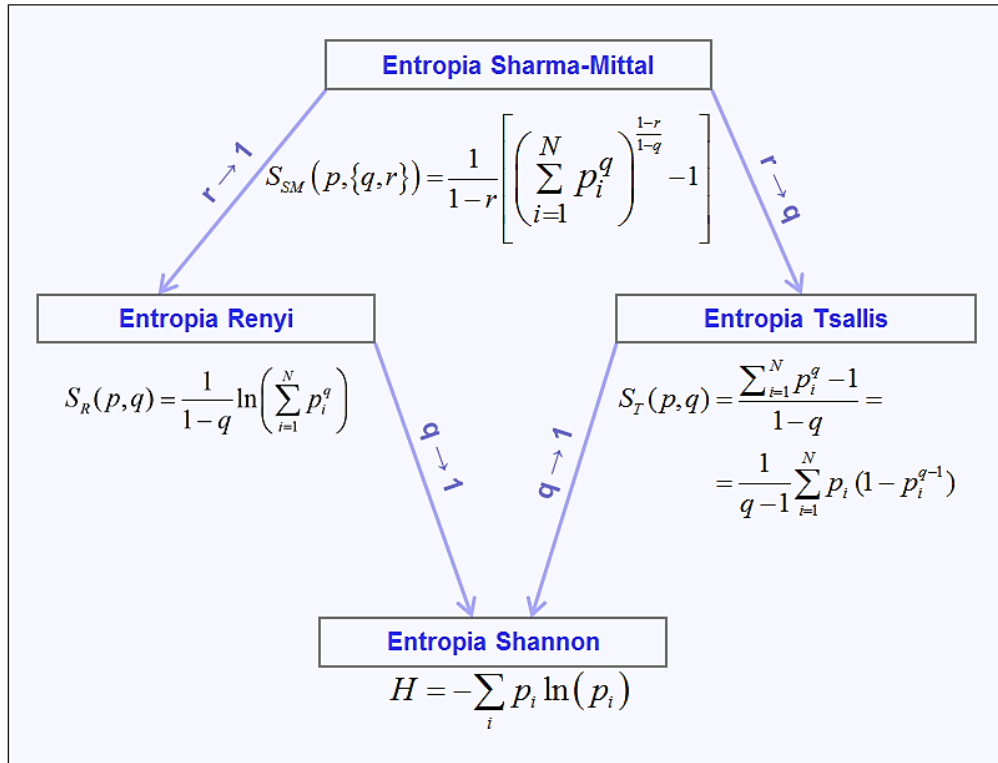


Figura 1.3.1 Schema de interdependență a entropiilor statistice

În figura 1.3.1 este prezentat în mod schematic relația de interdependență dintre cele 4 entropii statistice existente în literatura de specialitate, trei dintre acestea fiind folosite în algoritmi pentru detectarea prezenței defectelor dezvoltate în prezentul studiu.

## 2 DETECTAREA DE DEFECTE - INVESTIGAȚII EXPERIMENTALE

Pentru validarea indicilor entropici propuși în capitolul 5 al tezei (IES, IER, IESM) s-a optat pentru alegerea unor structuri mecanice sudate, formată din două plăci sudate pe lățime sau pe lungime, cât și pe alegerea unor tipuri de defecte care sunt des întâlnite la mașinile rotative și inducerea acestora pe un stand experimental special conceput pentru studiul vibrațiilor mecanice.

S-a optat pentru următoarele două tipuri de experimente:

- Investigarea experimentală a unui ansamblu de plăci sudate folosind două tipuri de specimene:
  - Ansamblu de plăci metalice din oțel inoxidabil sudate pe lățime;
  - Ansamblu de plăci metalice din OL37 sudate pe lungime.
- Investigarea experimentală a mai multor tipuri de defecte induse pe un echipament rotativ pentru studiul vibrațiilor:
  - Excentricitate statică indusă la unul dintre discurile standului;
  - Excentricitate de cuplu indusă la unul dintre discurile standului;
  - Simularea ruperii capului unui șurub de fixare a motorului electric care acționează echipamentul;
  - Abaterea de la planeitate a ansamblului rolei conducătoare și rolei conduse care antrenează cureaua de transmisie;

- Simularea modificării stării de integritate structurală a curelei;
- Slăbirea fixării lagărului mai apropiat de motorul electric;
- Slăbirea fixării lagărului stânga a arborelui antrenat de cureaua de transmisie.

## 2.1 Ansamblu sudat de plăci din oțel inoxidabil

Pentru a valida indicii entropici propuși în capitolul 5 al tezei, s-a optat pentru investigarea experimentală folosind standul din figura 2.1.1. Se investighează un ansamblu format din două plăci metalice 1, care sunt sudate pe lățime (indicat cu săgeți). Plăcile metalice sunt confecționate din oțel inoxidabil. Ansamblul este suspendat de cadrul metalic 3 cu ajutorul legăturilor elastice 4. Excitația este introdusă cu ajutorul ciocanului modal 2. Semnalul este înregistrat cu ajutorul microfonului supercardioid 5 de către programul de achiziție Cakewalk instalat pe calculatorul 6.

