

# **CONTRIBUȚII LA LOCALIZAREA SURSELOR DE ZGOMOT UTILIZÂND INSTRUMENTAȚIE VIRTUALĂ**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea "Politehnica" din Timișoara  
în domeniul INGINERIE ELECTRONICĂ ȘI  
TELECOMUNICAȚII  
de către

**Ing. Raul Ciprian Ionel**

Conducător științific:	prof.univ.dr.ing. Alimpie Ignea
Referenți științifici:	prof.univ.dr.ing. Brândușa Pantelimon
	prof.univ.dr.ing. Monica Borda
	conf.univ.dr.ing. Ioan Naforniță

Ziua susținerii tezei: 19.11.2008

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- |                        |   |
|------------------------|---|
| 1. Automatică          | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie              | 8. Inginerie Industrială                    |
| 3. Energetică          | 9. Inginerie Mecanică                       |
| 4. Ingineria Chimică   | 10. Știința Calculatoarelor                 |
| 5. Inginerie Civilă    | 11. Știința și Ingineria Materialelor       |
| 6. Inginerie Electrică |   |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2008

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,  
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221  
e-mail: editura@edipol.upt.ro

## Cuvânt înainte

Prezenta lucrare a fost elaborată pe parcursul programului de doctorat cu frecvență susținut în Departamentul de Măsurari și Electronică Optică a Facultății de Electronică și Telecomunicații din cadrul Universității „Politehnica” din Timișoara. Perioada desfășurării programului doctoral a fost octombrie 2005 – septembrie 2008.

Teza dezvoltă o cercetare în domeniul localizării surselor de zgomot din sistemele de conducte care transportă lichide. Identificarea defecțiunilor care apar în sistemele de conducte reprezintă o problemă de interes pe plan mondial. Localizarea fisurilor din conducte pe baza prelucrării zgomotelor și vibrațiilor reprezintă o soluție modernă pentru reducerea pierderilor din rețelele de transport cu beneficii economice în condiții de protejare a mediului înconjurător.

Metoda performantă de localizare a fisurilor din sistemele de conducte, fără săpături inutile, este utilizarea unei instrumentații virtuale dedicate. Această instrumentație funcționează prin prelucrarea zgomotelor generate de fisurile din conducte atunci când lichidul curge prin ele. Prezenta lucrare implementează o instrumentație virtuală care este dedicată localizării fisurilor din conductele care transportă lichide.

Programul de doctorat s-a desfășurat sub conducerea domnului Prof. dr. ing. Alimpie Ignea. În calitate de conducător de doctorat, domnul profesor mi-a oferit cu profesionalism sprijin pentru a finaliza lucrarea. Am beneficiat de o îndrumare deosebită în ceea ce privește selectarea literaturii de specialitate adecvată, realizarea referatelor din cadrul doctoratului, scrierea și publicarea lucrărilor științifice și parcurgerea etapelor de cercetare care au dus la atingerea scopurilor propuse. Pentru toate acestea îi aduc calde mulțumiri.

Sunt deosebit de îndatorat distinsului Prof.dr.ing. Josef Hoffmann, care m-a sprijinit cu documentație și software specializat precum și cu sfaturi deosebit de utile în legătură cu anumiți algoritmi de prelucrare a semnalelor.

Sunt recunoscător conducerii Universității „Politehnica” din Timișoara pentru sprijinul acordat la achiziționarea unui aparat profesional de localizare, folosit ca referință pe parcursul cercetărilor experimentale.

Conducerea Facultății de Electronică și Telecomunicații m-a îndatorat cu facilitarea deplasării la conferințe în vederea susținerii unor lucrări științifice. De asemenea aduc mulțumiri agenției ERASMUS-SOCRATES pentru finanțarea stagiului de documentare la Universitat Stuttgart.

Colegilor din Departamentul Măsurari și Electronică Optică le sunt recunoscător pentru atmosfera plăcută de lucru și încurajările primite pe parcursul elaborării tezei.

Adresez mulțumiri domnului Nodiș Ioan pentru susținerea financiară în vederea achiziționării unor echipamente de calcul necesare.

Nu în ultimul rând, recunoștința mea se îndreaptă spre familia mea care a dat dovadă de înțelegere, suport și dragoste în timpul desfășurării programului doctoral.

Timișoara, noiembrie 2008

ing. Raul Ciprian IONEL

Ionel, Raul Ciprian

**Contribuții la localizarea surselor de zgomot utilizând instrumentație virtuală**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 7, Nr. 7, Editura Politehnica, 2008, 172 pagini, 124 figuri, 18 tabele.

ISSN: 1842-7014

ISBN: 978-973-625-746-9

Cuvinte cheie:

Fisuri în conductele de transport pentru lichide, localizarea fisurilor din conducte, algoritmi de prelucrare a semnalelor acustice, programare grafică utilizând mediul LabVIEW, principiul intercorelației, creșterea acurateții procesului de localizare, timp de răspuns al senzorilor, instrumentație virtuală.

Rezumat:

Lucrarea abordează problema localizării surselor de zgomot în vederea diagnosticării sistemelor de conducte care transportă lichide (apă, combustibili, lichide reziduale). Prezența fisurilor sau spărturilor în sistemele de conducte care transportă lichide cauzează pierderi financiare importante dar și deteriorarea mediului înconjurător. Lucrarea studiază metoda de localizare a poziției fisurilor existente utilizând principiul intercorelației. Acest principiu utilizează semnale acustice achiziționate de la un sistem experimental real care include o conductă metalică și transportă apă menajeră. Prin studiul unor algoritmi clasici dar și prin dezvoltarea unor algoritmi noi de prelucrare a semnalelor, s-a reușit implementarea unei aplicații software care detectează existența și poziția sursei de zgomot (fisurii, spărturii) în cadrul sistemului de transport. Aplicația dezvoltată este extrem de avantajoasă din punct de vedere al prețului, al ușurinței de utilizare și a acurateții de localizare.

## Lista de figuri

Fig.2.1 Principiul localizării sursei de zgomot prin corelație.....	19
Fig.2.2 Semnale măsurate generate de o fisură la debitul de 8,27 l/min.....	23
Fig.2.3 FIC "nenormalizată" calculată pentru semnalele de la cei doi senzori.....	24
Fig.2.4 Evidențierea deplasamentului de 15 eșantioane al FIC.....	24
Fig.3.1 Instalația experimentală utilizată.....	32
Fig.3.2 Robinetul care simulează fisura .....	33
Fig.3.3 Senzor piezo-electric KD13 plasat pe conducta experimentală.....	34
Fig.3.4 Achiziția semnalelor cu placa NI USB 9215A și aplicația implementată în LabVIEW.....	35
Fig.3.5 Semnale măsurate pentru debitul de 0,25 l/min.....	36
Fig.3.6 Semnale măsurate pentru debitul de 1,06 l/min.....	37
Fig.3.7 Căderea presiunii din conductă datorită debitului mare la fisură.....	38
Fig.3.8 Reprezentarea sistemică a instalației experimentale.....	38
Fig.3.9 Semnalele utilizate pentru identificarea instalației experimentale.....	40
Fig.3.10 Reprezentarea sistemică a instalației experimentale cu perturbațiile incluse în zgomotul de intrare.....	41
Fig.3.11 Secvență de zgomot alb, $z(t)$ , cu resturi de convoluție minime.....	41
Fig.3.12 Funcțiile pondere discrete ale instalației experimentale.....	42
Fig.3.13 Primele 50 de valori ale funcției pondere $h_1$ (marcată prin o) și aproximarea ei prin formula empirică (marcată prin o și linie continuă)....	43
Fig.3.14 Primele 100 de valori ale funcțiilor pondere $h_1$ și $h_2$ .....	44
Fig.3.15 Caracteristicile amplificare-frecvență și fază-frecvență ale funcțiilor de transfer $H_1(s)$ și $H_2(s)$ , în domeniul frecvențelor relativ înalte.....	45
Fig.3.16 Caracteristicile amplificare-frecvență și fază-frecvență pentru funcțiile de transfer $H_1(s)$ și $H_2(s)$ , în domeniul frecvențelor joase.....	46
Fig.3.17 Mărirea $\theta_{s1s2}(f)/(2\pi \cdot f)$ , conform modelului experimental identificat. Axa pulsațiilor este lineară (sus), respectiv logaritmică (jos).....	47
Fig.3.18 Semnale măsurate pentru debitul de 0,35 l/min.....	49
Fig.3.19 Funcțiile de autocorelație pentru $m = 15000$ .....	50
Fig.3.20 Funcția de intercorelație pentru $m = 15000$ .....	51
Fig.3.21 Evoluția coeficienților de staționaritate în funcție de limita de filtrare.....	52
Fig.3.22 Îmbunătățirea fluctuațiilor valorilor medii pentru Semnalul 0 la debitul de 0,35 l/min.....	53
Fig.3.23 Îmbunătățirea fluctuațiilor valorilor medii pentru Semnalul 1 la debitul de 0,35 l/min.....	53
Fig.3.24 Funcțiile de autocorelație după staționarizare pentru $m = 15000$ .....	54
Fig.3.25 Funcția de intercorelație după staționarizare pentru $m = 15000$ .....	54
Fig.3.26 Densitatea spectrală pentru semnale staționare la debitul de 8,27 l/min....	57
Fig.3.27 Densitatea spectrală pentru semnale staționare la debitul de 2,76 l/min....	57
Fig.3.28 Evoluția puterii totale pentru cele două canale în funcție de debitul la fisură.....	59
Fig.3.29 Evoluția puterii totale pentru semnalele staționare la debitul de 2 l/min.....	60
Fig.3.30 Semnale simulate de tip zgomot.....	61

Fig.3.31 Funcția de intercorelație între semnalele simulate de tip zgomot.....	62
Fig.3.32 Densitatea spectrală pentru semnale simulate.....	62
Fig.3.33 Densitatea Spectrală de Putere Mutuală între semnalele simulate....	63
Fig.3.34 Evoluția negativă a pantei (întârziere pozitivă) pentru semnalele simulate.	63
Fig.3.35 Densitatea Spectrală de Putere Mutuală la debitul de 6,09 l/min.....	64
Fig.3.36 Evoluția negativă a pantei (întârziere pozitivă) la debitul de 6,09 l/min.....	64
Fig.3.37 Densitatea Spectrală de Putere Mutuală la debitul de 0,20 l/min.....	65
Fig.3.38 Evoluția negativă a pantei (întârziere pozitivă) la debitul de 0,20 l/min.....	65
Fig.4.1 Timpul de stabilire pentru cazul determinist pur.....	69
Fig.4.2 Realizări suprapuse ale unui process staționar centrat de tipul zgomotului alb...	71
Fig.4.3 Procesul tranzitoriu de la ieșirea circuitului.....	71
Fig.4.4 Funcția de autocovarianță tranzitorie a procesului de ieșire.....	73
Fig.4.5 Funcția de autocovarianță a procesului staționar de ieșire.....	73
Fig.4.6 Definierea timpului de stabilire cu ajutorul varianței.....	74
Fig.4.7 Regim tranzitoriu mixt pentru $U = 3V$ .....	75
Fig.4.8 Caracteristicile de frecvență ale filtrului RC trece-jos.....	77
Fig.4.9 Timpul de stabilire în cazul unei trepte reale, pentru $b = 10 \cdot a$ .....	77
Fig.4.10 Timpul de stabilire în cazul unei trepte reale, pentru $b = 0,1 \cdot a$ .....	78
Fig.4.11 Regim tranzitoriu mixt, pentru $U = 0,5V$ .....	79
Fig.4.12 Dependența timpului de stabilire de parametrii $a$ și $U$ .....	80
Fig.4.13 Dependența funcțiilor de autocorelație și densitate spectrală de putere în raport cu parametrii $B$ și $b$ , numeric egali.....	84
Fig.4.14 Rezolvarea grafică a ecuației (4.34).....	85
Fig.4.15 Aproximarea printr-o formulă empirică a dependenței $aT = f(\eta)$ ..	86
Fig.4.16 Curbe de aproximare a timpului de stabilire pentru $a = 800, 900$ și $1000 \text{ rad/s}$ .....	87
Fig.5.1 Parametrii deplasament și calitate ( $Q$ ) pentru funcția de intercorelație calculată..	90
Fig.5.2 Modelul propagării zgomotelor de fisură.....	93
Fig.5.3 Schema echivalentă a modelului de propagare a zgomotelor de fisură.....	94
Fig.5.4 Modelul filtrării inverse a semnalelor generate de fisură.....	94
Fig.5.5 Filtrarea inversă a semnalelor generate de fisură.....	96
Fig.5.6 Pereche de semnale, debit 6,09 l/min.....	97
Fig.5.7 Funcția de intercorelație inițială, fără prelucrări suplimentare.....	98
Fig.5.8 Densitatea spectrală a semnalelor inițiale, nealbite.....	98
Fig.5.9 Caracterul de filtru invers al albirii pentru semnalul 0.....	99
Fig.5.10 Caracterul de filtru invers al albirii pentru semnalul 1.....	99
Fig.5.11 Netezirea spectrelor prin procesul de albire a semnalelor.....	100
Fig.5.12 Funcția de intercorelație îmbunătățită după albire.....	100
Fig.5.13 Reprezentarea raportului timp de execuție/ ordin model/ lungime semnale.....	101
Fig.5.14 Evoluția calității în funcție de numărul de coeficienți, debit 8,27 l/min.....	102
Fig.5.15 Evoluția deplasamentelor după procedura de albire, debit 8,27 l/min.....	104
Fig.5.16 Evoluția deplasamentelor după procedura de albire, debit 8,27 l/min.....	104
Fig.5.17 Evoluția calității FIC calculate după aplicarea albirii, debitul 8,27 l/min.....	105
Fig.5.18 Evoluția calității în funcție de numărul de coeficienți, debit 6,09 l/min.....	106
Fig.5.19 Evoluția deplasamentelor după procedura de albire, debit 6,09 l/min.....	106
Fig.5.20 Evoluția calității FIC calculate după aplicarea albirii,debitul 1,06 l/min.....	108
Fig.5.21 FIC calculată pentru semnale achiziționate la debitul de 0,25 l/min.....	111
Fig.5.22 Funcția de coerență inițială pentru semnale achiziționate la debitul de 0,25 l/min.....	111
Fig.5.23 Funcția de coerență filtrată pentru semnale achiziționate la debitul	112

de 0,25 l/min.....	
Fig.5.24 Intervale determinate în mod automat pentru funcția de coerență filtrată...	113
Fig.5.25 FIC îmbunătățită calculată pentru semnale achiziționate la debitul de 0,25 l/min.....	114
Fig.5.26 FIC calculată pentru semnale achiziționate la debitul de 4,27 l/min..	114
Fig.5.27 FIC îmbunătățită calculată pentru semnale achiziționate la debitul de 4,27 l/min.....	115
Fig.5.28 Perechea 0 de semnale reale, debitul 6,09 l/min.....	116
Fig.5.29 Deplasamente și factori de calitate pentru 100 de măsurări, debitul 6,09 l/min.....	117
Fig.5.30 Histograme pentru 100 de măsurări, debitul 6,09 l/min.....	117
Fig.5.31 Rezultatele aplicării principiului 2 din 3.....	118
Fig.5.32 Rezultatele aplicării principiului 3 din 5.....	119
Fig.5.33 Rezultatele aplicării principiului 4 din 7.....	119
Fig.6.1 Identificarea conexiunii cu placa de achiziție.....	123
Fig.6.2 Icoana programului Measurement and Automation Explorer.....	123
Fig.6.3 Panoul de lucru al programului Measurement and Automation Explorer.....	124
Fig.6.4 Parametrii de funcționare ai plăcii configurați prin DAQ Assistant.....	125
Fig.6.5 Semnalarea erorii de conexiune între placa de achiziție și aplicație.....	125
Fig.6.6 Implementarea procedurii de staționizare prin sub-instrumente virtuale....	126
Fig.6.7 Sub-instrumente virtuale utilizate în program.....	127
Fig.6.8 Vizualizarea semnalelor și distribuția spectrală (Analiză Extinsă).....	128
Fig.6.9 Detaliile panoului pentru vizualizarea semnalelor.....	129
Fig.6.10 Staționizarea, evoluția pantei și intercorelație clasică pentru semnalele din fișiere.....	130
Fig.6.11 Detaliile panoului pentru staționizarea semnalelor.....	131
Fig.6.12 Calculul intercorelației în urma procedurii de albire și rezultatele obținute...	132
Fig.6.13 Detaliile referitoare la albirea semnalelor.....	132
Fig.6.14 Analiza automată pe benzi de frecvență.....	133
Fig.6.15 Detalii referitoare la analiza automată pe benzi de frecvență.....	134
Fig.6.16 Implementarea principiului majorității deplasamentelor.....	134
Fig.6.17 Panoul frontal al software-ului Correlux P200.....	136
Fig.6.18 Intervale de frecvențe utilizate pentru analiza semnalelor.....	137
Fig.6.19 Analiza semnalelor pe segmente, reprezentare 3-D.....	137
Fig.6.20 Introducerea datelor despre conductă.....	137
Fig.6.21 Semnale măsurate cu aparatul profesional Correlux P200.....	138
Fig.6.22 FIC pentru semnale măsurate cu aparatul profesional Correlux P200.....	139
Fig.6.23 Funcționarea aplicației pentru localizarea surselor de zgomot.....	141
Fig.A1.1 Stationarizeaza.vi – diagrama bloc.....	155
Fig.A1.2 Albirea.vi – diagrama bloc.....	155
Fig.A1.3 Calcul_FIC.vi – diagrama bloc.....	156
Fig.A1.4 Filtreaza_Coerenta.vi – diagrama bloc.....	156
Fig.A1.5 Analiza_Spectrala.vi – diagrama bloc.....	157
Fig.A1.6CSD_Faza.vi – diagrama bloc.....	157
Fig.A3.1 Conectarea instalației la rețeaua de alimentare cu apă.....	169
Fig.A3.2 Conexiune din instalație care poate fi considerată o sursă nedorită de zgomote.	170
Fig.A3.3 Obturarea unui capăt al instalației experimentale.....	170
Fig.A3.4 Vedere de ansamblu a conductei utilizate.....	171

## Lista de tabele

Tabelul 2.1 Evoluția prețurilor pentru consumul de apă la nivelul marilor companii..	17
Tabelul 2.2 Pierderi de apă în funcție de presiunea rețelei și diametrul fisurii.....	18
Tabelul 3.1 Amplificările utilizate pentru măsurătorile efectuate.....	36
Tabelul 3.2 Detaliile staționării semnalelor pentru debitul de 0,35 l/min...	52
Tabelul 3.3 Staționarea semnalelor achiziționate, intervale și coeficienți..	55
Tabelul 3.4 Evoluția puterii totale pentru cele două canale în funcție de debitul din fisură.....	58
Tabelul 3.5 Puteri totale pentru semnalele staționizate la, debitul de 2 l/min.....	59
Tabelul 4.1 Primele 10 valori ale lui x.....	85
Tabelul 4.2 Ultimele 10 valori ale lui x.....	85
Tabelul 5.1 Parametrii FIC calculați pentru semnalele obținute la debitul de 8,27 l/min.....	91
Tabelul 5.2 Parametrii FIC calculați pentru semnalele la debitul de 6,09 l/min.....	92
Tabelul 5.3 Parametrii FIC calculați pentru semnalele la debitul de 1,06 l/min.....	92
Tabelul 5.4 Timpul de execuție în funcție de ordinul modelului și lungimea semnalelor.....	101
Tabelul 5.5 Evoluția calității după procesul de albire, perechea 0, debit 8,27 l/min.	103
Tabelul 5.6 Situația FIC calculate după aplicarea albirii pentru semnalele la debitul 8,27 l/min.....	105
Tabelul 5.7 Situația FIC calculate după aplicarea albirii pentru semnalele la debitul 6,09 l/min.....	107
Tabelul 5.8 Situația FIC calculate după aplicarea albirii pentru semnalele la debitul 1,06 l/min.....	108
Tabelul 5.9 Parametrii FIC calculate pentru semnale la debitul de 0,25 l/min.....	110