Defectul structural este indus prin întreruperea continuității cordonului de sudură prin tăierea acestuia, pe lungime, cu ajutorul unui ferăstrău cu lamă subțire. În practică, acest tip de defect este des întâlnit și este asociat cu fenomenul de oboseală al structurilor mecanice sudate care sunt supuse unui regim vibratoriu constant sau care sunt supuse unor condiții de mediu coroziv.

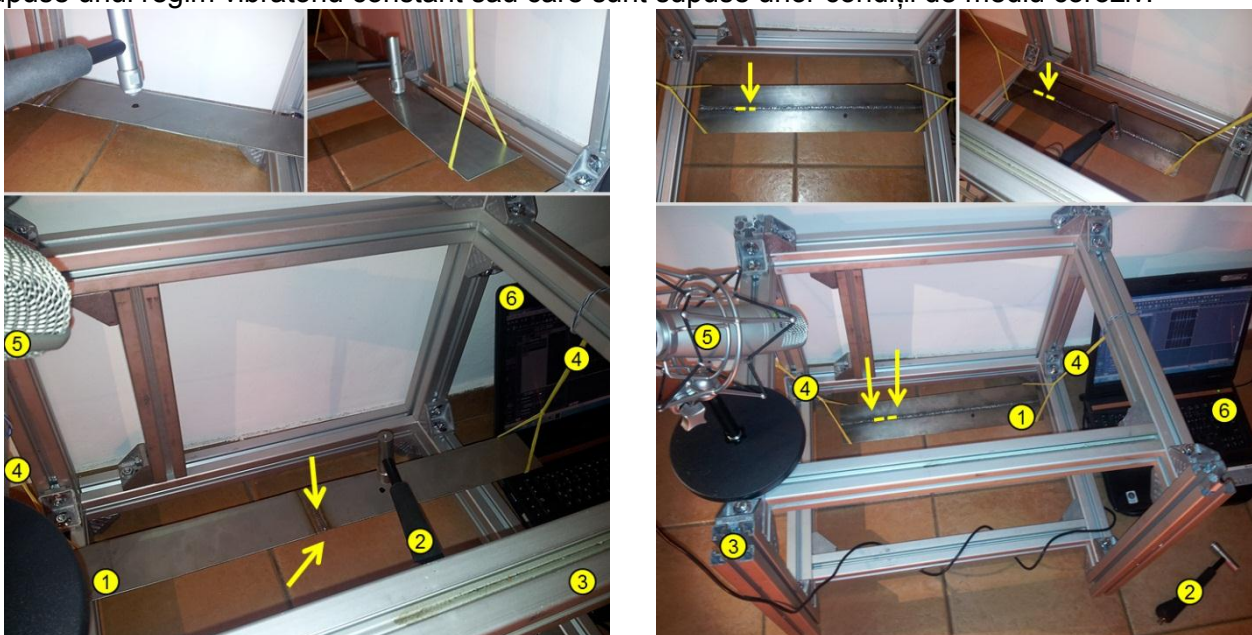


Figura 2.1.1 Stand experimental pentru testarea prin impact

Cordonul de sudură se poate deteriora și în momentul în care se execută sudura, datorită nerespectării de către operator a specificațiilor tehnice specifice, cum ar fi: curățirea/degresarea suprafețelor care vor fi sudate, nepăstrarea unei distanțe optime între electrod și componentele de sudat, generarea de incluziuni în cordonul de sudură, etc.).

În continuare se va investiga experimental ansamblul sudat descris anterior, în trei stări ale sale: una presupusă fără defect și considerată intactă, a doua cu defect 16% și a treia stare cu defect 25%. Defectul este indus artificial prin secționarea (întreruperea) cordonului de sudură folosind un ferăstrău cu lamă subțire. Rezultatele obținute în urma investigațiilor experimentale sunt prezentate în subcapitolul următor.

## 2.2 Stand experimental pentru studiul vibrațiilor

Standul experimental folosit pentru detectarea prezenței celor 7 tipuri de defecte induse artificial, este prezentat în figura 2.2.1, și este compus din:

1. placă de metal pe care sunt fixate: motorul electric care acționează echipamentul rotativ, arborele conducător și arborele condus;
2. perne de aer care decuplează echipamentul rotativ de masa de fier pe care acesta este amplasat;
3. cadru din oțel pe care este sudată o placă metalică de 80 [mm] grosime. Greutatea totală a mesei metalice este de 400 [kg];

4. senzor pentru măsurarea turației;
5. arborele conducător, care este fixat de placa metalică 1;
6. arborele condus, antrenat prin intermediul transmisiei prin curea 7;
7. transmisie prin curea;
8. variator de turație electronic;
9. motor electric;
10. unitate de achiziție și condiționare a semnalelor;
11. calculator personal;
12. monitor pe care se poate urmări achiziția de date cu ajutorul programului VibroLab.