## CUPRINS

Lista de figuri.....	6
Lista de tabele.....	9
1. Introducere.....	10
2. Stadiul actual în domeniul localizării surselor de zgomot.....	14
2.1 Surse de zgomot în sistemele tehnice.....	14
2.2 Localizarea fisurilor din conducte.....	15
2.3 Principiul localizării fisurilor prin metoda corelației.....	18
2.4 Factorii care influențează procesul de localizare.....	25
2.5 Instrumentație virtuală: definire și prezență în domeniul localizării..	26
2.6 Concluzii.....	29
3. Producerea, propagarea și caracterizarea semnalelor provenite de la sursa de zgomot. Studiu de caz.....	31
3.1 Prezentarea instalației experimentale și a semnalelor achiziționate...	31
3.2 Funcțiile pondere și de transfer ale instalației experimentale.....	38
3.3 Problema staționarității semnalelor achiziționate.....	48
3.4 Caracterizarea primară, analiza de corelație și analiza spectrală a semnalelor...	55
3.5 Concluzii.....	66
4. Studiul dinamicii senzorilor.....	68
4.1 Timpul de stabilire generalizat.....	68
4.2 Studiul analitic al timpului de stabilire.....	76
4.2.1 Efectul componentei continue asupra timpului de stabilire.....	76
4.2.2 Efectul lărgimii de bandă a zgomotului asupra timpului de stabilire.....	83
4.3 Concluzii.....	88
5. Creșterea acurateții de localizare a surselor de zgomot.....	89
5.1 Observații privind localizarea fisurilor utilizând semnalele staționarizate.....	89
5.2 Creșterea acurateții de localizare prin albirea semnalelor.....	93
5.3 Creșterea acurateții de localizare prin prelucrarea semnalelor pe benzi de frecvențe.....	109
5.4 Principiul majorității deplasamentelor.....	115
5.5 Concluzii.....	120
6. Instrumentația virtuală. Aplicație.....	122
6.1 Aplicația pentru localizarea surselor de zgomot – aspecte generale...	122
6.2 Instalarea aplicației pentru localizarea surselor de zgomot.....	122
6.3 Achiziția semnalelor provenite de la sursa de zgomot.....	124
6.4 Analiza extinsă a semnalelor provenite de la sursa de zgomot.....	127
6.5 Studiu comparativ între aplicația dezvoltată în cadrul programului de doctorat și o aplicație profesională dedicată localizării fisurilor din conducte....	136
6.6 Concluzii.....	139
7. Concluzii generale și contribuții.....	142
7.1 Concluzii generale.....	142
7.2 Contribuții.....	143
7.3 Direcții de dezvoltare.....	145
Bibliografie.....	147
Anexe.....	156

# 1. INTRODUCERE

Localizarea surselor de zgomot prin prelucrarea semnalelor provenite de la acestea cuprinde o arie extinsă de aplicații industriale care au scopul de a monitoriza și diagnostica funcționarea unor sisteme. De exemplu localizarea surselor de zgomot se aplică la studierea funcționării ventilatoarelor, a motoarelor sau a compresoarelor. Un element al sistemului (aparaturii) care este deteriorat va emite zgomote specifice care nu sunt în acord cu amprenta sonoră generată în cazul funcționării corecte. Cu ajutorul prelucrărilor efectuate asupra zgomotelor captate de la sursă se poate determina dacă funcționarea sistemului testat este sau nu corectă. Acest mod de a diagnostica funcționarea unui sistem se poate utiliza ca măsură de prevenire a apariției unor defecțiuni (*preventive maintenance*) sau pentru localizarea poziției unor defecțiuni deja existente [M12].

Un domeniu de aplicare a localizării surselor de zgomot este diagnosticarea sistemelor de conducte care transportă lichide (apă, combustibili, lichide reziduale). Datorită unor factori precum temperatura, mișcări ale solului, vibrații datorate traficului etc., sistemele de conducte pot prezenta fisuri sau chiar spărturi, prin care lichidele se scurg în mediul înconjurător [C6]. Existența acestor fisuri sau spărturi în sistemele de transport pentru lichide cauzează atât pierderi financiare majore cât și deteriorarea mediului înconjurător (mai ales în cazul combustibililor sau a lichidelor reziduale). În cadrul tezei, fisurile existente sunt considerate ca fiind surse de zgomot care trebuie localizate.

Curgerea lichidului afară din conducte, prin intermediul fisurilor, produce zgomote specifice (*leak noises*) care se propagă prin corpul conductei, prin mediul care înconjoară conducta ca și prin lichidul din interiorul conductei. Localizarea sursei de la care provin zgomotele se poate face, în acest caz, prin mijloace acustice. Localizarea prin prelucrarea semnalelor acustice nu este unica modalitate de a diagnostica un sistem de conducte pentru transportul lichidelor. Alte metode de localizare a defecțiunilor includ monitorizarea presiunii din conducte, termografia sau utilizarea fibrelor optice.

Deși există diverse aparate specializate pentru localizarea fisurilor din conducte, având în vedere importanța domeniului, nevoia de cercetare continuă în acest domeniu este o necesitate [A3], [A4]. Această nevoie de continuă dezvoltare este motivată de faptul că aparatele specializate nu asigură o localizare precisă pentru toate condițiile de lucru. Diversitatea condițiilor de utilizare a aparatelor pentru localizare, rezultată din varietatea dimensiunilor și formei fisurilor, a materialelor de fabricație a conductelor sau din natura lichidului transportat, cauzează limitări ale posibilităților de estimare corectă a poziției fisurilor. Eficiența de localizare a acestor aparate nu se încadrează într-o clasă de acuratețe bine stabilită. În literatura de specialitate, există doar precizări generale referitoare, de exemplu, la debitul minim de scurgere prin fisură care permite încă localizarea acesteia [P4], [M19].

Prezenta lucrare are ca scop dezvoltarea unei aplicații software care utilizează algoritmi de prelucrare a semnalelor acustice generate de o sursă de zgomot pentru a indica poziția defecțiunii. Această aplicație poate fi utilizată în domeniul localizării fisurilor din conductele de transport a apei menajere sau a oricărui alt tip de lichid. Având în vedere că soluția dezvoltată vizează o utilizare

industrială, s-a urmărit ca manevrarea instrumentației virtuale create să fie simplă, afișarea rezultatelor obținute să fie cât mai sugestivă pentru utilizator iar poziția sursei de zgomot să fie indicată cu o precizie cât mai bună.

În vederea atingerii obiectivelor menționate s-a realizat un model experimental, s-au utilizat mijloace moderne de programare (mediile MATLAB, LabVIEW și Agilent VEE) și s-au implementat prelucrări de semnale pe baza unor algoritmi clasici, dar și prin dezvoltarea unor noi algoritmi.

Literatura de specialitate cuprinde numeroase lucrări în care dezvoltarea algoritmilor de prelucrare a semnalelor provenite de la sursele de zgomot se face pornind de la unele ipoteze simplificatoare, idealizate, privitoare la natura semnalelor. Tot ca o constatare generală asupra literaturii de specialitate a domeniului, majoritatea contribuțiilor se limitează la verificarea prin simulare a metodelor și algoritmilor dezvoltați. Față de aceste constatări, trebuie subliniat specificul lucrării de față și anume faptul algoritmi implementați s-au dezvoltat pornind de la semnale reale măsurate pe un model experimental realizat de autor. Instalația experimentală este în esență o conductă pentru transportul apei menajere și care are prevăzută posibilitatea modelării controlate a unor fisuri de diferite debite. În raport cu dimensiunile reduse ale modelului experimental, sursa de zgomot (fisura) nu poate fi considerată punctiformă. Funcționarea sistemului este afectată de turbulențe locale, fluctuații ale presiunii din conductă sau zgomote din mediul ambiant. Un aspect important constatat pentru modelul experimental utilizat este că zgomotele parazite, care se suprapun peste semnalele utile provenind de la sursa de zgomot, sunt corelate între ele. Contrar ipotezelor uzuale în literatura de specialitate, în cazul unei instalații de mici dimensiuni, corelarea între zgomotele parazite nu poate fi evitată. Datorită corelării dintre aceste zgomote perturbatoare, testarea și dezvoltarea aplicației presupune dificultăți de analiză suplimentare.

Cercetarea efectuată în cadrul programului de doctorat s-a concentrat asupra unor algoritmi de prelucrare a semnalelor utilizați în domeniu, dar și pe dezvoltarea unor proceduri de analiză care au caracter de contribuție personală. Un aspect important este funcționarea automată a procedurilor dezvoltate astfel încât intervenția utilizatorului într-un ciclu de măsurare să fie minimă. Utilizatorul va instala un set de programe driver și aplicația pe un calculator portabil (laptop). Procedura de instalare este simplă. El include pașii de instalare a oricărui pachet software comercial. Prin câteva click-uri de mouse utilizatorul va avea rezultatele unei analize complete a semnalelor, nefiind nevoit să aibă cunoștințe de analiză spectrală, filtrare, corelație, etc. Utilizarea colecției de programe împreună cu un calculator portabil asigură trăsătura de portabilitate. Acest aspect este important având în vedere că în domeniul localizării surselor de zgomot reprezentate de fisurile din conducte, deplasarea pe teren este obligatorie.

Prezenta teză de doctorat este structurată în 7 capitole și 3 Anexe. Astfel, după capitolul 1 cu rol de *Introducere*, capitolul 2 tratează despre *Stadiul actual în domeniul localizării surselor de zgomot*. Acesta dezvoltă problematica localizării surselor de zgomot în sistemele tehnice. Necesitatea cercetării în domeniul localizării fisurilor din conducte este evidențiată prin prezentarea unor studii și date preluate din literatură. În țările puternic dezvoltate lupta împotriva pierderilor din sistemele de transport a lichidelor este continuă [H6], [B1],[W2]. Termenul *Active Leakage Control* este utilizat într-un studiu efectuat în orașul Calgary (Canada) și definește nevoia de mărire a investițiilor în scopul localizării fisurilor din conducte și al reparării defecțiunilor [P4]. Pe plan local, în anul 2006, compania care furnizează servicii de apă și canalizare, *Aquatim Timișoara*, s-a confruntat cu peste 30 de intervenții săptămânale în vederea remedierii unor spărturi din conducte [A6].

Identificarea defecțiunilor din sistemele de conducte este de actualitate și rămâne o prioritate pentru companiile din domeniu.

O modalitate de localizare a surselor de zgomot este principiul intercorelației între semnalele achiziționate de la aceste surse. Principiul intercorelației este cel care stă la baza aplicației dezvoltate în cadrul programului de doctorat. Acest principiu este prezentat atât schematic cât și cu ajutorul unor semnale măsurate [H6]. Funcția de intercorelație prezintă un maxim a cărui poziție corespunde diferenței timpilor de propagare a semnalului generat de fisură până la cei doi senzori care captează zgomotele ce urmează a fi prelucrate în vederea localizării fisurii. Evidențierea clară a deplasamentului acestui maxim față de punctul de întârziere nulă (corespunzător unor timpi de propagare egali pentru semnalele măsurate) este importantă.

Capitolul arată dificultățile și factorii care afectează procesul de localizare a surselor de zgomot [G9]. Detaliile prezentate susțin ideea dezvoltării unei aparaturi care să fie capabilă să localizeze sursa de zgomot indiferent de condițiile de desfășurare a măsurărilor.

Soluția se regăsește în conceptul de instrumentație virtuală. Migrarea de la instrumentele *stand-alone* către instrumente virtuale se datorează dezvoltării puterii de calcul a PC-urilor [T9], [F5]. Tendința de a implementa programe care folosesc algoritmi de prelucrare a semnalelor (partea software) și de a îmbina aceste programe cu o componentă hardware adecvată, este certă [O1]. În această categorie a instrumentelor virtuale se încadrează și aplicația dezvoltată în cadrul programului de doctorat, aceasta incluzând atât o parte software cât și partea hardware adecvată.

În capitolul 3 intitulat *Producerea, propagarea și caracterizarea semnalelor provenite de la sursa de zgomot. Studiu de caz*, sunt prezentate detalii referitoare la instalația experimentală utilizată. Capitolul prezintă parametri utilizați pentru achiziția semnalelor precum și împărțirea acestor semnale pe categorii, în funcție de debitul din fisură. O contribuție teoretică semnificativă este caracterizarea instalației experimentale, prin intermediul funcțiilor pondere și de transfer. În acest scop se propune un model nou de tipul *single input/two output* pentru instalația experimentală și se evidențiază că acesta corespunde mai bine realității fizice a instalației decât modelul clasic [B6], [B7]. Procedura de „identificare” a funcțiilor de transfer este originală. Relațiile obținute conduc la două concluzii. Este important să cunoaștem funcțiile de transfer care caracterizează propagarea semnalelor de la fisură la cei doi senzori (*single input/multiple output problems*) [B6], [B7]. Pe această bază se poate determina diferența timpilor de propagare din faza funcției densitate spectrală de putere. Cu această ocazie se evidențiază importanța domeniului frecvențelor joase în prelucrarea semnalelor provenind de la fisură. Se deschide, pentru viitor, posibilitatea unui studiu statistic a preciziei metodelor de localizare a surselor de zgomot: cunoașterea funcțiilor de transfer din modelul propus permite generarea prin simulare a unui număr oricât de mare de semnale de fisură și caracterizarea statistică a diferitelor metode de prelucrare.

Semnalele achiziționate prezintă un caracter nestaționar. Datorită componentelor modale (oscilațiile proprii ale sistemului) care se suprapun peste semnalele utile, funcțiile de intercorelație și autocorelație sunt puternic deformate. Pe cale experimentală se constată că în special la debite din fisură mici (de exemplu 0,35 l/min) trebuie rejectate frecvențele joase, care au efect perturbator asupra semnalelor utile cauzate de fisură. A fost implementat un algoritm automat care asigură înlăturarea acestor componente modale. Prin aceasta semnalele se staționarizează înainte de prelucrarea lor efectivă.

Analiza în domeniul frecvență oferă o concluzie în ceea ce privește apropierea mai mare a unuia din senzori față de sursa de zgomot. Prin studiul puterii totale a semnalelor și a evoluției pantei fazei densității spectrale de putere mutuală putem deduce dacă funcția de intercorelație este calculată corect și dacă unul din senzori este mai apropiat de fisură.

Capitolul 4 se referă la *Studiul dinamicii senzorilor*. Cei doi senzori piezoelectrice sunt elemente importante ale instrumentației pentru localizare. Timpul de stabilire generalizat (*Settling Time*) este utilizat pentru caracterizarea comportamentului dinamic al senzorilor în ideea că durata regimului tranzitoriu al procesului de la ieșirea sensorului depinde atât de frecvența de tăiere a sensorului cât și de caracterul determinist, aleator sau mixt al procesului de măsurat. O primă concluzie a acestui capitol este că prezența unei componente continue în semnalul de intrare conduce la creșterea duratei de timp a regimului tranzitoriu. Semnalele care au o componentă continuă redusă sau nulă dau posibilitatea creșterii frecvenței de eșantionare. O altă concluzie este aceea că timpul de stabilire al procesului de la ieșirea senzorilor scade o dată cu creșterea frecvenței lor de tăiere și cu creșterea benzii zgomotului de la intrare. Relațiile originale deduse în cadrul acestui capitol permit, pe baza unor informații apriorice, stabilirea frecvenței de eșantionare în funcție de caracteristicile sensorului și de banda semnalelor ce trebuie măsurate.

Capitolul 5 intitulat *Creșterea acurateții de localizare a surselor de zgomot* prezintă algoritmi utilizați pentru prelucrarea semnalelor generate de fisură. Doi parametri sunt urmăriți pe întregul acestui capitol: deplasamentul valorii maxime al funcției de intercorelație (FIC) și factorul de calitate al FIC.

Pe baza a trei colecții de semnale achiziționate la diferite debite din fisură, se constată că FIC calculate fără algoritmi de îmbunătățire a estimării, conduc la erori în ceea ce privește poziționarea valorii maxime. Algoritmii propuși se referă la includ *albirea semnalelor, prelucrarea automată pe benzi de frecvențe și principiul majorității deplasamentelor*. Se arată că, prin aplicarea acestor algoritmi, erorile de localizare (deplasamentele eronate) pot fi înlăturate și se obțin factori de calitate ai FIC mult îmbunătățiți. Cei trei algoritmi sunt implementați în aplicația pentru localizarea surselor de zgomot dezvoltată în cadrul programului de doctorat.

În capitolul 6 (*Instrumentația virtuală. Aplicație*) se prezintă aplicația pentru localizarea surselor de zgomot reprezentate de fisurile din conducte. Partea de software a aplicației a fost dezvoltată cu ajutorul mediului de programare grafică LabVIEW, versiunea 8.5. Corectitudinea funcționării acestei aplicații a fost verificată și prin intermediul programului MATLAB, versiunea 7.5.

Instalarea și utilizarea aplicației se fac foarte ușor. Aceasta poate fi folosită în modul de analiză rapidă (on-site) dar și în modul de analiză extinsă care presupune lucrul cu fișiere de date. Un studiu comparativ cu o instrumentație virtuală profesională (sistemul Correlux P200 [N3]) arată performanțele încurajatoare pe care aplicația dezvoltată în cadrul programului de doctorat le are. Atât din punct de vedere al algoritmilor implementați cât și din punctul de vedere al reprezentărilor, aplicația din lucrare este competitivă. O posibilă direcție de dezvoltare a prezentei aplicații se referă la partea hardware utilizată. O necesitate este aceea de a înlocui transmiterea datelor prin intermediul cablurilor cu transmiterea datelor prin unde radio.

Capitolul 7 prezintă cele mai importante *Concluzii generale și contribuții*.

În *Anexe* se pot găsi secțiuni reprezentative din programele elaborate în LabVIEW, secvențe de cod din programele scrise în MATLAB și imagini din timpul realizării experimentelor.

## 2. STADIUL ACTUAL ÎN DOMENIUL LOCALIZĂRII SURSELOR DE ZGOMOT

### 2.1 Surse de zgomot în sistemele tehnice

Localizarea surselor de zgomot reprezintă o modalitate de a determina dacă funcționarea unui echipament este sau nu corectă. Pe baza monitorizării zgomotelor și vibrațiilor generate de funcționarea echipamentului (compresoare, motoare, ventilatoare) se poate evalua starea sa generală sau se pot identifica probleme ale unor componente. Identificarea problemelor de funcționare ale unui echipament implică, alături de localizarea surselor de zgomot și vibrații, și alte procese care analizează probleme electrice sau caracteristici ale temperaturii. Testarea echipamentului se poate face fie cu scopul înlăturării unei defecțiuni apărute, fie în mod periodic, pentru a preveni apariția unei defecțiuni (*preventive maintenance*).

Termenul de "*preventive maintenance*" face referire la monitorizarea directă a unui echipament, pentru a determina timpul mediu de funcționare sau degradarea în timp a caracteristicilor sale. Procesul de monitorizare preventivă a funcționării echipamentelor, include localizarea surselor de zgomote și vibrații. Utilizarea corectă a procedurilor pe care le implică localizarea surselor de zgomot se dovedește a fi o unealtă eficientă pentru îmbunătățirea funcționalității sistemelor industriale.

Toate tipurile de echipamente și mașinării generează zgomote și vibrații specifice care definesc modul în care acestea funcționează. După cum se definește în literatura de specialitate, fiecare sistem (echipament sau parte componentă) prezintă o "amprentă" a zgomotelor proprii. Aceasta poate ajuta la identificarea unor posibile defecțiuni mecanice apărute în funcționarea sa [M12].

În literatura de specialitate se amintește un mod de diagnosticare bazat pe finețea auzului tehnicianului. Acesta "asculta" cum funcționează echipamentul după care spune care este defecțiunea. Evident, acest mod de diagnosticare este depășit, el fiind bazat strict pe experiența tehnicianului și fiind potrivit pentru localizarea problemelor de funcționare în cazul mașinilor mari și robuste.

În ultimii 20 de ani, tehnologia în acest domeniu a avansat considerabil. Diagnosticarea prin "ascultare" a fost înlocuită cu senzori de vibrații și zgomote sensibili chiar și la cele mai fine defecțiuni. Prelucrarea semnalelor generate de sursa de zgomot se face prin algoritmi specializați implementați în cadrul unor instrumente performante. Procesul de localizare include achiziționarea semnalelor și analiza acestora. Un sistem utilizat pentru identificarea surselor de zgomote și vibrații include: senzori de captare a semnalelor (tracductoare), analizor de zgomote și vibrații, software dedicat analizei zgomotelor și vibrațiilor, PC utilizat pentru stocarea și analiza datelor [S2].

Vibrațiile sunt mișcări oscilatorii ale corpurilor în jurul poziției de echilibru. Prin analiza acestor semnale în domeniul frecvențelor, se poate stabili sursa lor. Prin afișarea amplitudinii vibrațiilor în funcție de frecvențele componente ale semnalului, se poate observa când sistemul funcționează corect și când funcționează greșit. În cazul monitorizării periodice, valori ale vibrațiilor măsurate periodic sunt comparate cu valori ale vibrațiilor măsurate anterior. Dacă echipamentul funcționează în parametrii normali, vibrațiile sunt minime și constante. Anomalia în funcționarea

aparaturii este indicată de modificarea, mai mult sau mai puțin evidentă, a spectrelor de frecvențe ale semnalelor achiziționate.

Monitorizarea poate fi făcută în momentul pornirii, funcționării sau opririi echipamentului. Localizarea defecțiunilor prin intermediul analizei vibrațiilor și zgomotelor este utilizată cu precădere în cazul mașinilor care conțin elemente rotative (turbine, pompe, motoare electrice, motoare diesel sau pe benzină, cutii de viteză, compresoare). De asemenea, analiza semnalelor generate de sursele de zgomot se aplică și în domeniul localizării defecțiunilor în sistemele de transport pentru lichide sau gaze.

Beneficiile localizării surselor de zgomote și vibrații sunt numeroase. Domeniile de aplicabilitate sunt diverse. Astfel, prin intermediul localizării surselor de zgomote și vibrații se pot înlătura probleme de aplicare incorectă a procedurilor de mentenanță sau reparație. În cazul mașinilor care includ elemente rotative, peste 80% din problemele de funcționare se datorează alinierii greșite a componentelor sau a dezechilibrului existent între acestea. Astfel, identificarea acestor probleme devine extrem de importantă, fiind strâns legată de reducerea costurilor de funcționare ale echipamentelor [S2].

Analiza vibrațiilor reprezintă o unealtă pentru compararea echipamentelor provenite de la diferiți producători. La nivelul atelierelor sau fabricilor unde există multe echipamente care produc zgomote și vibrații, apare necesitatea reducerii nivelului general al zgomotelor și vibrațiilor. Astfel, echipamente mai silențioase și care produc zgomote mai reduse ca nivel, sunt de preferat.

Controlul calității funcționării liniilor de producție unde se lucrează cu diverse echipamente implică localizarea surselor de zgomot. Testele efectuate dovedesc faptul că eficiența liniei de producție este legată de aplicarea cu regularitate a procedurilor de înlăturare a defecțiunilor prin localizarea surselor de zgomote și vibrații.

Detectarea componentelor degradate (slăbite) reprezintă o altă arie de aplicabilitate a localizării surselor de zgomote și vibrații. În domeniul aviației, există analizoare specializate de zgomote și vibrații care testează calitatea motoarelor.

Există situații în care procesul de localizare al surselor de zgomote și vibrații, în vederea înlăturării defectelor de funcționare, se dovedește a fi ineficient. Această ineficiență se datorează cu precădere lipsei de susținere managerială, a planificării eronate a implementării procedurilor sau a personalului cu o pregătire mai puțin solidă în domeniu.

Localizarea surselor de zgomote și vibrații din sistemele de conducte pentru transportul lichidelor sau gazelor este un alt domeniu de larg interes pe plan mondial.

## 2.2 Localizarea fisurilor din conducte

Transportul lichidelor (apă, combustibili, deșeuri) sau gazelor pe distanțe mari, fără pierderi, este o problemă importantă. Stocarea fără pericol a diferitelor substanțe în bazine subterane este la fel de importantă. Sistemele de transport sau stocare sunt supuse la modificări ale mediului înconjurător (mișcări ale solului [C6]), coroziune, vibrații datorate traficului intens, diferenței de temperaturi între sol și lichidul din conducte, presiune excesivă sau defecțiuni de fabricație. Acești factori, dar și alții, cauzează defecțiuni ale sistemelor de transport sau stocare a lichidelor. Fisuri sau rupturi ale conductelor înseamnă, pe lângă pierderi financiare majore, și un pericol pentru mediul înconjurător și sănătatea publică. În cele ce urmează, vom

face referire la pierderile care apar în sistemele de transport pentru apă prin intermediul fisurilor din conducte.

Pierderile se manifestă cu precădere la nivelul următoarelor componente ale sistemelor de transport: conducte de transmisie, conducte de distribuție, valve, ramificații, coturi sau hidranți.

Literatura de specialitate clasifică principalele activități în ceea ce înseamnă controlul activ al pierderilor din conducte (*Active Leakage Control*), în două categorii: auditele (activități de control) și activitățile de intervenție [P4], [M19].

Auditele reprezintă monitorizarea pierderilor suferite de sistemul de distribuție. Acestea se pot desfășura la nivelul unei întregi regiuni, unui întreg oraș sau la nivelul unui cartier. Se iau în considerare cantitățile de lichide la intrarea și ieșirea sistemului. În general, raportarea eficienței sistemului se face prin comparație cu valori măsurate în trecut. Se iau în calcul și erorile introduse de aparatele utilizate la măsurarea debitelor. Tot aici pot fi stabilite și alte statistici aferente funcționării sistemului de conducte cum ar fi consumul realizat pe perioade de 24 de ore sau raportul între consumul pe timp de zi și cel pe timp de noapte. Auditele sunt importante deoarece ele permit stabilirea zonelor în care pierderile se întâmplă cel mai frecvent și cu cea mai mare intensitate.

Activitățile de intervenție reprezintă modalitatea prin care echipe specializate se ocupă de remedierea defectelor din zonele afectate.

Defecțiunile de tipul fisurilor sau scurgerilor pot fi depistate și prin alte moduri. Clienții au un rol important în semnalarea defecțiunilor vizibile. Acestea sunt cu precădere fisuri ale conductelor subterane al căror conținut ajunge în stradă. De asemenea, clienții semnalează și scaderi bruște ale presiunii alimentării cu apă, ceea ce poate indica prezența defecțiunilor.

Importanța problemelor cauzate de pierderile din sistemele de conducte subterane este evidențiată prin statistici și rapoarte emise de către agenții abilitate din întreaga lume.

U.S. Department of Transportation Office of Pipeline Safety (DOT-OPS), arată că rata de apariție a defecțiunilor din sistemele de conducte nu s-a îmbunătățit simțitor în ultimii 20 de ani. În cazul conductelor de lungimi reduse, se evidențiază cel puțin un defect (fisuri, spărturi, rupturi) în timp de 20 de ani de funcționare. În ceea ce privește conductele cu lungimi de ordinul zecilor de km, apare anual cel puțin o defecțiune.

Una din concluziile DOT-OPS sugerează că metoda de limitare a pierderilor rămâne lupta continuă de întreținere și monitorizare preventivă a sistemelor de conducte. Tot aici se evidențiază ideea de continuă cercetare și inovație la nivelul echipamentelor și algoritmilor specializați în localizarea surselor de zgomot (fisuri, spărturi, rupturi) din sistemele de transport și stocare a lichidelor [A3], [A4].

În anul 1991, International Water Supply Association (IWSA), concluziona faptul că pierderile suferite în cazul transportului apei de la stațiile de epurare până la consumatori se situează în jurul valorilor de 20% ÷ 30%. Există situații în care sistemele de transport pot suferi pierderi de până la 50% din cantitate [H6].

Asociația Germană a Apei și Gazului (Bundesverband der deutschen Gas und Wasserwirtschaft - BGW) arată, în anul 2001, că pierderile din sistemele de transport ale apei se ridică la 6% în Germania, 26% în Franța, 19% în Anglia (incluzând Țara Galilor) și 29% în Italia [B1],[W2].

Studiile companiei australiene Sydney Water arată foarte clar ținta sa. Aceasta reprezintă reducerea cu 35% a tuturor pierderilor sale până în anul 2010. Tot această companie își propune economisirea a 70 de miliarde de litri de apă anual, prin reciclare, până în anul 2015. Prin controale periodice, reparații rapide,



dar mai ales prin controlul activ al pierderilor, compania își propune îmbunătățirea calității distribuției apei către consumatori. Studiile efectuate arată că numai în anul 2001, prin accentuarea măsurilor de localizare a defectelor în rețelele sale de distribuție, compania a realizat un beneficiu de 1,6 milioane de dolari [S15].

Compania internațională de consultanță National Utility Service (având peste 70 de ani de experiență) este specializată în întocmirea unor studii la nivel mondial referitoare la costurile unor utilități precum apa sau energia, în cazul unor mari companii.

În studiul intitulat 2005-2006 International Water Report and Cost Survey, NUS arată costurile pe care le implică un consum anual de 10 000  $m^3$  apă pentru consumatori de tipul companiilor. Tabelul 2.1 arată evoluția acestor costuri. Raportul arată importanța pe care trebuie să o acordăm problemei economisirii apei. Un număr de 14 țări au fost implicate în acest studiu, iar în 12 din acestea costurile de consum pentru apă, în cazul utilizatorilor de tip companie, sunt în creștere. Prețurile sunt exprimate în *cenți*/ $m^3$  și nu conțin taxa pe valoarea adăugată. Raportul subliniază faptul că evoluția prețurilor își va păstra cursul ascendant. Astfel, măsuri pentru a reduce aceste costuri sunt evident necesare [N1].

Tabelul 2.1. Evoluția prețurilor pentru consumul de apă la nivelul marilor companii

Clasament 2006	Țara	Cost cenți/ $m^3$	Evoluție față de 2005	Evoluția 2001-2006
1	Danemarca	224.6	-4.6%	+1.9%
2	Germania	224.5	+1.6%	-2.7%
3	Anglia	190.3	+7.8%	+32.3%
4	Belgia	172.3	+1.9%	+51.1%
5	Franța	157.5	+3.5%	+11.8%
6	Olanda	149.0	+1.0%	+0.3%
7	Italia	114.7	+2.0%	+23.2%
8	Finlanda	103.3	+9.7%	+30.2%
9	Australia	100.5	+13.8%	+45.4%
10	Spania	93.0	+3.1%	+5.2%
11	Africa de Sud	91.8	+8.8%	+50.2%
12	Suedia	85.9	-2.4%	+10.7%
13	Canada	78.9	+8.9%	+58.0%
14	SUA	65.8	+4.4%	+27.0%

Compania de apă a orașului Calgary (Canada) a dezvoltat un studiu care să dovedească dacă investițiile în proiecte de tip "active leakage control" sunt profitabile. În anul 2006, Calgary Water Services a realizat studiul în 4 zone ale orașului (Lake View, Glenmore, Bowness și Spy Hill). Concluziile referitoare la pierderile cauzate de fisurile în conducte au arătat necesitatea accentuării investițiilor în ceea ce privește localizarea și repararea defecțiunilor [P4].

Pe plan local, raportul din anul 2006 al companiei Aquatim - Timișoara arată preocuparea acesteia cu înlăturarea defectelor existente în sistemele sale de conducte. Compania alimentează cu apă peste 330 000 de consumatori, având peste 610 km de conducte pentru rețeaua de apă și peste 470 km de conducte pentru rețeaua de canalizare. Este important de menționat faptul că peste 200 km de conducte din cadrul rețelei de alimentare cu apă au o vechime mai mare de 40 de ani. Astfel, compania se confruntă cu peste 30 de intervenții săptămânale pentru reparații la sistemul de conducte. La acestea se adaugă reparații de branșament sau

## 18 Stadiul actual în domeniul localizării surselor de zgomot – 2

vane. Sumele anuale cheltuite de Aquatim se axează în principal pe reabilitarea rețelei de transport apă. După cum se arată și în literatura de specialitate, infrastructura are un rol important în ceea ce privește apariția defecțiunilor care duc la pierderi [A6].

Compania internațională Seba KMT a realizat un raport în ceea ce privește cantitățile de lichid care se pierd prin intermediul fisurilor din conducte, în funcție de diametrul acestora și de presiunile din conducte. Tabelul următor arată concluziile acestui raport [S4].

Tabelul 2.2. Pierderi de apă în funcție de presiunea rețelei și diametrul fisurii

Presiune Conductă [bari]	Diametru Fisură [mm]	Litri/minut	Litri/oră	$m^3$ /zi	$m^3$ /lună	$m^3$ /an
6	2	5	300	7,2	216	2592
6	4	18,4	1104	26,5	794,88	9538,56
6	6	40	2400	57,6	1728	20736
6	8	70,2	4212	101,09	3032,64	36391,68
3	2	3,2	192	4,61	138,24	1658,88
3	4	12	720	17,28	518,4	6220,8
3	6	27	1620	38,88	1166,4	13996,8
3	8	48	2880	69,12	2073,6	24883,2
1,5	2	1,8	108	2,59	77,76	933,12
1,5	4	7	420	10,08	302,4	3628,8
1,5	6	15	900	21,6	648	7776
1,5	8	27	1620	38,88	1166,4	13996,8

Considerând datele prezentate mai sus, se poate aprecia că problema identificării defecțiunilor (fisuri, spărturi, rupturi) care apar în sistemele de conducte este de actualitate și rămâne o prioritate pentru companiile din domeniu. Nevoia de continuă cercetare și dezvoltare la nivelul instrumentelor de localizare și a algoritmilor utilizați pentru prelucrarea semnalelor provenite de la sursele de zgomote reprezintă o necesitate. Componentele principale asupra cărora trebuie să se insiste în acest domeniu în vederea reducerii efectelor pierderilor din sistemele de conducte subterane sunt: controlul periodic al defecțiunilor de tipul fisurilor, selecția atentă a materialelor utilizate pentru infrastructura instalațiilor, rapiditatea și calitatea reparațiilor și controlul presiunii din conducte.

### 2.3 Principiul localizării fisurilor prin metoda corelației

Metodele de detecție și localizare a surselor de zgomote și vibrații din cadrul sistemelor de conducte au evoluat în timp devenind tot mai precise.

Dispozitivele acustice sunt cele care domină acest domeniu. Fie că este vorba de corelatoare de zgomote și vibrații (care lucrează cu date achiziționate prin intermediul senzorilor) sau de dispozitive de ascultare, mijloacele acustice de localizare sunt extrem de răspândite. Pentru multe companii care asigură alimentarea cu apă, ele reprezintă principala metodă de desfășurare a activităților de întreținere a sistemelor de conducte subterane. Procedura de localizare a fisurilor poate include o etapă de "ascultare" a zgomotelor de fisură prin utilizarea unor echipamente care includ microfoane specializate (*aquaphones*). Acest tip de localizare depinde foarte mult de experiența utilizatorului, care prin intermediul unor

căști va aprecia poziția fisurii. Etapa următoare este "localizarea precisă", prin utilizarea unui corelator de zgomote și vibrații [H8].

Alături de metode care utilizează dispozitivele acustice, literatura de specialitate menționează diverse metode de localizare bazate pe: utilizarea gazelor și a coloranților, a monitorizării vaporilor, a radarelor terestre și a sonarelor, a monitorizării presiunii din conducte, utilizarea fibrei optice, a sistemelor tv în circuit închis sau a termografiei [G6].

Lucrarea prezentă se axează pe localizarea surselor de zgomote și vibrații din sistemele de conducte pentru transportul apei, prin utilizarea unei instrumentații care utilizează principiul corelației. Instrumentația dezvoltată în această lucrare este bazată pe controlul prin intermediul calculatorului (*PC based*) și funcționează ca un corelator de zgomote și vibrații.

Pentru a înțelege funcționarea dispozitivelor acustice se va face o scurtă prezentare a principiului de localizare acustică a fisurilor din sistemele de conducte. Fie că vom utiliza microfoane de teren sau corelatoare, localizarea acustică presupune detecția sursei care generează zgomotele. Prin diferiți algoritmi de prelucrare a semnalelor, instrumentele acustice vor indica poziția fisurii, practic vor localiza sursa de zgomot.

Curgerea lichidelor afară din conducte, prin fisuri, generează zgomote care se propagă prin lichidul din interiorul conductei, în materialul conductei și în solul care înconjoară conducta. Caracteristicile acestor zgomote depind de o mulțime de factori. Spectrul semnalelor se modifică pe măsură ce zgomotele se depărtează de sursă. Denumirea din literatura de specialitate pentru acest tip de semnale este "zgomote de fisură" sau "zgomote de scurgere" (*leak noises*) [H6], [P4].

În cazul corelatoarelor de zgomote și vibrații senzorii vin în contact cu materialul conductei. Ei vor prelua zgomotele de fisură și le vor transmite unui corelator de zgomote și vibrații. Datorită faptului ca zgomotul de fisură se propagă cu aceeași viteză către senzori, senzorul care este mai aproape de fisură va prelua mai repede semnalul. Practic, zgomotul de fisură ajunge prima dată la senzorul care este mai apropiat. Viteza de propagare depinde în primul rând de materialul din care este fabricată conducta. Dacă această viteză este cunoscută, fie se găsește în literatură sau este determinată pe cale experimentală, diferența între timpii în care zgomotul de fisură ajunge la cei doi senzori va fi cea care va indica poziția fisurii. Echipamentele moderne de detecție includ amplificatoare și filtre, astfel încât să poată scoate în evidență zgomotul generat de fisură, micșorând efectele interferențelor parazite.

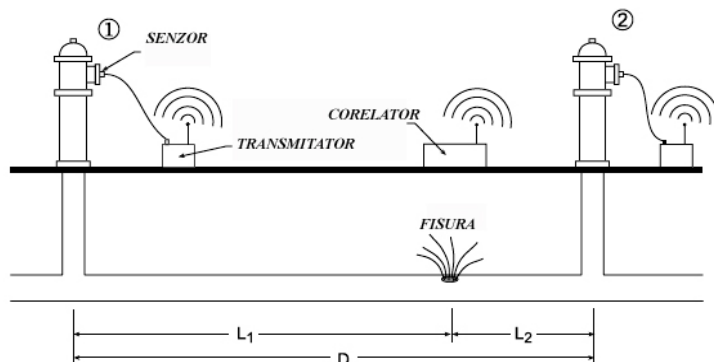


Fig.2.1. Principiul localizării sursei de zgomot prin corelație

Principiul de funcționare al corelatorului este prezentat în Fig.2.1. Transmiterea semnalelor preluate de senzori către corelator se face prin unde radio. Explicațiile matematice sunt prezentate ca principiu. Procesul de localizare exactă a sursei zgomotului de fisură implică prelucrări suplimentare care vor fi prezentate în capitolele următoare [H6].

Introducem notațiile:

$t_1$  - timpul în care zgomotul de fisură ajunge la senzorul 1.

$t_2$  - timpul în care zgomotul de fisură ajunge la senzorul 2.

$V$  - viteza zgomotului de fisură prin materialul conductei.

$D$  - distanța între cei doi senzori (cunoscută după amplasarea acestora).

$L_1$  - distanța de la fisură la senzorul 1 (necunoscută inițial).

$L_2$  - distanța de la fisură la senzorul 2 (necunoscută inițial).

Timpul în care zgomotul de fisură ajunge la senzori se calculează astfel:

$$t_1 = \frac{L_1}{V} \quad (2.1)$$

$$t_2 = \frac{L_2}{V} \quad (2.2)$$

Relația dintre cele două distanțe parcurse de zgomot către senzori este:

$$L_2 = D - L_1 \quad (2.3)$$

Diferența între acești timpi de propagare este:

$$\Delta T = t_2 - t_1 = \frac{(L_2 - L_1)}{V} = \frac{(D - 2 \cdot L_1)}{V} \quad (2.4)$$

Putem determina distanța de la fisură la senzorul 1:

$$L_1 = \frac{(D - V \cdot \Delta T)}{2} \quad (2.5)$$

După determinarea distanței  $L_1$ , prin utilizarea relației (2.3) putem determina distanța  $L_2$ .