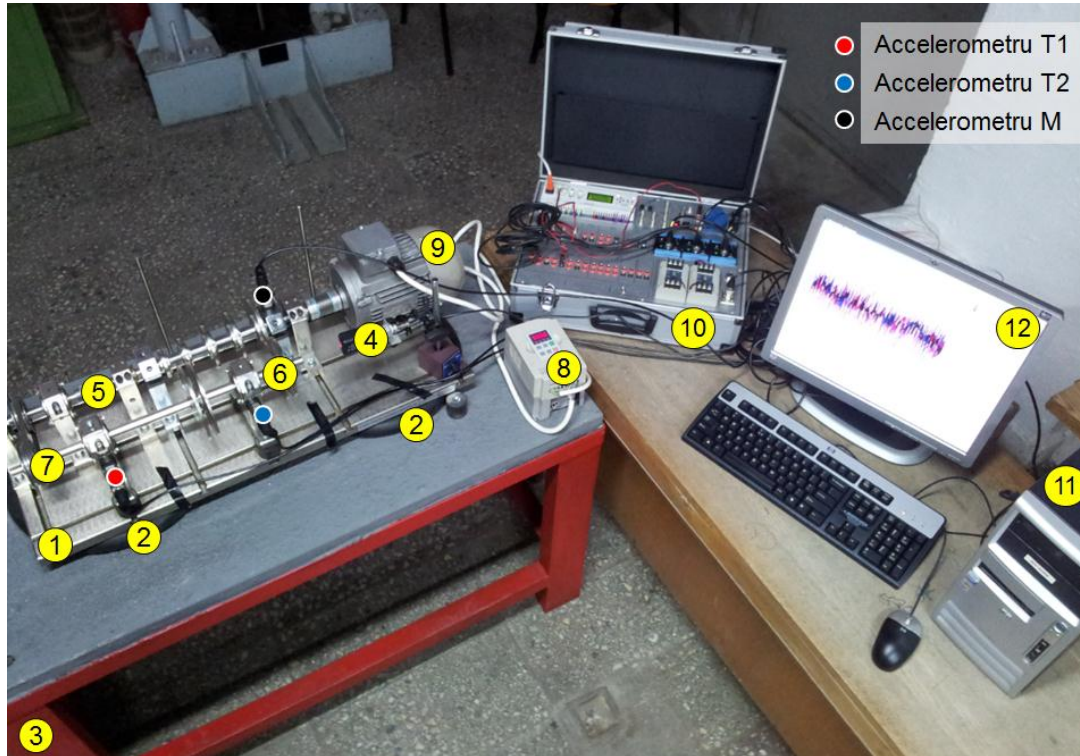


Figura 2.2.1 Stand experimental pentru studiul vibrațiilor

### 3 DISEMINAREA REZULTATELOR ȘI CONCLUZII

În capitolul prezent sunt diseminate principalele rezultate obținute, atât pe calea investigațiilor numerice cât și din investigațiile experimentale. În primul subcapitol sunt prezentate rezultatele obținute prin investigații numerice. În cel de-al doilea subcapitol sunt diseminate rezultatele investigațiilor experimentale.

#### 3.1 Diseminarea rezultatelor investigațiilor numerice

Cei patru indici propuși pentru a detecta prezența defectului au grade de sensibilitate diferite. Astfel, conform cu figura 3.1.1, indicii IESM și IDT sunt sensibili începând cu niveluri mici ale defectului, comparativ cu indicii IES și IER. La niveluri mari ale defectului, sensibilitatea IESM și IDT este și mai clară. Se poate concluziona că indicii entropici propuși IES, IER și IESM sunt candidați viabili pentru detectarea defectelor la structuri mecanice. Mai mult, dacă pentru indicele IESM se ajustează parametrul  $r$  (care pentru cazurile analizate este  $r=0.1$ ), se poate obține sensibilitatea dorită pentru detectarea defectelor.

În figura 3.1.1, se face o comparație a rezultatele investigațiilor modale (prin Indicele Frecvență Proprie – care reprezintă o valoare medie a sumei variațiilor tuturor frecvențelor proprii existente în intervalul de frecvență considerat) față de rezultatele obținute prin prelucrarea de semnale.