La baza funcționării algoritmilor de prelucrare a semnalelor de fisură stă principiul intercorelației. Principiul face referire la relația care există între un semnal și o versiune întârziată a acestuia. Funcția de intercorelație, prin intermediul valorii sale maxime, este aceea care ne va permite determinarea acestei diferențe a timpilor de propagare. Dacă vom considera semnalele  $x(t)$  și  $y(t)$  ca fiind cele care se propagă de la fisură către cei doi senzori, acestea fiind staționare și având valorile medii nule, putem defini funcția de intercorelație estimată (FIC) pe intervalul de timp  $T$  variabil [B6], [B7].

$$\hat{R}_{xy}(\tau) = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad 0 \leq \tau < T \quad (2.6)$$

În cazul în care dorim să calculăm funcțiile de autocorelație estimate (FAC) pentru semnalele de mai sus, vom introduce formulele următoare. Calculul FAC poate fi utilizat pentru a determina dacă semnalele studiate prezintă sau nu componente periodice.

$$\hat{R}_{xx}(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} x(t) \cdot x(t+\tau) dt \quad 0 \leq \tau < T \quad (2.7)$$

$$\hat{R}_{yy}(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} y(t) \cdot y(t+\tau) dt \quad 0 \leq \tau < T \quad (2.8)$$

În cazul calculului FIC, vom considera diferența de timp (întârzierea)  $\tau$  pozitivă. Valoarea maximă a FIC, deplasamentul acesteia față de origine și calitatea cu care această valoare maximă se evidențiază (calitatea reprezentării funcției) sunt parametrii care indică întârzierea unui semnal față de altul. Maximul FIC poate fi plasat la stânga sau la dreapta față de valoarea centrală a funcției. Acest deplasament al maximului FIC este cel care ne va indica dacă semnalul  $x(t)$  este întârziat față de semnalul  $y(t)$ , sau dacă situația este inversă.

Dacă dorim să considerăm intervalul de integrare  $T$  constant, FIC poate fi definită astfel:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot y(t+\tau) dt \quad 0 \leq \tau < T \quad (2.9)$$

Dacă media tuturor măsurărilor (estimărilor) posibile este egală cu valoarea calculată a funcției de intercorelație se spune că estimatorul este "nedeplasat" (unbiased) și este independent de intervalul de timp  $T$ .

$$E[\hat{R}_{xy}(\tau)] = \frac{1}{T} \int_0^T E[x(t) \cdot y(t+\tau)] dt = \frac{1}{T} \int_0^T R_{xy}(\tau) dt = R_{xy}(\tau) \quad (2.10)$$

Coeficientul de corelație între semnalele  $x(t)$  și  $y(t)$  arată gradul de asemănare între cele două semnale.

$$\rho_{xy}^2(\tau) = \frac{\hat{R}_{xy}^2(\tau)}{\hat{R}_{xx}(0) \cdot \hat{R}_{yy}(0)} \quad 0 \leq \rho_{xy}^2(\tau) \leq 1 \quad (2.11)$$

Calculul FIC implică și apariția unei erori standard de estimare. Această eroare apare între valoarea medie a tuturor măsurărilor posibile  $\hat{R}_{xy}(\tau)$  și funcția de intercorelație calculată  $R_{xy}(\tau)$ .

$$\varepsilon = \frac{std(\hat{R}_{xy}(\tau))}{R_{xy}(\tau)} \approx \frac{1}{\sqrt{2 \cdot B \cdot T}} \left[ 1 + \frac{R_x(0) \cdot R_y(0)}{2 R_{xy}(\tau)} \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

Abaterea standard a mediei măsurărilor posibile este reprezentată prin  $std$ ,  $B$  reprezintă lățimea de bandă a semnalelor măsurată în Hz. Prin calculul din relația (2.12) putem determina lungimea minimă a semnalelor  $x(t)$  și  $y(t)$  (parametrul  $T$ ) măsurată în secunde. Relațiile (2.12) și (2.13) sunt folosite în cazul în care dorim

să determinăm care este perioada de timp  $T$  pentru care trebuie să efectuăm calculul FIC și pentru care eroarea de estimare este minimă.

$$T_r = \frac{1}{2 \cdot B \cdot \varepsilon^2} \left[ 1 + \frac{R_x(0) \cdot R_y(0)}{R_{xy}(\tau)} \right] \quad (2.13)$$

Pentru a defini cât mai eficient fenomenul de propagare al semnalelor generate de fisură considerăm definirea relațiilor pentru calculul corelației în timp discret.

Dacă  $x(n)$  și  $y(n)$  sunt două semnale achiziționate prin intermediul unei plăci de achiziție și a unor senzori, iar lungimea lor este  $N > 1$  eşantioane, după calculul FIC, va rezulta un șir de valori ale funcției de intercorelație calculate de lungime  $2 \cdot N - 1$ . În cazul unor semnale de lungime foarte mare, este posibil să nu avem nevoie (sau să nu dorim) de calculul FIC pe toată lungimea celor două semnale. Suntem interesați să evidențiem în calculul nostru doar zona care cuprinde maximum FIC.

Dacă  $m$  reprezintă numărul eşantioanelor FIC care cuprind și valoarea maximă a funcției, reprezentarea acestei funcții se va face în intervalul  $[-m, m]$ . Lungimea FIC calculată va fi în acest caz  $2m + 1$ . Considerăm  $h$  ca fiind perioada de eşantionare a celor două semnale. Putem defini FIC "unbiased" sau "nedepasată" între cele două semnale astfel.

$$\hat{R}_{xy}(rh) = \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} x(n) \cdot y(n+r) \quad r = 1, 2, \dots, m \quad (2.14)$$

În cazul în care lungimea semnalelor este mult mai mare decât  $m$ , pentru simplificarea calculului se poate utiliza varianta de calcul "biased" sau "deplasată".

$$\hat{R}_{xy}(rh) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-r} x(n) \cdot y(n+r) \quad r = 1, 2, \dots, m \quad (2.15)$$

În relațiile de calcul (2.14) și (2.15) se observă medierea estimării prin împărțirea la  $N - r$  și respectiv  $N$ . Dacă nu am face aceste medieri obținem estimarea FIC "nenormalizată". Deosebirea dintre FIC "deplasată" și "nenormalizată" este una de scalare grafică.

Coeficientul de corelație descris anterior poate fi obținut astfel.

$$\rho_{xy}(rh) = \frac{\hat{R}_{xy}(rh)}{\sqrt{\hat{R}_{xx}(0)} \cdot \sqrt{\hat{R}_{yy}(0)}} \quad -1 \leq \rho_{xy}(rh) \leq 1 \quad (2.16)$$

Valorile acestui coeficient de corelație se întind în intervalul  $[-1, 1]$ . Dacă valoarea coeficientului este 0, semnalele  $x(n)$  și  $y(n)$  nu sunt corelate. Dacă valoarea coeficientului este negativă sau pozitivă, putem considera corelația între cele două semnale ca fiind pozitivă sau negativă. Corelația pozitivă indică o dependență direct proporțională între valorile semnalelor. Corelația negativă indică o dependență invers proporțională între valorile celor două semnale.

În Fig.2.2 se prezintă câte 16384 de eşantioane din semnale achiziționate pentru un debit la fisură de 8,27 l/min. Alte detalii despre modul în care s-a făcut

achiziția sau despre instalația cu care s-a lucrat nu sunt introduse acum. Important este faptul că senzorii care au achiziționat semnalele sunt plasați astfel încât să încadreze fisura (în cazul real nu cunoaștem poziția fisurii). Unul din senzori este plasat mai aproape de fisură, astfel încât să apară un deplasament al maximului FIC.

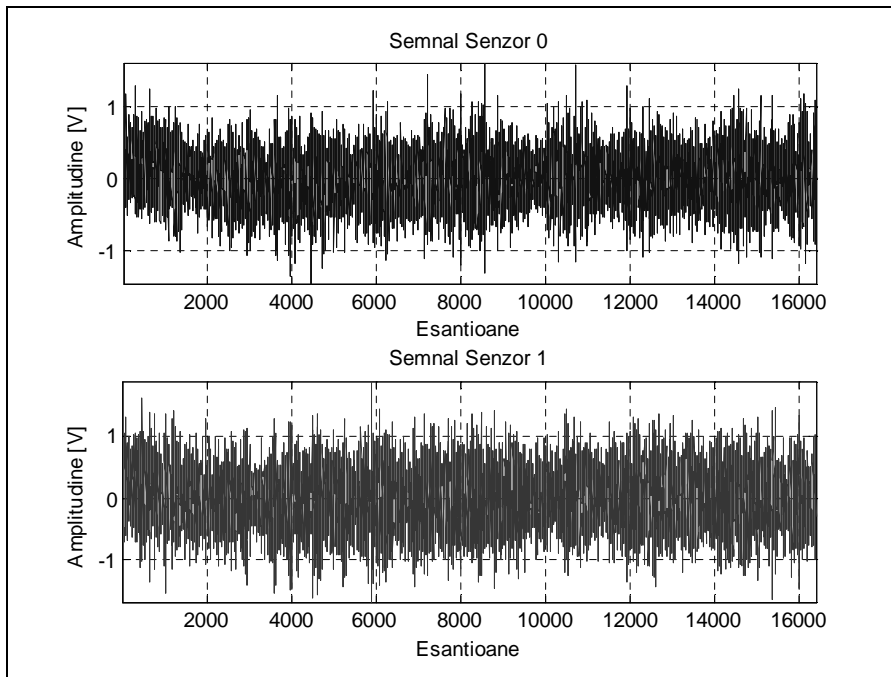


Fig 2.2. Semnale măsurate generate de o fisură la debitul de 8,27 l/min

Funcția de intercorelație "nenormalizată" calculată pentru cele două semnale este reprezentată în Fig.2.3. Ea a fost calculată pentru  $m = 500$ , astfel reprezentarea deplasamentului se face în intervalul  $[-500, 500]$ , centrat în 0.

Vom considera: *Deplasament = Indice al maximului FIC - m + 1* modul de calcul al deplasamentului FIC. Acest mod rămâne același pe întreg parcursul lucrării.

În Fig.2.4 se prezintă intervalul de eșantioane  $[-50, 50]$  al FIC calculate. Se observă deplasarea la dreapta a valorii maxime față de punctul central al FIC (valoarea 0).

Deplasamentul valorii maxime a FIC este de interes. Pentru a vedea ce înseamnă acest deplasament în domeniul timp, trebuie luată în considerare frecvența de eșantionare a semnalelor. În acest caz  $F_s = 15kHz$ . Perioada de eșantionare este  $T_E = 1/F_s$  ceea ce indică rezoluția între 2 valori ale FIC. Perioada de eșantionare este  $T_E = 66\mu s$ , astfel dacă am calculat FIC pentru  $m = 500$ , acoperim un interval de timp  $T = T_E \cdot m = 33ms$ . Un deplasament de 15 eșantioane

(la dreapta sau la stânga față de 0) înseamnă o diferență a timpilor de propagare  $\Delta T = T_E \cdot 15 = 1ms$ .

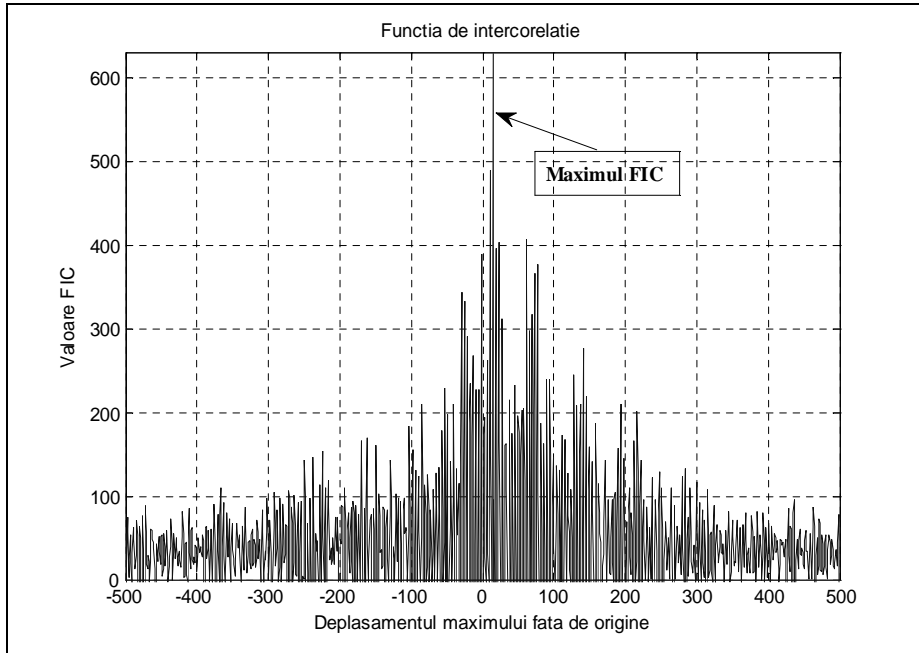


Fig.2.3. FIC "nenormalizată" calculată pentru semnalele de la cei doi senzori.

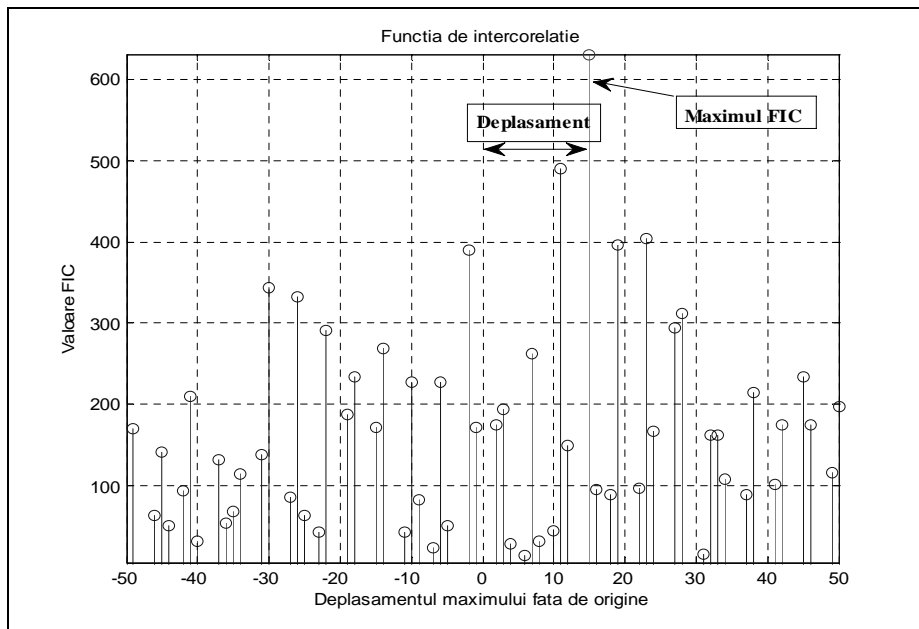


Fig.2.4. Evidențierea deplasamentului de 15 eşantioane la dreapta al FIC



## 2.4 Factorii care influențează procesul de localizare

Fenomenul propagării zgomotelor trebuie înțeles datorită faptului că el influențează în mod direct acuratețea de localizare a sursei. Atenuarea zgomotului este proporțională cu creșterea distanței pe care el o parcurge. Viteza de propagare și atenuarea undelor trebuie cunoscute pentru ca procedura de localizare să aibă succes. Este importantă evoluția fenomenului de propagare în funcție de factori precum materialul conductei sau natura solului care înconjoară conducta. Zgomotele de fisură sunt afectate, mai mult sau mai puțin, de alte surse de zgomot cum ar fi traficul, zgomotul de fond din natură sau imprecizia senzorilor [G8].

Factorii care produc un zgomot de fisură bine definit sunt: presiunea ridicată a lichidului din interiorul conductei, diametrul redus al fisurii, diametrul redus al conductelor și materialul metalic al conductelor. Viteza de propagare a zgomotelor este influențată de factori precum: natura materialului conductei (de exemplu pentru conducte metalice viteza de propagare crește), diametrul conductei (creșterea diametrului conductei reduce viteza de propagare), vârsta conductei și reparațiile suferite de aceasta (utilizarea materialelor diferite pentru reparații) [G9].

În cazul în care viteza de propagare a zgomotelor prin materialul conductei nu este cunoscută cu acuratețe există posibilitatea determinării acesteia pe cale experimentală. O metodă eficientă, dar nu singura, de determinare este intercorelația. Se măsoară diferența timpilor de propagare pentru semnale induse în mod voit în materialul conductei, de la o locație anterior cunoscută. Deschiderea și apoi închiderea unei valve generează semnale care se propagă în conductă de la o locație bine definită. Astfel, senzori de zgomote și vibrații plasați la distanțe cunoscute față de valvă, vor prelua semnalele generate. Diferența timpilor de propagare între cele două semnale se poate utiliza pentru determinarea vitezei de propagare în materialul conductei.

În cazul conductelor metalice, datele referitoare la propagarea semnalelor generate de sursă se zgomot în materialul conductei sunt de obicei cunoscute. Probleme apar în cazul conductelor din materiale plastice. În cazul acestora, atenuarea zgomotelor de la sursă este în stransă legătură cu materialul conductei, lichidul din interiorul conductei dar și mediul înconjurător. În cazul conductelor din materiale plastice frecvențele zgomotelor de fisură sunt sub 200 Hz [H8].

Experimente efectuate în cazul conductelor din materiale plastice arată că utilizarea accelerometrelor pentru localizarea fisurilor nu este foarte eficientă. Dacă se consideră o bandă de frecvențe de până în 50 Hz, zgomotul de fond nu se deosebește de zgomotul generat de fisură. În banda 50 Hz ÷ 150 Hz, zgomotul de fisură se poate deosebi de zgomotul indus de mediul înconjurător. Creșterea presiunii din conductă poate duce la localizarea corectă a fisurii. Dacă diametrul fisurii se păstrează constant, o creștere a presiunii din conductă determină o scurgere mai puternică a lichidului prin fisură. Astfel, semnalele vor avea un conținut de frecvențe mai ridicat.

O importanță ridicată o are distanța parcursă de zgomotul de fisură prin materiale plastice. În cazul în care măsurările se fac în sezonul rece, rata de atenuare a zgomotelor de fisură poate fi considerată 0,33 dB/m. Pentru măsurări efectuate în sezonul cald, atenuarea este de 0,25 dB/m. Desigur aceste valori sunt orientative și ele au fost determinate pe cale experimentală pentru o conductă din PVC cu diametrul interior de 150 mm și cu o lungime de aproximativ 200 m. Conducta era îngropată la 2,4 m adâncime. Ceea ce este important de subliniat aici este influența exercitată de temperatură asupra măsurărilor [H8].

## **2.5 Instrumentație virtuală: definire și prezență în domeniul localizării**

În contextul actual există o nevoie crescândă pentru instrumente accesibile ca preț și capabile de a efectua teste și analize performante. Ritmul inovațiilor și așteptările clienților obligă producătorii de instrumente dedicate localizării surselor de zgomot (fisurilor în sistemele de transport pentru lichide) să cerceteze în permanență fenomenul. De aici apare și obligativitatea acestora de a introduce pe piață o mulțime de modele de instrumente care satisfac a gamă largă de cerințe.

Pe piața produselor din domeniul localizării defecțiunilor în sistemele care transportă lichide, se remarcă tendința de a integra o funcționalitate cât mai mare în cadrul unui produs de dimensiuni fizice cât mai reduse.

Instrumente noi au fost introduse cu scopul simplificării design-ului, implementării și utilizării algoritmilor de prelucrare a datelor achiziționate. Tendința este aceea de a oferi utilizatorului o interfață vizuală cât mai atractivă și intuitivă. Se pot remarca instrumente care au o funcționalitate îmbunătățită, lucrează cu un volum mai mare de date într-un timp cât mai scurt și au dimensiuni fizice reduse. La toate acestea se adaugă și faptul că produsul trebuie să poată fi utilizat de persoane care nu au neaparat o pregătire tehnică de specialitate.

Un alt aspect important este utilizarea instrumentelor la distanță. Astfel, datele prelucrate, dar și rezultatele obținute pot fi transmise la distanță prin intermediul Internet-ului. Există categorii de produse care oferă utilizatorului și această posibilitate [T10].

Trebuie menționat faptul că există o gamă mult mai largă de produse care pot fi utilizate în acest scop. Fiecare firmă de specialitate oferă zeci de produse, hardware sau software, care se pot utiliza în acest domeniu.

La toate acestea se adaugă cursuri teoretice pentru familiarizarea cu domeniul localizării surselor de zgomot. Cursurile se completează prin practică. În cadrul unor poligoane cu instalații de transport pentru lichide, cei care participă la cursuri pot învăța cum să utilizeze un anumit tip de instrumentație.

De asemenea, este important să amintim că există o multitudine de documente (articole, manuale, prezentări Powerpoint, fișiere video) care prezintă diferite metode de prelucrare a datelor achiziționate de la sursele de zgomot. Implementarea acestor algoritmi în aplicații software sporesc gama de produse utilizate în localizarea surselor de zgomot.

O preocupare de actualitate în domeniul localizării surselor de zgomot, și nu numai, este instrumentația virtuală. În continuare se prezintă o scurtă evoluție a termenului de instrumentație virtuală.

Un instrument virtual reprezintă un ansamblu software-hardware care are rolul de a înlocui un produs dedicat. Instrumentele virtuale reprezintă un salt fundamental de la instrumentele hardware-oriented către sisteme bazate pe software, care exploatează puterea de calcul și productivitatea PC-urilor.

Prin termenul de instrumentație virtuală se înțelege un program software care implementează un sistem de măsurare și testare computerizată. Presupune controlul prin intermediul PC-ului, a unui instrument hardware care efectuează anumite măsurări sau achiziții de date. Un calculator împreună cu un program software flexibil și tehnologie hardware modulară oferă soluții puternice și performante pentru sistemele de testare.

Termenul de instrumentație virtuală se extinde și la sisteme computerizate. Acestea controlează anumite procese pe baza unor date colectate și analizate. Un astfel de instrument poate implica și prezența unor elemente adiționale (senzori care convertesc un parametru fizic, gen temperatură, în semnale electrice). Utilizarea instrumentației virtuale presupune și un program software care analizează date colectate prin intermediul unui dispozitiv hardware și afișează rezultatele analizei efectuate. În această categorie intră osciloscopurile, multimetrele digitale sau instrumentele de analiză spectrală.

Ideea de instrument virtual înglobează trei aspecte esențiale:

- Unelte software intuitive, pentru dezvoltarea aplicațiilor.
- Module I/O rapide, eficiente, bazate pe tehnologii comerciale.
- O platformă PC pentru sincronizare, acuratețe și performanțe.

Instrumentele virtuale au avut o evoluție spectaculoasă. În ultimul deceniu se remarcă salturi semnificative în ceea ce privește controlul instrumentului prin intermediul calculatorului, dar și în ceea ce privește flexibilitatea aplicațiilor oferite de instrument. PC-ul devine elementul principal de lucru cu un sistem de instrumentație virtuală. Operațiile efectuate de partea hardware sunt controlate de către calculator, datele colectate și rezultatele analizelor efectuate sunt afișate pe ecranul PC-ului. Soluția este utilă și ușor de utilizat, monitorul PC-ului va afișa instrumentele cu care se lucrează. Panoul tradițional al instrumentului stand-alone este înlocuit de monitorul PC-ului. Folosind conceptul de instrumentație virtuală și performanțele crescânde ale PC-urilor putem defini sau crea soluții de testare și analiză care îndeplinesc toate așteptările noastre.

Partea de software pentru instrumentele virtuale se poate realiza, în mod textual, prin utilizarea unor programe specifice precum C sau Basic. Până în anii '90, scrierea acestor programe revenea strict de programatorilor cu o vastă experiență în domeniu.

Pe lângă acest tip de programare există și varianta programării prin utilizarea elementelor grafice fiind denumită programare grafică [O1]. Există programe dedicate, care fac uz de grafică, în scopul programării eficiente în domeniul instrumentelor virtuale. Acestea sunt medii de programare grafică, care oferă diferite instrumente, unelte, meniuri și alte facilități pentru realizarea aplicațiilor dorite. Programarea în cadrul acestor medii se bazează pe conceptul de *data flow*. Utilizatorul va plasa componentele sistemului virtual după care acestea vor fi interconectate. În cadrul unei astfel de aplicații, modul de funcționare al componentelor sistemului, precum și relațiile dintre acestea trebuie cunoscute de utilizator.

Câteva dintre mediile de programare grafică mai populare sunt:

- LabVIEW ( Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), un mediu de înaltă performanță pentru implementarea sistemelor de achiziție și instrumentație. Sistemele dorite se construiesc pe baza diagramelor bloc. Mediul oferă o puternică legătură cu elemente hardware de măsurare, modul de analiză și prezentare a datelor este eficient.
- AgilentVEE ( Visual Engineering Environment), permite programarea grafică pentru domeniul instrumentelor virtuale. Este extrem de eficient la partea de interfațare. Permite achiziționarea datelor, analiza acestora și afișarea rezultatelor fără constrângerile programării textuale referitoare la tipul de date.
- MATLAB – Simulink, mediul care este probabil cel mai utilizat, permite achiziționarea, analiza, vizualizarea și modelarea informațiilor. Oferă facilități de interfațare cu instrumentele externe, statistică, posibilitatea programării grafice prin toolbox-uri specifice precum și multe altele.

Combinăția între performanțele PC-urilor actuale, mediile de programare vizuală și hardware-ul modular, a dus la o explozie în domeniul instrumentelor virtuale. Instrumentele virtuale acoperă o largă gamă de produse, începând cu panouri grafice pentru diferite funcții, până la sisteme complete de testare și analiză a datelor. Evoluția în acest domeniu se concentrează pe integrarea sistemelor virtuale în cadrul unor aplicații cât mai complexe, care să poată fi utilizate la distanță prin intermediul rețelelor de comunicații. Performanțele instrumentelor virtuale se axează în principal pe partea de software.

În concluzie, putem enumera câteva trăsături, care pot fi considerate avantaje, ale instrumentelor virtuale, comparativ cu cele fixe (stand-alone):

- Flexibilitate și adaptabilitate ( pot fi ușor adaptate și modificate în funcție de necesități).
- Costuri scăzute de producție comparativ cu controlerele dedicate.
- Existența unei game variate de instrumente virtuale, în funcție de compatibilitatea cu PC-ul și performanțele oferite.
- Abilitatea de a interfața cu o serie largă de magistrale de comunicare, precum și existența unor protocoale de comunicare standardizate.
- Suport oferit pentru comunicarea la distanță, integrarea în sisteme distribuite.

Dintre domeniile de utilizare ale instrumentelor virtuale amintim: achiziții și analiză de date, testarea calității produselor, monitorizarea și procesarea semnalelor, alarme și sisteme de securitate, automatizare și control industrial, învățământ sau medicină [T9], [F4].

În ceea ce privește domeniul localizării fisurilor din conductele pentru transportul lichidelor, corelatoarele pentru zgomote și vibrații au apărut la finalul anilor 1970. Evoluția acestor instrumente a fost spectaculoasă. Dacă primele corelatoare erau de mari dimensiuni (fiind gazduite numai în interiorul unor autovehicule) și necesitau cabluri pentru conexiunea cu senzorii, în prezent aplicații de corelație sunt implementate în dispozitive de tip Palm PDA, conexiunea cu senzorii fiind de tip *wireless*. Timpul de localizare a sursei de zgomot s-a redus de la câteva ore la câteva minute.

Dacă facem referire la instrumentația virtuală din acest domeniu, trebuie menționat faptul că partea de software constă într-un pachet de programe instalate pe un calculator de tip notebook, iar partea de hardware înseamnă senzori care transmit prin unde radio semnalele și o parte de achiziție conectată prin portul USB la calculatorul gazdă.

Prelucrările semnalelor achiziționate de senzori se fac prin intermediul programelor instalate pe calculatorul de tip notebook. Procedurile de amplificare și filtrare a semnalelor se fac direct prin intermediul senzorilor. Aceștia au incluse amplificatoare și filtre interne.

O idee pe care se insistă este aceea de automatizare a aplicațiilor care rulează pe PC-ul gazdă. Interacțiunea din partea utilizatorului trebuie să fie minimă.

De asemenea, un alt factor important este reprezentat de posibilitatea utilizării corelatoarelor controlate de PC de la distanță, de exemplu prin intermediul Internet-ului. Această utilizare este posibilă și atractivă din punct de vedere al ușurinței cu care ea se desfășoară. Prezentarea rezultatelor testării sistemelor de conducte poate fi făcută on-line.

Utilizarea instrumentației virtuale pentru localizarea surselor de zgomot prin intermediul corelației este o preocupare de actualitate. În permanență se încearcă

dezvoltarea unor aplicații cât mai performante care utilizează puterea de calcul a PC-ului pentru implementarea algoritmilor de calcul.

Compania Thames Water urmărește reducerea cu 25% a pierderilor din sistemele sale de distribuție prin utilizarea unui corelator implementat cu ajutorul programului Matlab [M4].

Alte companii importante în acest domeniu precum Seba Dynatronic sau Gutermann, urmăresc transferul tehnologiei implementate în corelatoare stand-alone, către o instrumentație virtuală.

## 2.6 Concluzii

O metodă eficientă utilizată pentru localizarea unei surse de zgomot, presupune achiziționarea unor semnale specifice acestuia. Semnalele achiziționate vor fi analizate prin metode de prelucrare statistică. Dacă facem referire la analizarea unor semnale provenite de la o fisură existentă într-o conductă prin care curge un lichid (apă), rezultatele obținute prin prelucrare ne pot oferi informații referitoare la poziția fisurii sau dimensiunile acesteia.

Aceste semnale sunt achiziționate de senzori de zgomote și vibrații și transmise unei instrumentații dedicate pentru prelucrare. La baza localizării surselor de zgomot (fisurile, spărturile din conducte) stă principiul determinării diferenței timpilor de propagare (*time delay estimation* - TDE, *time difference of arrival* - TDOA). Calculul funcției de intercorelație (FIC) este o metodă eficientă de a estima diferența timpilor de propagare. FIC prezintă o valoare maximă care prezintă interes. În funcție de care semnal ajunge mai repede la senzor, diferența timpilor de propagare poate să fie pozitivă sau negativă. Astfel și valoarea maximă a FIC va fi deplasată la stânga sau la dreapta față de centrul funcției. Două elemente prezintă importanță în momentul analizării FIC: valoarea deplasamentului valorii maxime față de punctul central al funcției (exprimată în eşantioane) și calitatea reprezentării funcției.

Literatura de specialitate precizează faptul că acuratețea echipamentelor acustice de preluare a semnalelor (senzori, plăci de achiziție), precum și cele de analiză a informațiilor (corelatoare, programe software dedicate) joacă un rol important în ceea ce privește calitatea măsurărilor efectuate.

Pe plan național, companiile românești de distribuție a apei se limitează doar la a utiliza produsele achiziționate, cercetarea în această direcție sau preocuparea pentru dezvoltarea unei aparaturi dedicate fiind deficitară, aproape inexistentă în comparație cu importanța acordată acestui domeniu în țările puternic dezvoltate.

Un alt aspect care merită să fie luat în seamă îl reprezintă prețul acestor echipamente. Chiar și cele mai simple echipamente de detecție ajung la prețuri de mii de euro.

Pe plan internațional lucrurile stau cu totul altfel. Domeniul localizării fisurilor în sistemele de conducte este supus unei permanente dezvoltări. Companii private (EFA Technologies, MKS, EPA) dar și institute de cercetare (Echologics Engineering Canada, AWWA Research Foundation, Institute for Research in Construction Canada) se preocupă în mod constant de producerea unor aparate dedicate acestui domeniu. Pe plan european tendința este similară. Țări precum Germania, Austria sau Anglia au numeroase companii (Nolek, Pipeflow Software, Pfeiffer, Seba KMT) care se ocupa cu cercetarea și producerea unor echipamente

moderne de detecție. Din punct de vedere bibliografic există o multitudine de documente aferente acestui domeniu.

Ultima decadă a însemnat un salt tehnologic important la nivelul aparaturii și algoritmilor utilizați de către companiile specializate. Literatura de specialitate menționează faptul că uneori concluziile și rezultatele obținute pe cale experimentală pot fi considerate învechite după o perioadă de 12 luni.

Factorii care influențează acest proces tehnologic sunt: reducerea costurilor tehnologiei, îmbunătățirea tehnicilor de localizare, schimbările materialelor infrastructurii sistemelor de conducte și presiunea pieței. Toți acești factori obligă producătorii de instrumentație dedicată localizării surselor de zgomot să accelereze ritmul inovațiilor și să introducă în permanență produse cu o eroare de localizare cât mai redusă.

Corelatoarele au avansat semnificativ din punct de vedere tehnologic în ultimii 5 ani. Acum includ sisteme multi-corelație, accelerometre wireless sau unități de calcul PDA. Sistemele GPS sunt incluse în unele corelatoare moderne. Astfel, aceste corelatoare se conectează la o hartă electronică a rețelei de conducte (în cazul în care aceasta există). Prin specificarea poziționării senzorilor pe harta respectivă, sunt introduse automat în calcul distanțele între senzori și detalii despre materialul de fabricație al conductelor. Avantajele oferite de acest sistem se manifestă cu precădere în reducerea timpului de calcul pentru localizarea fisurilor.

Localizarea fisurilor din conductele construite pe baza materialelor plastice a fost și rămâne o problema mai delicată [H8]. Acest fapt se datorează slabei propagări a zgomotelor de fisură prin acest tip de material. Soluția de actualitate presupune localizarea fisurilor prin intermediul sunetelor care se propagă prin lichidul din conductă, cu ajutorul hidrofoanelor conectate la hidranți [G1].

Alte avantaje oferite de tehnologia existentă în prezent se referă la ușurința de operare a instrumentelor, la filtrarea parametrică automată, la calibrarea automată, la caracterul compact al sistemului de localizare, la serviciile de update oferite gratuit de către producători sau la acuratețea senzorilor care preiau zgomotele de fisură.

Ideea care trebuie să stea la baza conceperii unui aparat pentru localizarea fisurilor este aceea că implementarea algoritmilor trebuie să se poată face în cea mai mare parte în mod automat, cu o intervenție minimă din partea utilizatorului. Se are în vedere faptul că algoritmi și metodele care stau la baza acestora au o complexitate ridicată iar aparatura trebuie să permită o utilizare eficientă chiar de personal cu calificare modestă.

## **3. PRODUCEREA, PROPAGAREA ȘI CARACTERIZAREA SEMNALELOR PROVENITE DE LA SURSA DE ZGOMOT. STUDIU DE CAZ**

### **3.1 Prezentarea instalației experimentale și a semnalelor achiziționate**

Aranjamentul experimental include o conductă de apă care generează, prin intermediul unei fisuri simulate, o serie de zgomote de fisură specifice. Scopul experimentului este de a analiza semnalele generate de fisura conductei. În urma analizei acestor semnale se va localiza sursa de zgomot cu o acuratețe suficientă. Figura 3.1 prezintă detaliile tehnice ale instalației care a fost utilizată pentru efectuarea măsurărilor.

Conducta metalică are diametrul interior de 2,5 cm, iar grosimea materialului este de aproximativ 3 mm. Având o lungime totală de 9,83 m, conducta a fost obturată la un capăt. Motivul a fost acela de a crea în conductă o presiune suficient de mare astfel încât fisura să poată fi simulată cu succes la diferite debite de curgere. Rețeaua de apă pentru alimentarea conductei nu a generat o presiune atât de mare încât experimentele să se facă pe o țeavă neobturată. Conducta obturată introduce problema nestaționarității semnalelor achiziționate. Astfel, lucrarea prezintă acoperă și caracterizarea semnalelor din punct de vedere al staționarității. În literatura de specialitate se tratează, cu precădere, cazul localizării sursei de zgomot (fisura) pentru conducte neobturate. Necesitatea analizării cazului unei conducte obturate vine din faptul că o practică întâlnită este aceea de a izola anumite porțiuni din sistemul de transport. Procedura poartă denumirea de "testare pas cu pas" (*step testing*). După izolarea acestor porțiuni din cadrul rețelei, localizarea fisurilor se desfășoară strict în zona respectivă. Astfel, se evită deranjul pentru un număr mare de consumatori. De obicei, acest procedeu de testare se aplică pe timpul nopții deoarece consumul de apă este mai redus [P3].

Deși conducta este realizată din bucăți distincte conectate între ele, se va ignora faptul că aceste conexiuni introduc zgomote suplimentare. Prin prelucrările efectuate se vor înlătura efectele nedorite introduse de conectori.

În modelul experimental, senzorii au fost plasați pe o porțiune dreaptă de conductă pentru a se evita perturbațiile introduse de curgerea apei la coturi. Sursa de zgomot principală este simulată prin intermediul unui robinet. Astfel debitul de curgere al apei prin fisură poate fi reglat.

Alimentarea conductei s-a realizat prin intermediul unui hidrofor conectat la unul dintre capete. În cazul debitelor de curgere mici, presiunea din conductă fluctuează ușor în jurul valorii de 2,5 bari. Această valoare a presiunii este specifică sistemelor de conducte din localități. În cazul în care debitul de curgere prin fisură este ridicat, presiunea din conductă este supusă unei scăderi până la valoarea de 1,9 bari. În acest moment, hidroforul va relua alimentarea cu apă a instalației, iar presiunea din conductă se va ridica până la valoarea de 2,7 bari. Aceste fluctuații ale presiunii din conductă se pot observa foarte clar în semnalele achiziționate pentru debite mari.