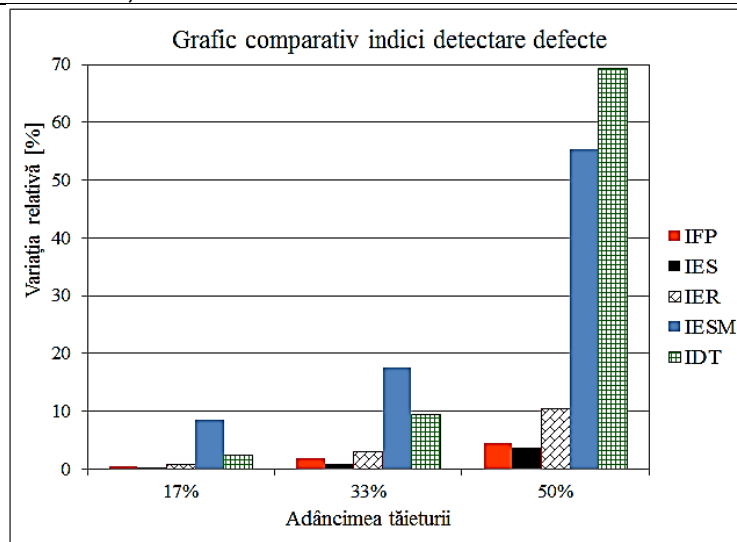


Figura 3.1.1 Grafic comparativ – cazul barei încastrate la un capăt

**Rezultatul acestei comparații ne conduce la concluzia că prin prelucrarea semnalelor operaționale pe un echipament sau structură, se pot obține parametri sensibili la a semnala prezența defectelor în structura sau echipamentul monitorizate. Cum anume sunt aleși acești indici, reprezintă mai degrabă o chestiune ce ține de intuiția inginerului coroborat cu rezultatul unei analize de sensibilitate care este necesar a fi efectuată.**

## 3.2 Diseminarea rezultatelor investigațiilor experimentale

### 3.2.1 Ansamblu de plăci sudate

Din figurile 3.2.2 se poate observa că indicele IES este un bun indicator al prezenței defectului. Comparativ cu indicele bazat pe parametrul modal frecvență proprie, indicele IES oferă o sensibilitate mărită.

Trebuie remarcat faptul că rezultatele sunt obținute în urma a unui set de 3 măsurători consecutive, oferind astfel o mediere necesară comparației (arătând caracterul repetitiv al măsurătorii), cât și faptul că standul de măsurători este compus dintr-o aparatură minimală, cu caracter nedistructiv. Fiecare dintre cele trei semnale este normalizat la 0dB, astfel încât fiecare dintre ele să aibă aceeași intensitate acustică și să poată fi comparabile. După normalizare, se calculează transformata wavelet a fiecăruia dintre ele, folosind un wavelet Morlet cu 16 perioade de oscilație până la atenuare. Următorul pas este medierea celor 3 suprafețe compuse din coeficienții wavelet corespunzători celor 3 semnale. În felul acesta se poate presupune că efectul erorilor datorate măsurătorii, erori care ar putea afecta calitatea rezultatelor, sunt minimize. Valoare mediată a coeficienților wavelet, pentru starea intactă respectiv starea cu defect, sunt prezentate în figurile 3.2.1.

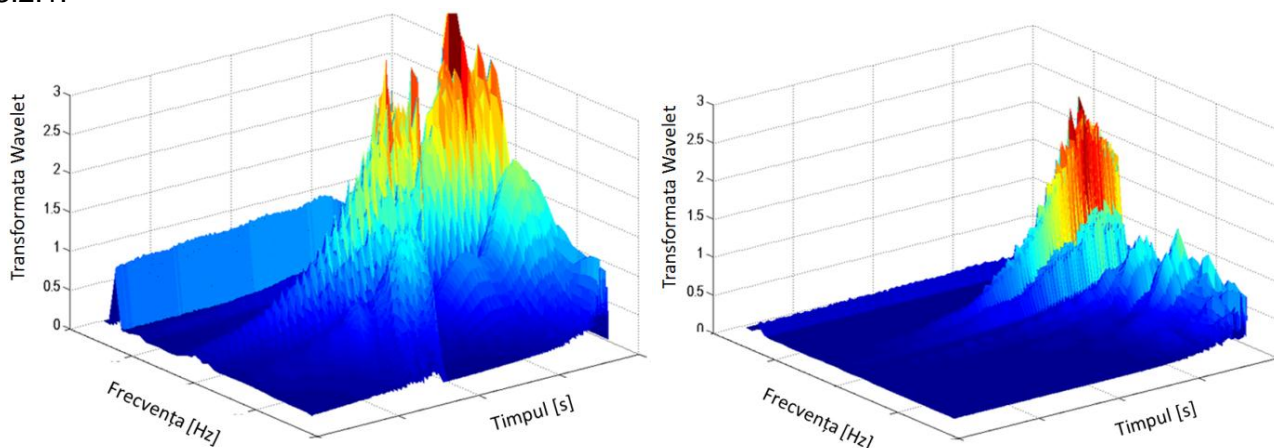


Figura 3.2.1 Transformata Wavelet a semnalului acustic normalizat la 0dB (medie a 3 măsurători succesive)

Caracterul de noutate al metodei constă în folosirea unui algoritm combinat bazat pe transformata wavelet a semnalului acustic înregistrat cu ajutorul unui microfon semiprofesional

supercardioid, și entropia statistică Shannon (care determină gradul de dispersie al suprafeței coeficienților transformatei wavelet).