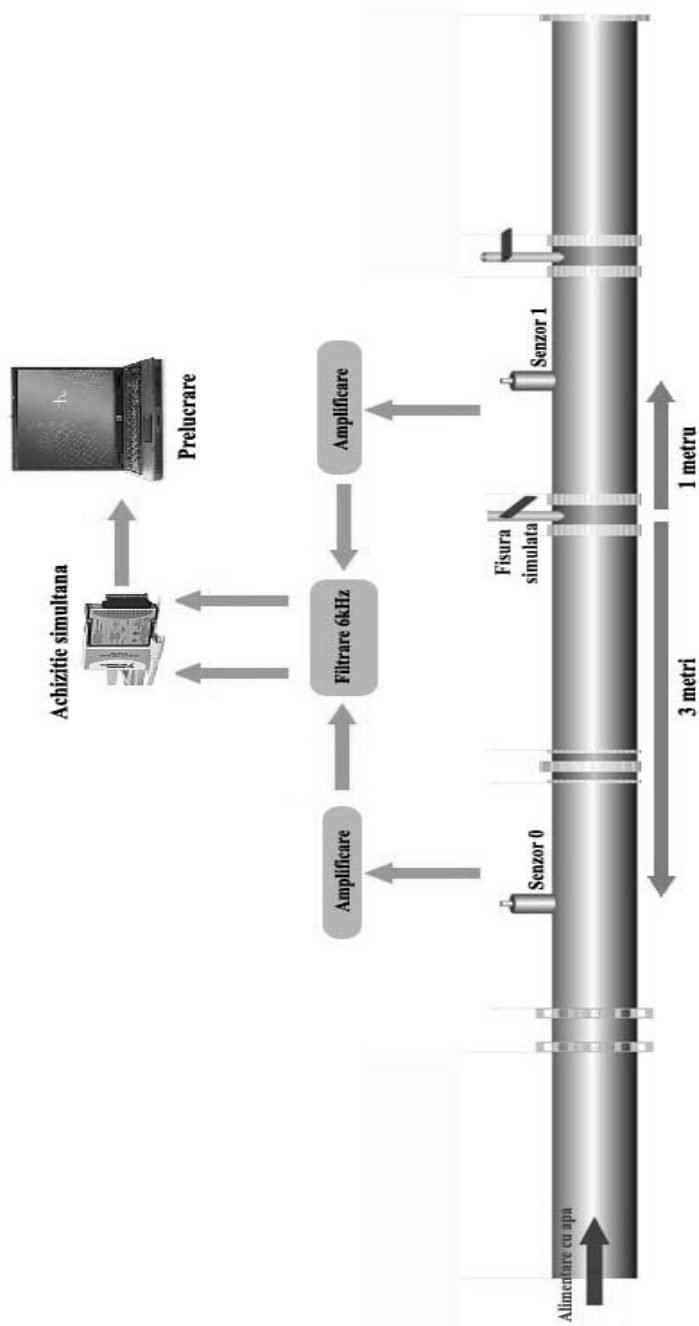


Fig.3.1. Instalația experimentală utilizată



Semnalele acustice generate de fisura simulată, în momentul în care apa trece cu presiune prin ea, sunt preluate de către doi senzori piezoelectrice, model *MMF-KD13*. Senzorul care este conectat la *canalul 0* al plăcii de achiziție de date a fost plasat la distanța de 3 m de fisură, iar senzorul care este conectat la *canalul 1* al plăcii de achiziție, a fost plasat la distanța de 1 m față de fisură. Într-un scenariu real nu se cunoaște poziția fisurii și nici distanțele de la aceasta la senzorii amplasați pe conductă. Se cunoaște numai distanța dintre cei doi senzori. La fiecare achiziție efectuată se va înregistra o pereche de semnale. Un semnal este preluat de canalul 0 al plăcii de achiziție, iar cel de-al doilea semnal de canalul 1 al plăcii de achiziție. Semnalele preluate sunt amplificate cu ajutorul a două amplificatoare *M60T*. După amplificare, semnalele trec printr-un filtru care elimină frecvențele mai mari de 6 kHz, iar apoi sunt transmise unei plăci de achiziție de date, model *NI USB 9215A* [N2], pentru conversia analog – digitală. Placa de achiziție este conectată la un calculator portabil, pe care rulează programul de achiziție și analiză a semnalelor.

Sistemul de operare al calculatorului este *Microsoft Windows XP*. Implementarea acestui program s-a făcut în mediul de programare grafică *LabVIEW* (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), versiunea 8.5. Pentru conectarea instrumentelor s-au utilizat cabluri cu conectori *BNC*. Conectarea plăcii de achiziție la calculatorul portabil s-a făcut prin intermediul portului *USB*. Verificarea suplimentară a corectitudinii rutinelor implementate s-a realizat cu ajutorul programului *Matlab*, versiunea 7.5.

În Fig.3.2 și Fig.3.3 sunt prezentate imagini surprinse în timpul realizării experimentelor. Se poate observa robinetul care simulează fisura și unul din senzorii care încadrează această fisură.



Fig.3.2. Robinetul care simulează fisura



Fig.3.3. Senzor piezo-electric KD13 plasat pe conducta experimentală

Amplificarea semnalelor achiziționate este necesară deoarece în cazul debitelor de curgere foarte mici amplitudinea semnalelor achiziționate este foarte mică. Prin intermediul amplificatoarelor M60T, semnalele preluate au fost amplificate cu valori de 20 dB, 40 dB și 60 dB, în funcție de debitul de curgere prin fisură. Reglarea amplificatoarelor a depins și de limitările plăcii de achiziție. Astfel, intervalul maxim admis pentru amplificare a fost de  $\pm 10V$ , deoarece semnalele care depășesc aceste valori prezintă limitări nedorite.

Fig.3.4 prezintă utilizarea acestei plăci de achiziție de date împreună cu un program dezvoltat pentru salvarea datelor în fișiere de măsurare.

Placa de achiziție de date, model NI USB 9215A, oferă posibilitatea achiziției simultane (în paralel), a patru semnale. Ea are patru intrări analogice, conversia fiind realizată pe 16 biți. Achiziția simultană a semnalelor este deosebit de importantă pentru această aplicație.

Semnalele utilizate în cadrul experimentelor au fost eșantionate cu  $f_E = 15kHz$ , rezultând de la cei doi senzori, fișiere de măsurare salvate cu extensia \*.lvm. Perioada de eșantionare este de aproximativ  $T_E = 66,6\mu s$ . Putem menționa că perioada experimentală s-a extins pe durata a mai multor zile. Mult mai multe perechi de fișiere au fost achiziționate, totalizând numai pentru partea de localizare a fisurii o dimensiune de peste 1,5 GB. Fișierele conțin secvențe de semnale cu o lungime de 131072 eșantioane, durata în timp a unei secvențe de semnal fiind de 8,73 secunde.



Fig.3.4. Achiziția semnalelor cu placa NI USB 9215A și aplicația implementată în LabVIEW

Pentru siguranță, filtrarea semnalelor s-a făcut atât hardware cât și software. Limita superioară a filtrului hardware este setată la 6 kHz. Această limitare a fost impusă după consultarea a numeroase articole din literatură și a paginilor web ale unor firme specializate în localizarea fisurilor.

Zgomotele generate de o fisură în conducta metalică au ca bandă de frecvențe intervalul  $(500 \div 5000)$  Hz [L3]. Fisurile din conductele din material metalic (Oțel, Cupru), generează semnale cu frecvențe mult mai înalte față de conductele din materiale plastice. Fisurile în conductele din materiale plastice prezintă o bandă de frecvențe cu o limitare superioară la 200 Hz [H8], [G2]. Putem considera că această limitare superioară a semnalelor este suficientă încât să ne permită localizarea cu precizie a fisurii și să înlăture fenomenul de aliasing.

Următorul tabel arată situația amplificării semnalelor achiziționate pentru diferite debite de curgere a lichidului (apă) prin fisură. Aceste perechi sunt considerate reprezentative și suficiente pentru atingerea scopului propus.

Tabelul 3.1 arată un număr de 12 măsurări. La fiecare măsurare s-au achiziționat mai multe perechi de semnale. O pereche de semnale conține două fișiere de măsurare a câte 131072 eșantioane. Parametrul care a fost păstrat constant este debitul de curgere din fisură. Intervalul debitelor de curgere este cuprins între 0,20 l/min și 8,27 l/min.

Tabelul 3.1. Amplificările utilizate pentru măsurările efectuate

Măsurarea	Debit [litri/minut]	Amplificare [dB]
1	0,20	60
2	0,25	60
3	0,35	60
4	0,85	60
5	1,06	60
6	2	20
7	2,76	40
8	3,87	20
9	4,27	40
10	5,26	40
11	6,09	20
12	8,27	20

În Fig.3.5 și Fig.3.6 se arată perechi de semnale achiziționate pentru diferite debite de curgere prin fisură (așa cum rezultă din Tabelul 3.1).

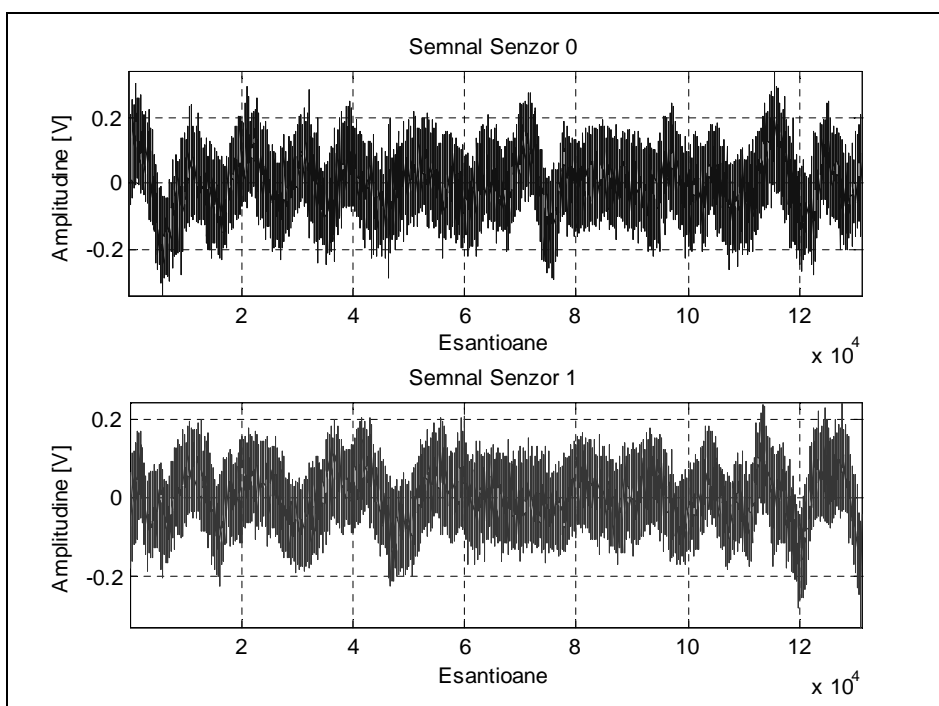


Fig.3.5. Semnale măsurate pentru debitul de 0,25 l/min

Semnalele prezentate sunt reale și nu au suferit prelucrări după achiziție (exceptând filtrarea frecvențelor mai mari de 6 kHz) fiind prezentate în starea lor inițială.

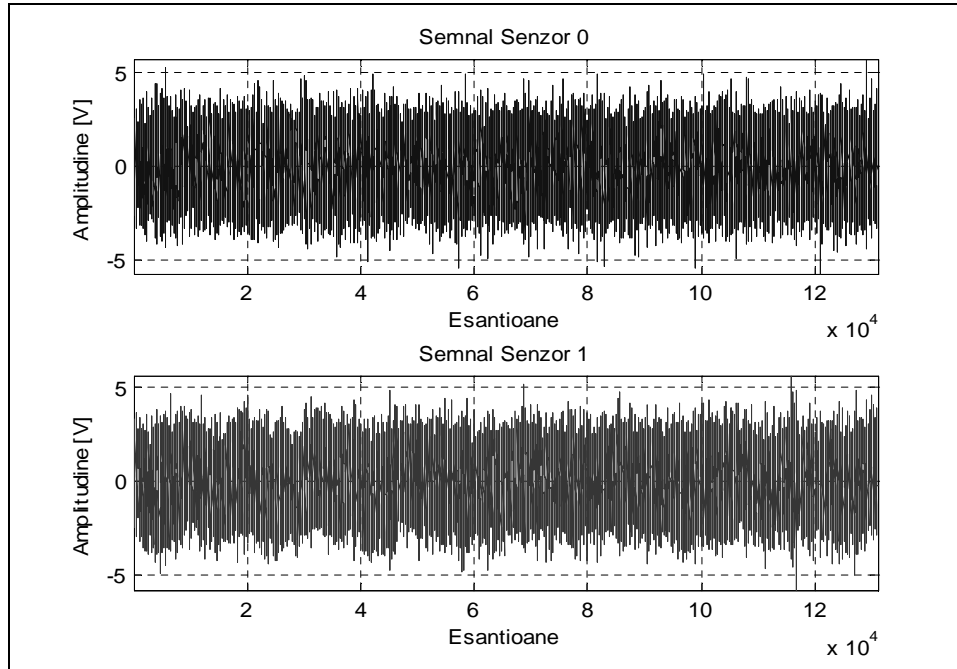


Fig.3.6. Semnale măsurate pentru debitul de 1,06 l/min

După cum se poate observa din figurile anterioare, semnalele achiziționate prezintă un caracter nestaționar. Această nestaționaritate a mediei se remarcă cu ușurință la semnalele achiziționate pentru debite de curgere mici. Perechea de semnale achiziționate pentru un debit de 0,25 l/min (Fig.3.5) este un exemplu în acest sens. Acest caracter nestaționar al semnalelor provine din prezența unor componente periodice de joasă frecvență.

Compenentele periodice provin din oscilațiile modale ale conductei și sunt separate de oscilațiile (vibrațiile) cauzate de fisură. Manifestarea acestor componente este prezentă și în cadrul funcției de autocorelație (FAC) a semnalelor. Aceste componente periodice de joasă frecvență trebuie eliminate prin filtrare. Problema nestaționarității semnalelor inițiale este abordată separat în cadrul acestui capitol.

Instalația experimentală este alimentată de un hidrofor. Pentru debite de curgere prin fisură mari, apare problema căderii presiunii din țeavă. Perechile de semnale achiziționate pentru debite de curgere ridicate surprind acest fenomen de cădere al presiunii din țeavă prin micșorarea amplitudinii.

În Fig.3.7 se arată evoluția valorilor unei perechi de semnale achiziționate pentru un debit de curgere de 8,27 l/min.

Se poate lua în discuție faptul că deși am considerat debitul la fisură ca având o anumită valoare, după scăderea presiunii din conductă, valoarea lui se modifică. Analiza semnalelor achiziționate se face atât pe lungime extinsă (de exemplu 131072 eșantioane) cât și pe segmente mai scurte (de exemplu 512 eșantioane). Analiza pe lungimi mai scurte de semnal oferă posibilitatea evitării regiunilor de cădere (sau creștere) abruptă a presiunii.

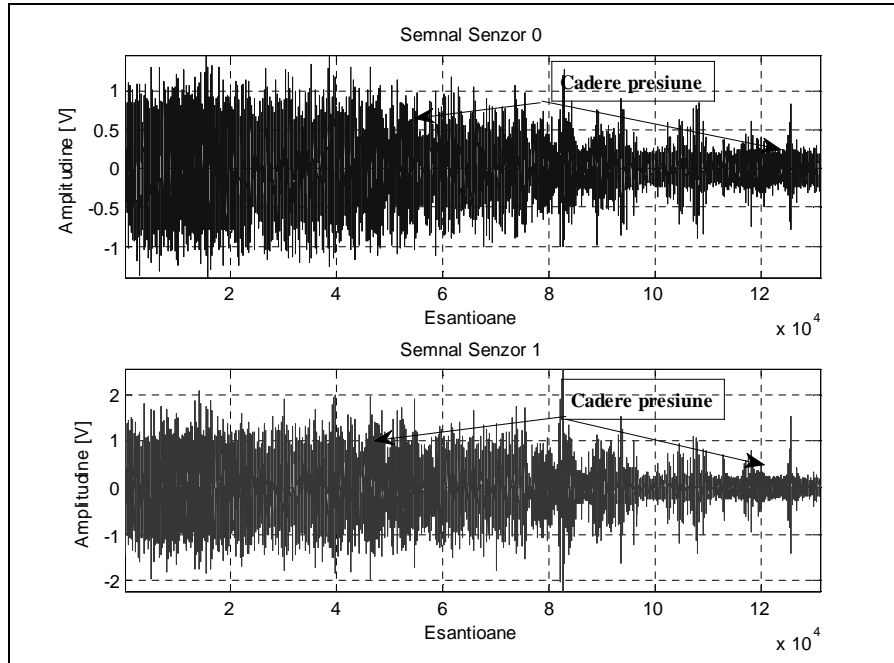


Fig.3.7. Căderea presiunii din conductă datorită debitului mare la fisură

### 3.2 Funcțiile pondere și de transfer ale instalației experimentale

Din punct de vedere sistemic, localizarea fisurilor în conductele de transport se încadrează în rândul așa-numitelor probleme cu o singură intrare și mai multe ieșiri (*single input/multiple output problems*) [B6], [B7]. În cazul cel mai simplu, este vorba de o singură intrare (inaccesibilă măsurării) și de două ieșiri corespunzătoare semnalelor captate de cei doi senzori utilizați (Fig.3.8).

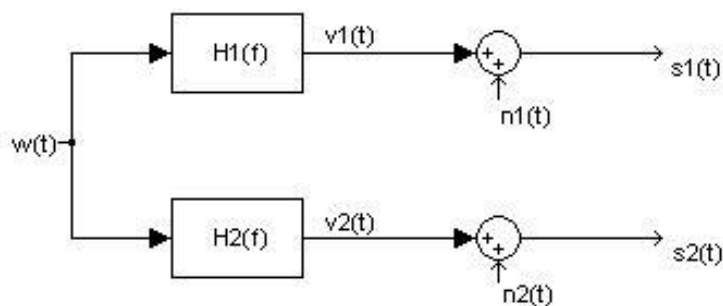


Fig.3.8. Reprezentarea sistemică a instalației experimentale

Relațiile care se pot scrie în acest caz, se referă cel mai des la funcțiile de auto- și intercorelație, precum și la densitățile spectrale de putere proprie și mutuală. Astfel, semnalele  $s_i(t)$ , captate la cele două ieșiri pot fi scrise sub forma [B6], [B7]:

$$s_i(t) = \int_0^{\infty} h_i(\tau) \cdot w(t - \tau) dt + n_i(t), \quad i = 1, 2 \quad (3.1)$$

în care  $h_i(t)$  reprezintă funcțiile pondere ale porțiunilor de conductă de la fisură la punctele de măsurare,  $w(t)$  este zgomotul generat la nivelul fisurii, iar  $n_i(t)$  sunt zgomotele perturbatoare care acționează aditiv asupra semnalelor măsurate. Dacă se aplică transformarea Fourier relației (3.1), considerată pe o durată finită  $T$ , a semnalelor, se obține o relație între spectrele de amplitudine:

$$S_i(f, T) = H_i(f) \cdot W(f, T) + N_i(f, T), \quad i = 1, 2 \quad (3.2)$$

În relația (3.2),  $H_i(f)$  desemnează funcțiile de transfer ale porțiunilor de conductă dintre fisură și punctele de măsurare a semnalelor  $s_i(t)$ .

Deoarece în relațiile (3.1) și (3.2) semnalele respectiv, spectrele de amplitudine au un caracter aleator, mai interesante pentru aplicații apar relațiile ce se pot stabili între mediile statistice. Astfel, intercorelația și densitatea spectrală de putere mutuală a semnalelor măsurate se pot exprima conform relațiilor [B6], [B7]:

$$R_{s_1s_2}(\tau) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} h_1(\alpha) \cdot h_2(\beta) \cdot R_{ww}(\tau + \alpha - \beta) \cdot d\alpha \cdot d\beta \quad (3.3)$$

$$G_{s_1s_2}(f) = H_1^*(f) \cdot H_2(f) \cdot G_{ww}(f) \quad (3.4)$$

Se precizează că  $R_{ww}(\tau + \alpha - \beta)$  în (3.3) și  $G_{ww}(f)$  în (3.4) reprezintă autocorelația și respectiv densitatea spectrală de putere a zgomotului la fisură.

Relațiile (3.1) și (3.3) evidențiază importanța funcțiilor pondere ale porțiunilor de conductă dintre fisură și punctele de măsurare, după cum relațiile (3.2) și (3.4) pun în evidență funcțiile de transfer corespunzătoare. Cunoașterea, chiar și aproximativă a acestor funcții, se poate dovedi utilă în studiul metodelor de localizare a fisurilor din conductele de transport. De aceea, în continuare, se pune problema determinării acestor funcții pentru modelul experimental utilizat.

Semnalele  $s_i(t)$  se obțin, în esență, ca rezultat al convoluției zgomotului alb de intrare,  $w(t)$ , cu funcțiile pondere  $h_i(t)$ . După cum se știe, operația de convoluție din domeniul prelucrării semnalelor corespunde operației algebrice de multiplicare a polinoamelor. Astfel, convoluția a doi vectori  $A$  și  $B$  este vectorul  $C = \text{conv}(A, B)$  a cărui lungime este  $\text{length}(C) = \text{length}(A) + \text{length}(B) - 1$ . Dacă vectorii  $A$  și  $B$  reprezintă coeficienții polinoamelor care se înmulțesc, vectorul  $C$ , reprezintă coeficienții polinomului produs. Pentru aflarea funcțiilor pondere  $h_i(t)$ , se aplică operația inversă, deconvoluția. Aceasta poate fi redată simbolic prin relația  $[A, R] = \text{deconv}(C, B)$ . Ca și la împărțirea polinoamelor, în urma deconvoluției rezultă pe lângă "câtul"  $A$ , și un rest  $R$ . Altfel spus, operația de convoluție este inversabilă doar în cazul în care restul  $R$  este nul (practic,  $R$  trebuie să fie cât mai mic).