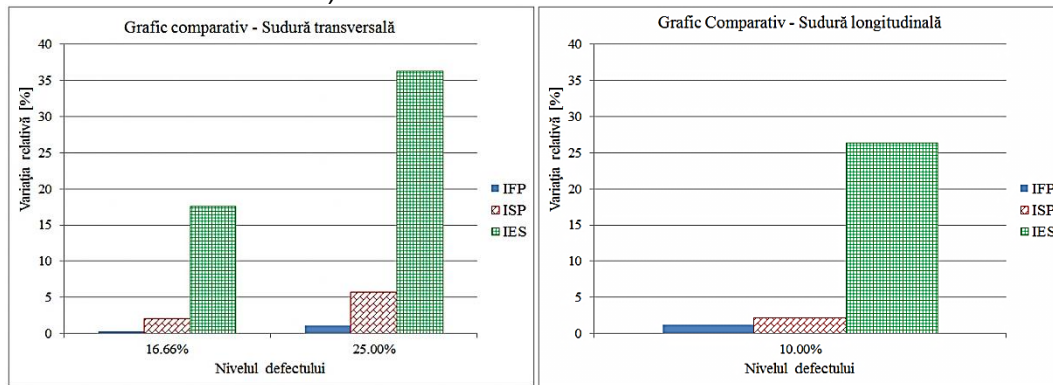


Figura 3.2.2 Grafic comparativ – indicele IES versus indicii ISP și IFP

### 3.2.2 Defecte induse pe standul pentru studiul vibrațiilor

Rezultatele finale obținute în urma prelucrării măsurătorilor pentru 2 regimuri de turații a echipamentului rotativ, respectiv pentru stare nealterată de defect și stare cu defect, sunt prezentate schematic în figurile 3.2.3.

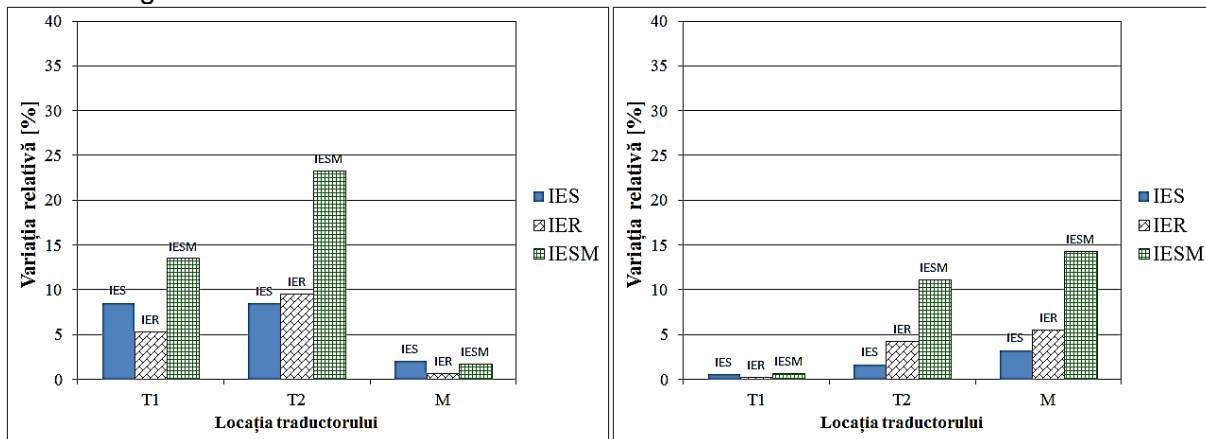


Figura 3.2.3 Indicii entropici pentru turațiile de 1200 rot/min și 1500 rot/min – excentricitate statică

Rezultatele intermediare obținute, adică curbele de probabilități în stare neafectată și stare neafectată de defect, cât și valorile efective ale indicilor entropici obținuți pentru cele 3 regimuri de turații, respectiv stare intactă și stare alterată, sunt prezentate detaliat, în anexele tezei.

## 4 DISCUȚII ȘI CONCLUZII FINALE

În acest capitol sunt prezentate succint concluziile finale ale studiilor efectuate în teză.

S-a realizat un studiu bibliografic riguros și original pentru identificarea și înțelegerea limitărilor oferite de metodele noi pentru detectarea de defecte la structuri mecanice și echipamente rotative, făcându-se o comparație între metodele care folosesc analiza modală sau parametrii modali și metodele care folosesc prelucrări de semnale, trăgându-se următoarele concluzii, pentru:

- Metodele care folosesc analiza modală și/sau variația parametrilor modali (publicat ca lucrare științifică originală [26]):
  - studiarea a trei astfel de metode care implică variații ale curbei FRF (funcția de răspuns în frecvență), ale formei modurilor proprii sau variații ale frecvențelor proprii, a arătat avantajele/dezavantajele lor.
  - în literatura de specialitate se regăsesc mai multe tipuri de specimene, cele mai multe având formă geometrică simplă, astfel că tipul de structuri alese, bară încastată și ansamblu de plăci sudate, este în acord cu alte studii efectuate recent.
  - defectul indus în speciemenele analizate în literatura de specialitate este în general artificial, realizat prin tăiere. Concluzia imediată este că prin acest procedeu de inducere a defectelor se poate pierde caracterul nelinier al acestora. Cu alte cuvinte, dacă în cazul

## DISCUȚII ȘI CONCLUZII FINALE

---

unei crăpături induse natural într-o bară, fețele acestei crăpături pot intra succesiv în contact, generând astfel o nouă excitație locală (cu caracter neliniar) iar rigiditatea locală se modifică funcție de existența sau neexistența contactului între fețele crăpăturii. Dacă tăietura se realizează cu ajutorul unui ferăstrău acest fenomen se pierde (fețele aflându-se astfel la distanță una de cealaltă, contactul fiind mult mai rar, sau eventual lipsind cu desăvârșire).

- parametrii modali deși sunt indicatori buni ai prezenței defectelor în structuri mecanice, așa cum rezultă din bibliografia analizată, totuși pentru structuri mecanice aceștia nu pot indica prezența unui defect, decât când acesta are o dimensiune prea mare. Acest lucru reprezintă un neajuns al metodelor modale atunci când se investighează structuri complexe.
- dintre cele 3 metode modale regăsite în literatura de specialitate, cea mai facilă investigare modală se face cu ajutorul curbei FRF, datorită echipamentului minimal folosit pentru investigații experimentale, comparativ cu metoda variației formei modurilor proprii, unde sunt necesare mai multe accelerometre montate simultan sau mai multe teste succesive.

### ▪ Metodele care folosesc analiza semnalelor vibratorii:

- În funcție de aplicația pentru care au fost folosite, metodele de analiză a semnalelor de vibrații reprezintă o modalitate verificată pentru detectarea unor serii de defecte, în special la echipamente rotative.
- Metodele pentru detectarea de defecte care folosesc analiza wavelet sunt de dată recentă, analiza wavelet fiind folosită în domeniul ingineresc mai ales în ultimii zece ani.
- Folosirea transformatei wavelet împreună cu entropia statistică a fost găsită ca o metodă pentru detectarea de defecte la o cutie de transmisie pentru mai multe regimuri de funcționare.
- Entropiile statistice Shannon, Renyi și Sharma-Mittal reprezintă un potențial încă neexplorat suficient de comunitatea științifică internațională, acest lucru stând la baza motivației prezentei teze.

În urma studiului bibliografic, având conturată ideea de a folosi entropiile statistice pentru determinarea de defecte, s-au imaginat 2 tipuri de teste pentru a investiga acest lucru:

### ▪ Analiza vibro-acustică a unui ansamblu de plăci sudate

în care s-a indus ca defect fisurarea cordonului de sudură. Investigațiile au fost numerice, dublate de cele experimentale. Compararea sensibilității indicilor entropici propuși a fost făcută cu variația parametrului modal frecvență proprie (care este des utilizat de către inginerii de test).

- În urma investigațiilor experimentale sa constatat că indicele IES este mai sensibil la prezența defectului față de variația parametrilor modali (cuantificată prin media variației relative a tuturor frecvențelor proprii). Astfel, metoda vibro-acustică propusă este recomandată pentru identificarea de defecte în structuri mecanice.

### ▪ Identificarea defectelor induse pe un stand pentru studiul vibrațiilor

pe care s-au indus un set de 7 defecte: excentricitate statică indusă la unul dintre discurile standului, excentricitate de cuplu indusă la unul dintre discurile standului, simularea ruperii capului unui șurub de fixare a motorului electric care acționează echipamentul, abaterea de la planeitate a ansamblului rolei conducătoare și rolei conduse care antrenează cureaua de transmisie, simularea modificării stării de integritate structurală a curelei, slăbirea fixării lagărului mai apropiat de motorul electric, și ultimul defect indus prin slăbirea fixării lagărului stânga a arborelui antrenat de cureaua de transmisie.