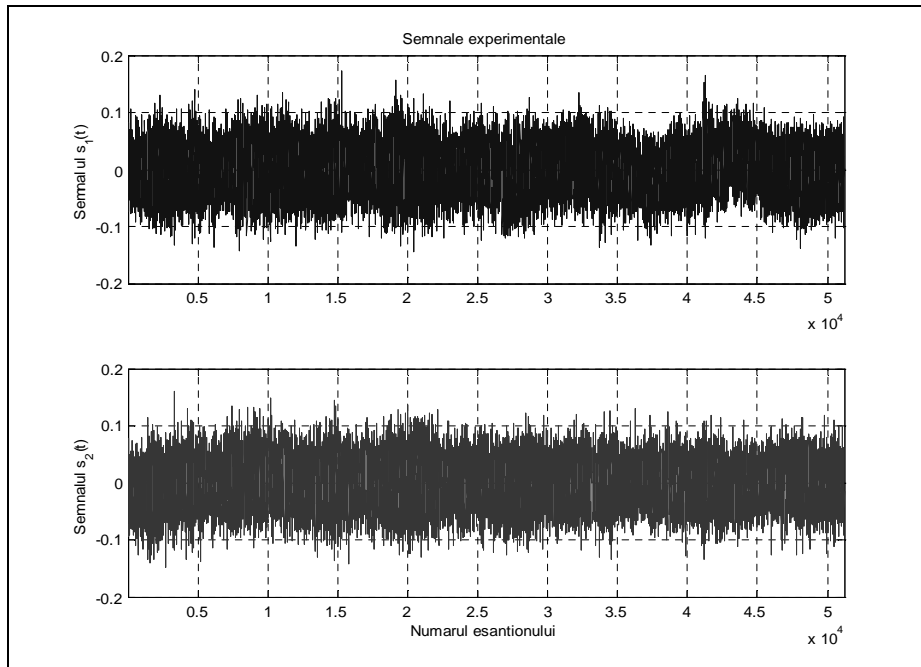


Fig. 3.9. Semnalele utilizate pentru determinarea funcțiilor pondere ale instalației experimentale

Pentru a deduce cele două funcții pondere,  $h_1(t)$  și  $h_2(t)$  pornim de la două semnale măsurate,  $s_1(t)$  și  $s_2(t)$ , fiecare având câte 51200 eșantioane. Aceste semnale sunt reprezentate în Fig.3.9.

Relația (3.1) poate fi scrisă în forma:

$$s_i(t) = \int_0^{\infty} h_i(\tau) \cdot z(t - \tau) dt, \quad i = 1, 2 \quad (3.5)$$

în care  $z(t) = w(t) + n(t)$  (Fig.3.10), cu precizarea că:

$$n_i(t) = \int_0^{\infty} h_i(\tau) \cdot n(t - \tau) dt, \quad i = 1, 2 \quad (3.6)$$

Altfel spus, perturbațiile care afectează cele două semnale măsurate nu se suprapun aditiv la nivelul punctelor de măsurare, ci la nivelul fisurii.

În continuare, presupunem că  $z(t) = w(t) + n(t)$  este un zgomot alb cu media nulă și varianță unitară, acesta având avantajul că poate fi generat ușor cu funcția *randn* din Matlab.

Propunând pentru  $z(t)$  diferite secvențe generate cu funcția *randn*, sunt necesare sute (sau chiar mii) de încercări și multe ore de calcul pentru a afla o



secvență de zgomot alb care prin deconvoluție cu cele două semnale  $s_1(t)$  și  $s_2(t)$ , să dea resturi neglijabile.

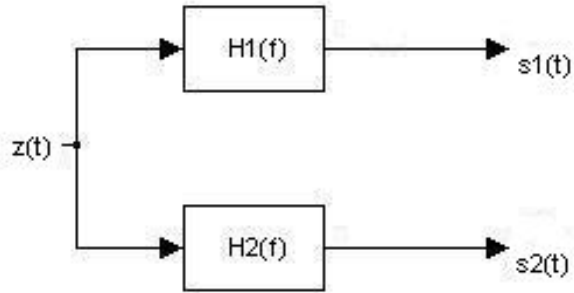


Fig.3.10. Reprezentarea sistemică a instalației experimentale cu perturbațiile incluse în zgomotul de intrare

În Fig. 3.11 se prezintă o astfel de secvență  $z(t)$  având lungimea de 50689 de eșantioane și care, la deconvoluția cu  $s_1(t)$  dă restul  $2,2686 \cdot 10^{-5}$  iar la deconvoluția cu  $s_2(t)$  conduce la un rest de restul  $5,8471 \cdot 10^{-4}$ .

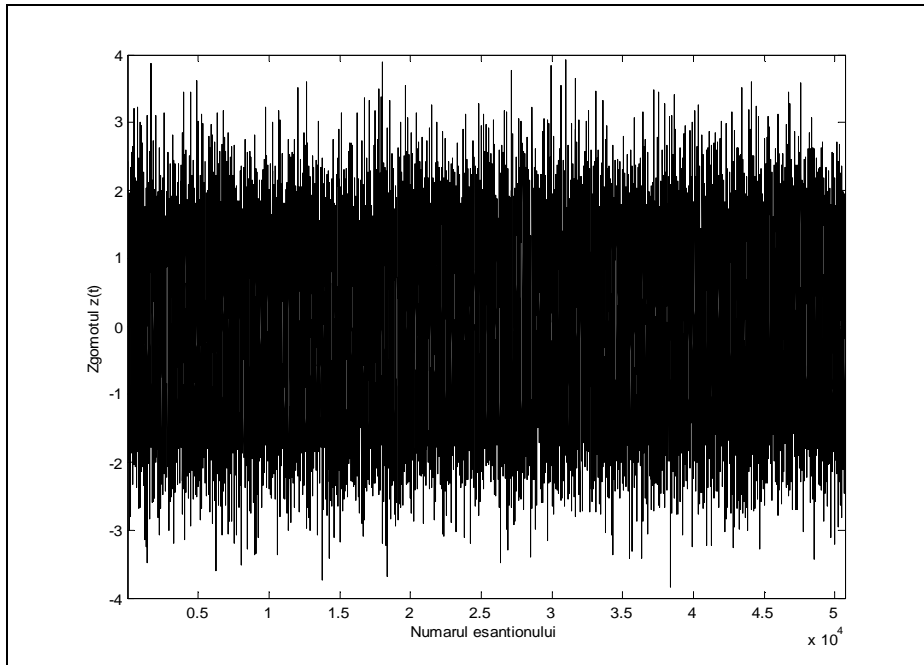


Fig.3.11. Secvență de zgomot alb,  $z(t)$ , cu resturi de convoluție minime

Ca urmare, se poate considera că semnalele măsurate,  $s_1(t)$  și  $s_2(t)$ , sunt obținute după trecerea zgomotului  $z(t) = w(t) + n(t)$  prin filtrele cu funcțiile pondere  $h_i(t)$ , conform relației (3.5). În acord cu aceeași relație, funcțiile pondere se pot afla prin deconvoluția zgomotului  $z(t) = w(t) + n(t)$  cu semnalele măsurate  $s_1(t)$  și  $s_2(t)$ . Astfel, în Fig.3.12 se prezintă primele 50 de eșantioane ale funcțiilor pondere discrete  $h_0$  și  $h_1$ . Dat fiind că semnalele  $s_1(t)$  și  $s_2(t)$  au câte 51200 de eșantioane, iar zgomotul de intrare  $z(t)$ , are lungimea de 50689 de eșantioane, funcțiile pondere discrete au câte  $51200 - 50689 + 1 = 512$  eșantioane.

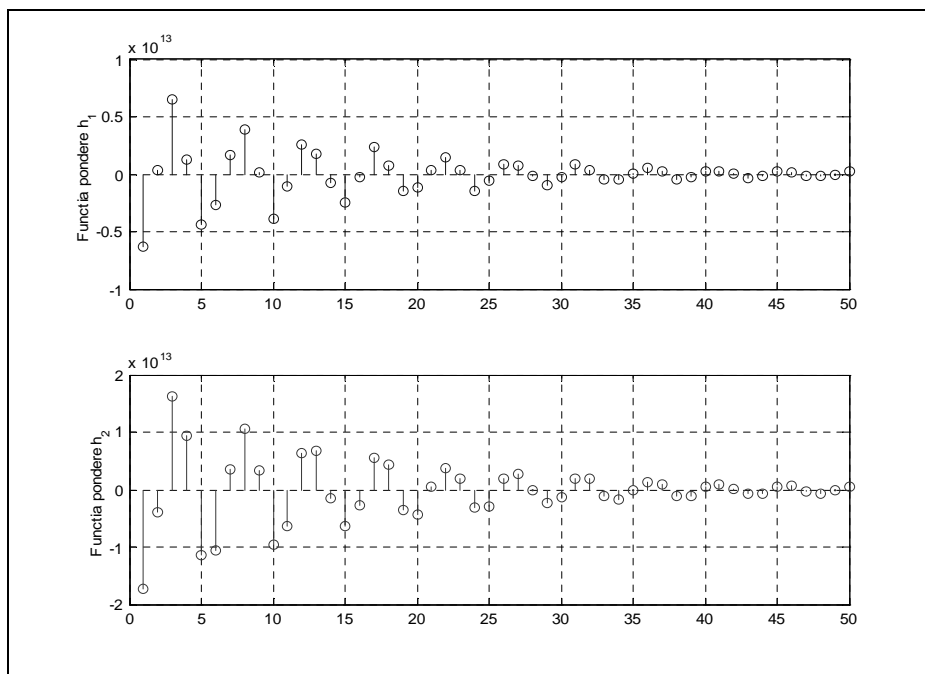


Fig.3.12. Funcțiile pondere discrete ale instalației experimentale

Pentru a deduce o expresie analitică în formă continuă a celor două funcții pondere, se poate constata, prin inspecția vizuală a reprezentărilor discrete din Fig. 3.12, că acestea pot fi modelate printr-o formulă empirică de tipul unei cosinusoide amortizată, inversată și defazată:

$$h(t) = -C \cdot e^{-a \cdot t} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) \quad (3.7)$$

Prin încercări s-au determinat parametrii care minimizează eroarea de aproximare a funcției pondere digitală prin formula empirică (3.7). Astfel, pentru funcția pondere  $h_1(t)$  s-au aflat ca aproape de optim valorile:  $C_1 = 6,8 \cdot 10^{12}$ ,  $a_1 = 1100 \text{ Hz}$ ,  $\omega_1 = 451220 \text{ rad/sec}$ ,  $\varphi_1 = -0,38 \text{ rad}$ . În mod similar, pentru funcția

pondere  $h_2(t)$  s-au obținut ca fiind aproape de optim următoarele valori ale parametrilor:  $C_2 = 18,9 \cdot 10^{12}$ ,  $a_2 = 1050$  Hz,  $\omega_2 = 451210$  rad/sec,  $\varphi_2 = -0,1$  rad.

Dacă în cazul pulsației  $\omega$ , diferența procentuală între cele două funcții pondere este infimă, iar în cazul lui  $a$  diferența procentuală este de doar 4,5%, în cazul factorului de proporționalitate și al defazajului, diferențele sunt mari. Astfel,  $C_2$  este cu aproximativ 180% mai mare decât  $C_1$ , iar defazajul  $\varphi_2$  reprezintă doar aproximativ 26% din defazajul  $\varphi_1$ .

Pentru exemplificare, în Fig.3.13 se prezintă primele 50 de eșantioane ale funcției pondere discretă  $h_1(t)$ , precum și aproximarea lor prin sinusoida amortizată. Frecvența de eșantionare este în acest caz de 15 kHz, ceea ce corespunde la o perioadă de eșantionare  $T_E \cong 6,66 \cdot 10^{-5}$  s.

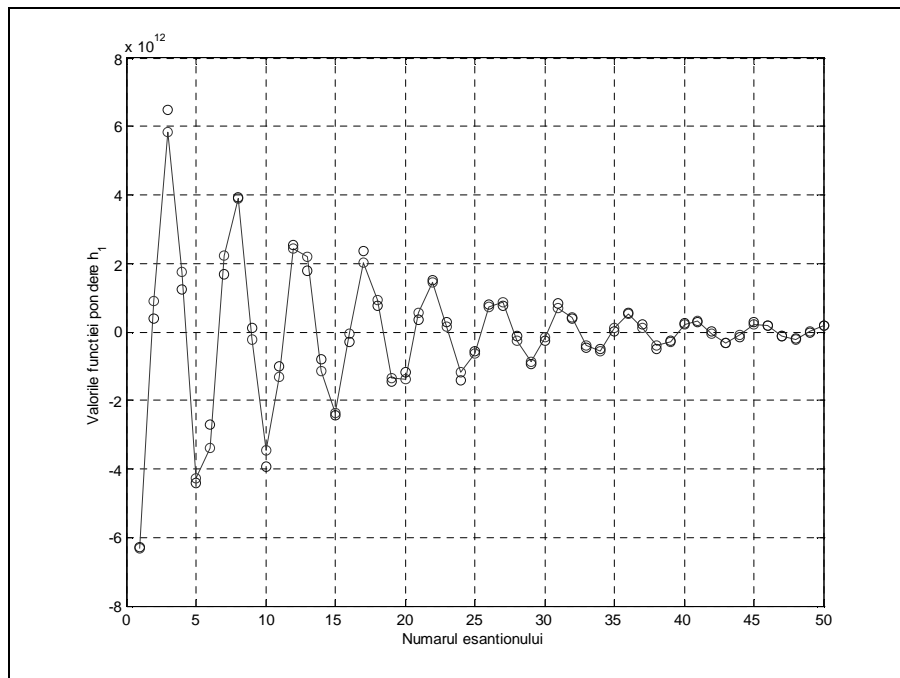
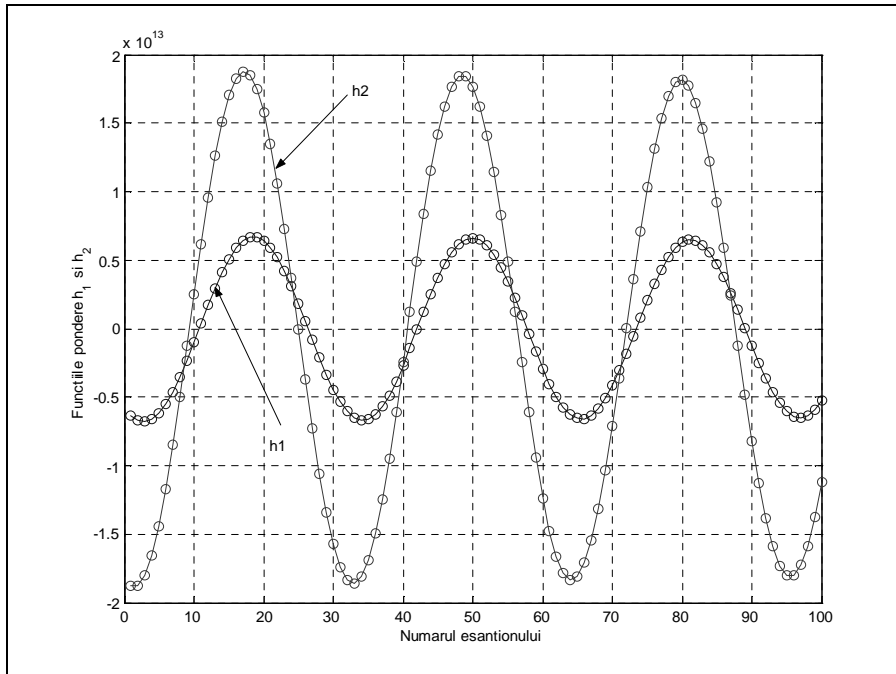


Fig.3.13. Primele 50 de valori ale funcției pondere  $h_1$  (marcată prin o) și aproximarea ei prin formula empirică (marcată prin o și linie continuă)

În concluzie, se constată o bună aproximare a funcției pondere discretă prin formula empirică propusă. Erorile de aproximare sunt mai semnificative la primele 25 de eșantioane și se datorează, în primul rând, numărului relativ mic de eșantioane prin care este determinată funcția pondere discretă. În orice caz, pe baza formulelor empirice, se pot determina secvențe numerice reprezentând funcțiile pondere eșantionate cu perioade de eșantionare arbitrare.

Fig.3.14. Primele 100 de valori ale funcțiilor pondere  $h_1$  și  $h_2$ 

Astfel, în Fig.3.14 sunt reprezentate suprapus, primele 100 de eșantioane ale celor două funcții pondere, determinate pe baza expresiilor empirice ale funcțiilor pondere. Pentru o mai bună rezoluție în reprezentare, de data aceasta, s-a folosit o perioadă de eșantionare  $T_E \cong 0,04 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ , corespunzătoare unei frecvențe de eșantionare de aproximativ 2,25 MHz.

Având în vedere faptul că o funcție cu expresia (3.7) poate fi scrisă sub forma:

$$h(t) = -C \cdot \cos \varphi \cdot [e^{-a \cdot t} \cdot \cos(\omega \cdot t)] + C \cdot \sin \varphi \cdot [e^{-a \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t)] \quad (3.8)$$

precum și perechile de transformate Laplace

$$e^{-a \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t) \Leftrightarrow \frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}; \quad e^{-a \cdot t} \cdot \cos(\omega \cdot t) \Leftrightarrow \frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2},$$

se deduce funcția de transfer corespunzătoare funcției pondere cu expresia (3.8). Aceasta este:

$$H(s) = \frac{(-C \cdot \cos \varphi) \cdot s - a \cdot C \cdot \cos \varphi + \omega \cdot C \cdot \sin \varphi}{s^2 + 2a \cdot s + \omega^2} \quad (3.9)$$

În Fig.3.15 se prezintă caracteristicile amplificare-frecvență și fază-frecvență corespunzătoare funcțiilor de transfer  $H_1(s)$  și  $H_2(s)$ , ambele având expresia (3.9) și fiind diferite prin valorile parametrilor  $C$ ,  $a$ ,  $\omega$  și  $\varphi$ . Relativ la acest experiment, caracterizat prin vibrații mecanice, domeniul pulsațiilor  $10^4 \div 10^6 \text{ rad/s}$ ,

corespunzător la frecvențe de  $1,6 \div 160$  kHz, poate fi considerat unul al frecvențelor înalte.

Faptul remarcabil în aceste caracteristici este prezența unui fenomen de rezonanță la o pulsație de aproximativ  $451200$  rad/s, respectiv la o frecvență de aproximativ  $72$  kHz. Trebuie spus însă, că partea superioară a acestui domeniu de frecvențe, nu este explorată în funcționarea normală a conductei și ca urmare, interesează mai degrabă domeniul frecvențelor joase. Astfel, în Fig.3.16 sunt reprezentate caracteristicile amplificare-frecvență și fază-frecvență pentru pulsații până la  $10^4$  rad/s, respectiv până la aproximativ  $1,6$  kHz.