- Analiza rezultatelor experimentale a arătat că indicii IES, IER și IESM sunt candidați viabili pentru a detecta prezența defectului.
- În mod special, indicele IESM, dacă parametrul său  $r$  este ajustat corespunzător în urma unui studiu de sensibilitate, prezintă o sensibilitate mai ridicată față de ceilalți doi indici entropici IES și IER.



- În funcție de tipul defectului indus, indicii entropici nu reprezintă o sensibilitate diferită. Astfel se poate face recomandarea ca pentru a alege indicele entropic cel mai sensibil vis-a-vis de prezența defectului, este necesar a se efectua un studiu de sensibilitate. Rezultatul acestui studiu va indica care dintre cei trei indici entropici este cel mai indicat a fi folosit.
- O privire de ansamblu asupra sensibilității celor 3 indici entropici este oferită în tabelul 3.2.1.

Tabel 3.2.1 Sensibilitatea indicilor entropici la defecte în echipamente rotative

Defect*	Semnal Traductor T1			Semnal Traductor T2			Semnal Traductor M		
	1200 [rot/min]	1500 [rot/min]	1800 [rot/min]	1200 [rot/min]	1500 [rot/min]	1800 [rot/min]	1200 [rot/min]	1500 [rot/min]	1800 [rot/min]
D1	IESM	-	IESM	IESM	IESM	IESM	IES, IESM	IESM	IESM
D2	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IES	IESM	IESM
D3	IES	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM
D4	IESM	IESM	-	IESM	-	-	IESM	IESM	-
D5	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM
D6	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM
D7	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM	IESM

\* D1- excentricitate statică, D2- excentricitate de cuplu, D3-fixare defectuoasă a motorului, D4-abatere planeitate transmisie curea, D5-curea transmisie cu defect, D6-fixare lagăr M slăbită, D7-fixare lagăr T1 slăbită

Lucrarea este dedicată unei tematici de actualitate și mare importanță științifică, înscriindu-se în domeniul specific al detectării defectelor la structuri mecanice și echipamente rotative, cu aplicabilitate în zona industrială. Prelucrarea semnalelor vibro-acustice cu ajutorul metodelor de analiză a semnalelor bazate pe entropii statistice reprezintă o abordare nouă în a semnaliza prezența defectelor. Folosirea unor metode bazate pe entropiile Shannon, Renyi sau Sharma-Mittal reprezintă un caracter de noutate, rezultatele cercetărilor fiind publicate sau în curs de publicare în două lucrări științifice cotate ISI [27, 28]

Se poate concluziona că noii indici entropici propuși se dovedesc sensibili pentru detectarea de defecte la structuri mecanice folosind analiza vibro-acustică. Pentru monitorizarea stării de integritate structurală a echipamentelor rotative, deoarece prelucrarea ulterioară achiziției de date se face în timp relativ scurt, indicii entropici propuși oferă sensibilitatea necesară la prezența de defecte pentru o astfel de monitorizare.

În cazul echipamentele rotative, în funcție de tipul echipamentului monitorizat, se poate opta pentru unul dintre cei 3 indici entropici. Alegerea indicelui potrivit se poate face în urma realizării unui studiu de sensibilitate. Mai mult, indicelui IESM i se poate ajusta sensibilitatea prin parametrul  $r$ , așa cum a fost arătat în prezentul studiu.

Rezultatele prezentului studiu realizat în perioada doctoranturii, le-am valorificat într-un număr de **12 lucrări științifice** publicate în volumele unor jurnale naționale sau internaționale, sau în cadrul unor conferințe internaționale din țară sau străinătate. **Trei dintre lucrările publicate sau aflate în curs de publicare sunt cotate ISI Proceedings.**

## BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

1. Sohn, H., Farrar, C., R., Hemez, F., M., Shunk, D., D., Stinemates, D., W., and B. Nadler, R., *Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001*. Los Alamos National Laboratory, USA., 2003.
2. Montalvao, D., Maia, N., M., M., Ribeiro, A., M., R., *A Review of Vibration-based Structural Health Monitoring with Special Emphasis on Composite*. The Shock and Vibration Digest, 2006. **28**: p. 295-324.
3. Chuaa, K., C., Chandranb, V., Acharyaa, U., R., Lima, C., M., *Application of higher order statistics/spectra in biomedical signals—A review*. Medical Engineering & Physics, 2010. **32**: p. 679-689.
4. Climente-Alarcona, V., Antonino-Daviua, J., A., Riera-Guaspa, M., Puche-Panadero, R., Escobarb, L., *Application of the Wigner–Ville distribution for the detection of rotor asymmetries and eccentricity through high-order harmonics*. Electric Power Systems Research, 2012. **91**: p. 28-36.
5. Shoukat Choudhurya, M., A., A., Shaha, L., S., Thornhillb, N., F., *Diagnosis of poor control-loop performance using higher-order statistics*. Automatica, 2004. **40**: p. 1719-1728.

## BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

6. Feldman, M., *Hilbert transform in vibration analysis* Mechanical Systems and Signal Processing, 2011. **25**: p. 735-802.
7. Fana, S.-Z., Weib, Q., Shic, P.-F., Chenc, Y.-J., Liub, Q., Shieh, J.-S., *A comparison of patients' heart rate variability and blood flow variability during surgery based on the Hilbert-Huang Transform* Biomedical Signal Processing and Control, 2011. **Article in Press**.
8. Sinha, J., K., *Higher Order Coherences for fatigue crack detection*. Engineering Structures, 2009. **31**: p. 534-538.
9. Barszcz, T., Randall, R., B., *Application of spectral kurtosis for detection of a tooth crack in the planetary gear of a wind turbine*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009. **23**: p. 1352-1365.
10. Jasinski, M., Radkowski, S., *Use of the higher spectra in the low-amplitude fatigue testing*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011. **25**: p. 704-716.
11. Jiang, L., Liu, Y., Li, X., Tang, S., *Using bispectral distribution as a feature for rotating machinery fault diagnosis*. Measurement, 2011. **44**: p. 1284-1292.
12. Nichols, J., M., Marzocca, P., Milanese, A., *On the use of the auto-bispectral density for detecting quadratic nonlinearity in structural systems*. Journal of Sound and Vibration, 2008. **312**: p. 726-735.
13. Nichols, J., M., Marzocca, P., Milanese, A., *The trispectrum for Gaussian driven, multiple degree-of-freedom, non-linear structures* International Journal of Non-Linear Mechanics, 2009. **44**: p. 404-416.
14. Urbanek, J., Barszcz, T., Zimroz, R., Antoni, J., *Application of averaged instantaneous power spectrum for diagnostics of machinery operating under non-stationary operational conditions*. Measurement, 2012. **45**: p. 1782-1791.
15. Liew, K., M., Wang, Q., *Application of Wavelet theory for crack identification in structures*. Journal of Engineering Mechanics, 1998. **February**: p. 152-157.
16. Avdakovic, S., Nuhanovic, A., Kusljugic, M., Music, M., *Wavelet transform application in power systems dynamics*. Electric Power Systems Research, 2012. **83**: p. 237-245.
17. Chen, S., L., Liu, J., J., Lai, H., C., *Wavelet analysis for identification of damping ratios and natural frequencies* Journal of Sound and Vibration, 2009. **323**: p. 130-147.
18. Nagaraju, C., Narayana Rao, K., *Application of 3D wavelet transforms for crack detection in rotor systems*. Sadhana, 2009. **34**(June): p. 407-419.
19. Al-Badour, F., Sunar, M., Cheded, L., *Vibration analysis of rotating machinery using time-frequency analysis and wavelet techniques*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011. **25**: p. 2083-2101.
20. Ebrahimi, B., M., Faiz, J., Lotfi-fard, S., Pillay, P., *Novel indices for broken rotor bars fault diagnosis in induction motors using wavelet transform* Mechanical Systems and Signal Processing, 2012. **30**: p. 131-145.
21. Cusidó, J., Romeral, L., Ortega, J., A., Garcia, A., Riba, J., R., *Wavelet and PDD as fault detection techniques*. Electric Power Systems Research, 2010. **80**: p. 915-924.
22. Kankar, P., K., Sharma, S., C., Harsha, S., P., *Fault diagnosis of ball bearings using continuous wavelet transform*. Applied Soft Computing, 2011. **11**: p. 2300-2312.
23. Jiang, X., Zhongguo, J., M., *Crack detection from the slope of the mode shape using complex continuous wavelet transform*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2012. **27**: p. 187-201.
24. Muralidharana, V., Sugumaranc, V., *A comparative study of Naïve Bayes classifier and Bayes net classifier for fault diagnosis of monoblock centrifugal pump using wavelet analysis*. Applied Soft Computing, 2012. **12**: p. 2023-2029.
25. Boskoski, P., Juricic, D., *Fault detection of mechanical drives under variable operating conditions based on wavelet packet Renyi entropy signatures*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012. **31**: p. 369-381.
26. Tocarciuc, A., Boltezar, M., Slavic, J., *On estimating fatigue life of structures exposed to vibration*. Kuhlievi Dnevi, 2008(1): p. 213-220.
27. Tocarciuc, A., Bereteu, L., Drăgănescu, G., *Damage detection in flux cored wire welded structures by using vibration testing*. Solid State Phenomena, 2013. **in press**.
28. Tocarciuc, A., Bereteu, L., Drăgănescu, G. *Entropy-based parameters sensitive to the presence of damage in rotating machinery*. in *Physics Conference TIM-13*. 2013: American Institute of Physics.