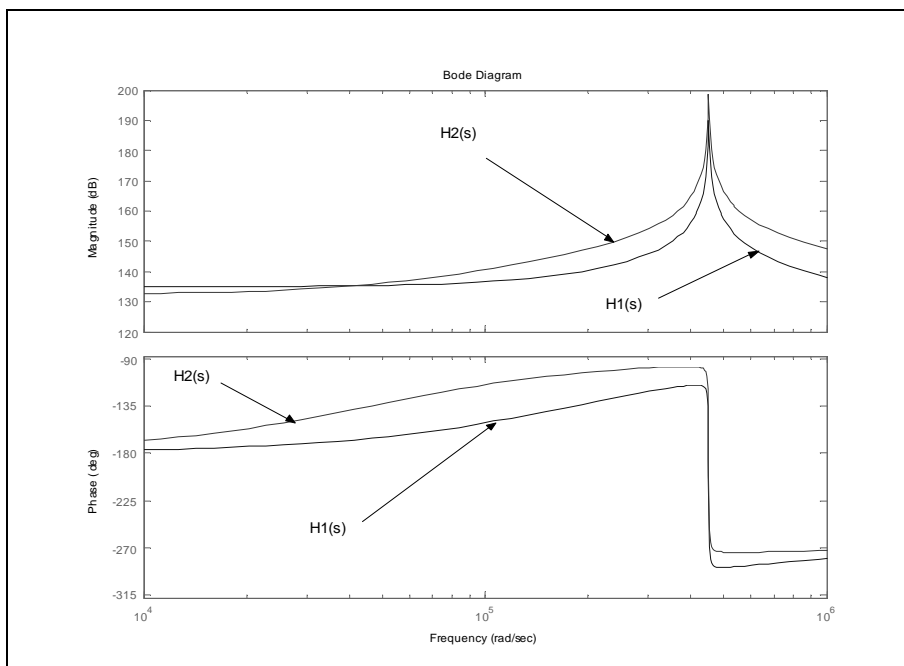


Fig.3.15. Caracteristicile amplificare-frecvență și fază-frecvență ale funcțiilor de transfer  $H_1(s)$  și  $H_2(s)$ , în domeniul frecvențelor relativ înalte

Caracteristicile amplificare-frecvență din Fig.3.16 evidențiază faptul că raportul amplitudinilor celor două semnale măsurate, corespunzător raportului dintre modulul funcțiilor de transfer, este constant în domeniul frecvențelor joase. Ca urmare, din punct de vedere al amplitudinii, unul dintre semnale se poate considera ca fiind replica atenuată a celuilalt semnal. Trebuie subliniat însă că această observație este valabilă doar pentru domeniul frecvențelor joase. Pentru pulsații de peste  $10^4$  rad/s, raportul amplitudinilor se modifică urmând ca o dată cu creșterea frecvenței, atenuarea să devină amplificare, așa cum se constată din Fig.3.15.

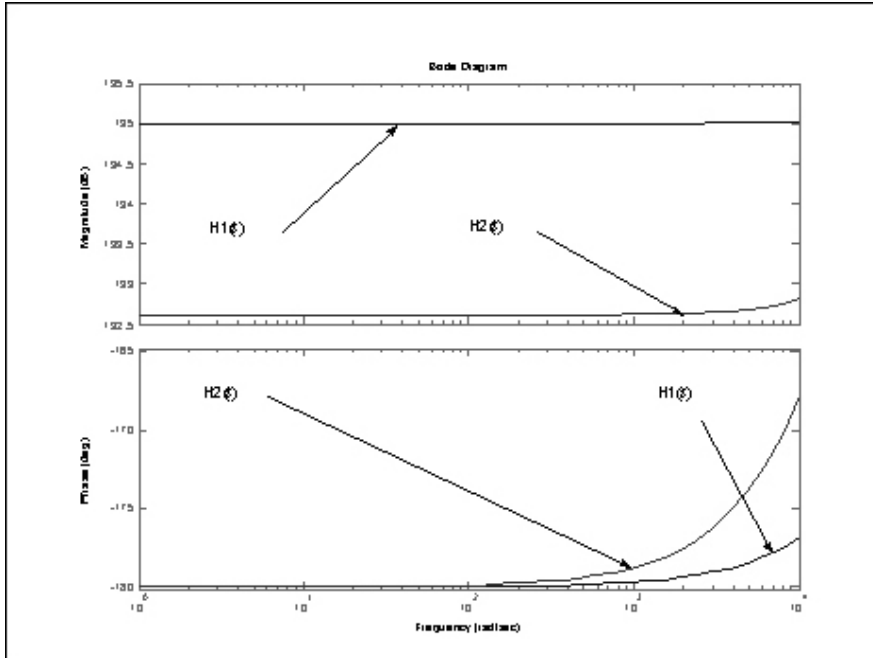


Fig.3.16. Caracteristicile amplificare-frecvență și fază-frecvență pentru funcțiile de transfer  $H_1(s)$  și  $H_2(s)$ , în domeniul frecvențelor joase

Caracteristicile fază-frecvență din Fig.3.16 arată că defazajul dintre componentele spectrale ale semnalelor măsurate crește o dată cu pulsația. Această comportare este în acord cu un fapt cunoscut din literatura de specialitate; astfel, în [B6], [B7] se arată că dacă semnalele măsurate se exprimă prin relațiile:

$$\left. \begin{aligned} s_1(t) &= w(t) + n_1(t) \\ s_2(t) &= \alpha \cdot w(t - \tau_1) + n_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

în care constantele  $\alpha$  și  $\tau$  reprezintă atenuarea, respectiv întârzierea, iar zgomotele perturbatoare  $n_1(t)$  și  $n_2(t)$ , se presupun necorelate atât între ele, cât și cu semnalul  $w(t)$  de la sursa primară de zgomot, atunci funcția de intercorelație a semnalelor de ieșire și densitatea spectrală de putere mutuală a acestora, se pot exprima prin relațiile:

$$R_{s_1 s_2}(\tau) = \alpha \cdot R_{ww}(\tau - \tau_1) \quad (3.11)$$

$$G_{s_1 s_2}(f) = \alpha \cdot \exp(-j2\pi f \tau_1) \cdot G_{ww}(f) \quad (3.12)$$

Altfel spus, în condițiile menționate, funcția de intercorelație este o variantă atenuată și deplasată (cu timpul de propagare  $\tau_1$ ), a funcției de autocorelație  $R_{ww}(\tau - \tau_1)$ . Acest fapt permite determinarea întârzierii  $\tau_1$  prin localizarea maximului funcției  $R_{s_1 s_2}(\tau)$ . În același timp însă, întârzierea  $\tau_1$  apare în densitatea

spectrală de putere mutuală  $G_{s1s2}(f)$ , ca un defazaj ce crește linear cu frecvența [B6], [B7]:

$$\theta_{s1s2}(f) = 2\pi \cdot f \cdot \tau_1 \quad (3.13)$$

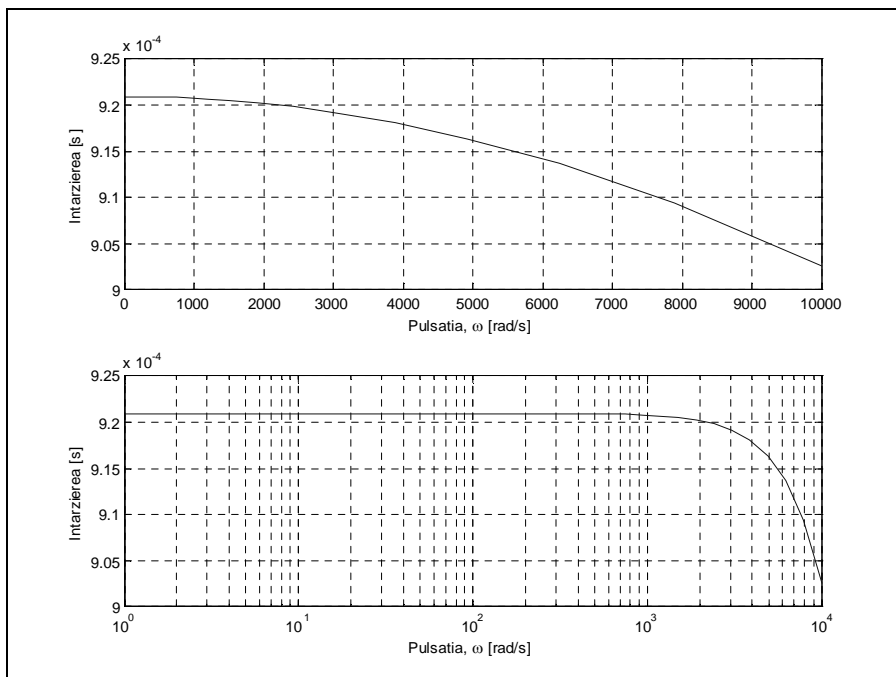


Fig.3.17. Mărima  $\theta_{s1s2}(f)/(2\pi \cdot f)$ , conform modelului experimental identificat. Axa pulsațiilor este lineară (sus), respectiv logaritmică (jos)

Conform relației (3.13), prin împărțirea defazajului  $\theta_{s1s2}(f)$ , echivalent cu diferența de fază evidențiată în Fig.3.16, la  $2\pi \cdot f = \omega$ , rezultatul ar trebui să fie diferența timpilor de propagare, respectiv constanta  $\tau_1$ . Mărima  $\theta_{s1s2}(f)/(2\pi \cdot f)$ , reprezentată în Fig.3.17 nu este o constantă, ci o mărime care scade cu creșterea pulsației.

Ca urmare, formula (3.13) trebuie generalizată sub forma:

$$\theta_{s1s2}(\omega) = F(\omega) \cdot \Delta\tau \quad (3.14)$$

în care constanta  $\Delta\tau$  reprezintă diferența timpilor de propagare, iar funcția de pulsație  $F(\omega)$ , depinde de instalația experimentală analizată. În speță, pentru cazul studiat și în domeniul frecvențelor joase, se poate folosi aproximația  $F(\omega) \cong \omega$ , caz în care relația (3.13) este echivalentă cu relația (3.14).

Analiza precedentă, bazată pe identificarea instalației experimentale, evidențiază importanța frecvențelor relativ joase pentru determinarea timpilor de propagare. De aceea, dacă din considerente de condiționare a semnalelor, se

impune eliminarea prin filtrare a unor frecvențe joase această operație trebuie redusă la strictul necesar. Este adevărat că scăderea raportului  $\theta_{s_1, s_2}(f)/(2\pi \cdot f)$ , reflectată în Fig.3.17, se produce doar în a patra decadă de frecvențe,  $\omega = 10^3 \div 10^4$  rad/s, iar această scădere, în domeniul considerat, nu este procentual mare. Totuși, faptul că  $F(\omega) \neq \omega$  introduce erori în determinarea timpilor de propagare pe baza defazajului și cum densitatea spectrală de putere și funcția de intercorelație conțin aceeași cantitate de informație (se obțin una din cealaltă prin intermediul transformării Fourier), aceleași erori de estimare se vor regăsi și dacă determinarea timpilor de propagare se face folosind funcția de intercorelație.

Analiza a evidențiat și faptul că relația propusă (3.14), conține ca un caz particular, relația (3.13), cunoscută din literatură de specialitate [B6]. Rezultă, de aici, importanța unor concluzii deduse pe baze experimentale, care să completeze rezultatele teoretice obținute pe baza unor ipoteze simplificatoare. De exemplu, în legătură cu modelul (3.10), uzual în literatura de specialitate, ipoteza simplificatoare privind independența statistică a perturbațiilor  $n_1(t)$  și  $n_2(t)$  este forțată, în special când instalația experimentală testată este de dimensiuni reduse. Modelul (3.10) presupune implicit că unul dintre semnale este captat chiar la nivelul sursei de zgomot care trebuie localizată. În plus, atenuarea  $\alpha$  se presupune a fi aceeași pentru toate frecvențele pe când, în realitate, amplificarea depinde, în general, de frecvență. În baza acestor observații și având în vedere schema din Fig.3.10, se propune un nou model pentru instalațiile experimentale de tipul o intrare-două ieșiri. Acest nou model corespunde relațiilor:

$$\left. \begin{aligned} s_1(t) &= \alpha_1(f) \cdot [w(t - \tau_1) + n(t - \tau_1)] \\ s_2(t) &= \alpha_2(f) \cdot [w(t - \tau_2) + n(t - \tau_2)] \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

Spre deosebire de modelul (3.10), în relațiile (3.15) este inclusă dependența statistică a zgomotelor perturbatoare, acestea fiind reduse la intrare sub forma perturbației  $n(t)$ , care acționează aditiv zgomotul  $w(t)$  provenind de la sursa care trebuie localizată. De asemenea, se ia în considerare dependența de frecvență a atenuărilor, cei doi senzori fiind plasați la distanțe arbitrare față de sursa zgomotului  $w(t)$ . Utilizarea acestui model rămâne pentru cercetări viitoare.

### 3.3 Problema staționarității semnalelor achiziționate

Semnalele achiziționate prezintă componente de joasă frecvență. Aceste componente sunt vibrațiile sistemului experimental. Ele se numesc oscilații modale și faptul că se suprapun peste vibrațiile cauzate de fisură afectează procesul de localizare. Semnalele achiziționate pentru debite de fisură mici sunt afectate în mod evident de prezența acestor oscilații modale deoarece înrăutățesc raportul semnal-zgomot.

Manifestarea acestor oscilații modale în cadrul calculului funcțiilor de autocorelație și intercorelație este deranjantă. Aceste oscilații modale pot fi eliminate prin filtrarea semnalelor inițiale, considerate ca fiind nestaționare.



Prin testarea staționării de medie, putem aprecia dacă am eliminat componentele modale din semnalele achiziționate. Pentru un proces aleator (semnal generat de fisură), care variază în funcție de timp, definim valoarea medie:

$$\bar{X} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (3.16)$$

Dacă luăm în considerare seturi de valori ale aceluiași proces, dar care corespund unor momente de timp diferite, prin calculul mediilor acestor seturi, putem stabili caracterul staționar al procesului. Dacă notăm cu  $\bar{X}_j$  ( $j=1..N$ ) valorile mediilor ale acestor seturi și dacă  $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \dots = \bar{X}_N$ , atunci procesul poate fi considerat staționar [R2]. Pentru procese staționare, valorile acestor seturi sunt egale, iar funcțiile de autocorelație depind numai de întârziere. În cazul în care variația acestor valori ale mediilor este una neglijabilă, se consideră că procesul este staționar [B6]. În forma lor brută, semnalele nu pot fi folosite în mod corespunzător. Caracterul de puternică nestaționare se manifestă, în special, la semnalele achiziționate pentru debite de curgere mici. Exemplificăm problema nestaționării printr-o pereche de semnale achiziționate la debitul de 0,35 l/min (Fig.3.18).

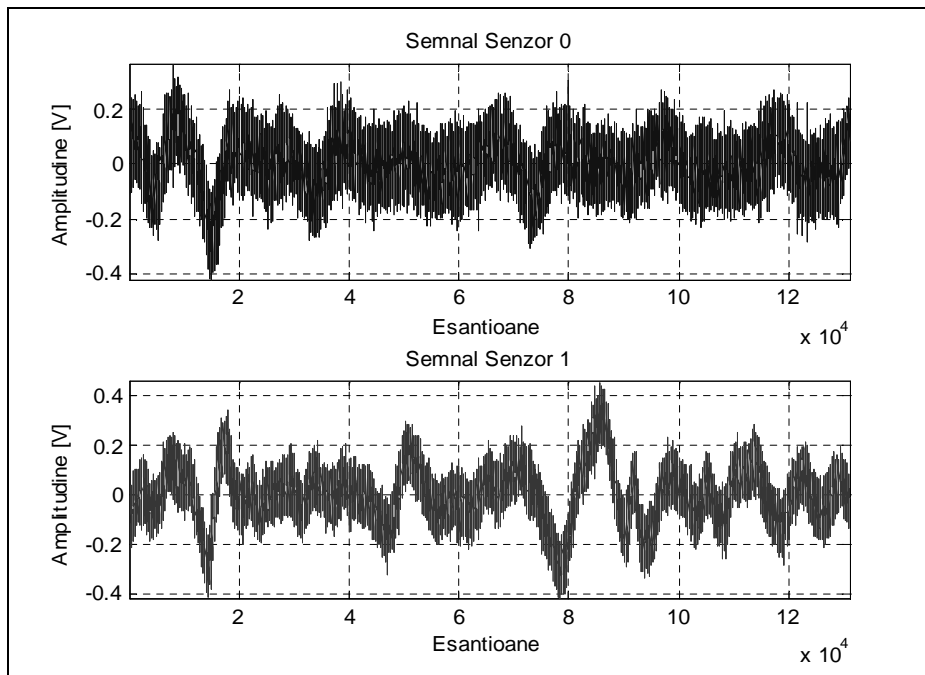


Fig.3.18. Semnale măsurate pentru debitul de 0,35 l/min

Vom studia aspectul funcțiilor de autocorelație (FAC, Fig.3.19) și intercorelație (FIC, Fig.3.20) pentru această pereche.

După aspectul FAC și FIC calculate și reprezentate în figurile 3.19 și 3.20 se poate trage concluzia că semnalele achiziționate (cu precădere la debite mici), sunt puternic nestaționare. Fluctuațiile puternice prezente în cadrul acestor funcții dovedesc acest fapt.

Pentru a elimina problema nestaționarității trebuie să analizăm seturi mai mici de valori ale aceluiași semnal și să determinăm dacă proprietățile acestora variază semnificativ de la un set la altul. După o filtrare corespunzătoare verificăm valorile mediilor obținute pentru seturile preluate din semnal, precum și aspectul funcției de autocorelație.

Putem ajunge la concluzia că semnalul este "slab" staționar (*weak stationarity*) și putem accepta să utilizăm, în continuare, aceste semnale.

Există posibilitatea unor verificări suplimentare (a proprietăților valorilor mediilor pătratice) însă pentru atingerea obiectivelor acestei lucrări verificarea evoluției valorilor medii este suficientă.

Semnalul care este supus testului de staționaritate se împarte în intervale de lungime egală. Pentru fiecare din aceste seturi de date (intervale), obținute, se calculează valoarea mediei. Vom obține un șir de valori ale mediilor, iar pentru acest șir de valori, putem aplica două teste. Primul test este testul de "drum" (*run test*), iar cel de-al doilea test este acela de "tendință" (*trend test*) [B6].

Ne interesează fluctuațiile valorilor medii obținute și faptul că prin filtrare putem micșora aceste fluctuații până la o limită acceptabilă. Pentru a atinge limita acceptabilă, aplicarea testului de "drum" este suficientă.

Se va defini un coeficient de staționaritate, parametru care ne va spune dacă valoarea numerică obținută în urma testării se încadrează sau nu în limitele intervalului ( $86 \div 115$ ) [B6]. Dacă pentru un semnal, coeficientul de staționaritate nu se încadrează în intervalul menționat, vom aplica filtrarea frecvențelor joase din semnal [B6]. Prin această filtrare automată urmărim să îmbunătățim coeficientul de staționaritate al semnalului astfel încât, el să se încadreze în limitele de mai sus.

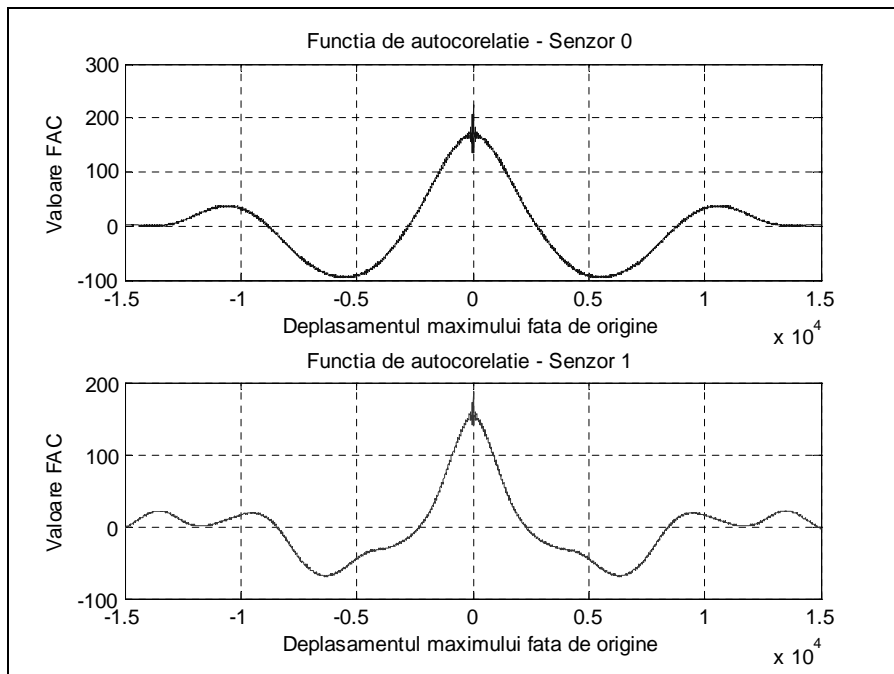
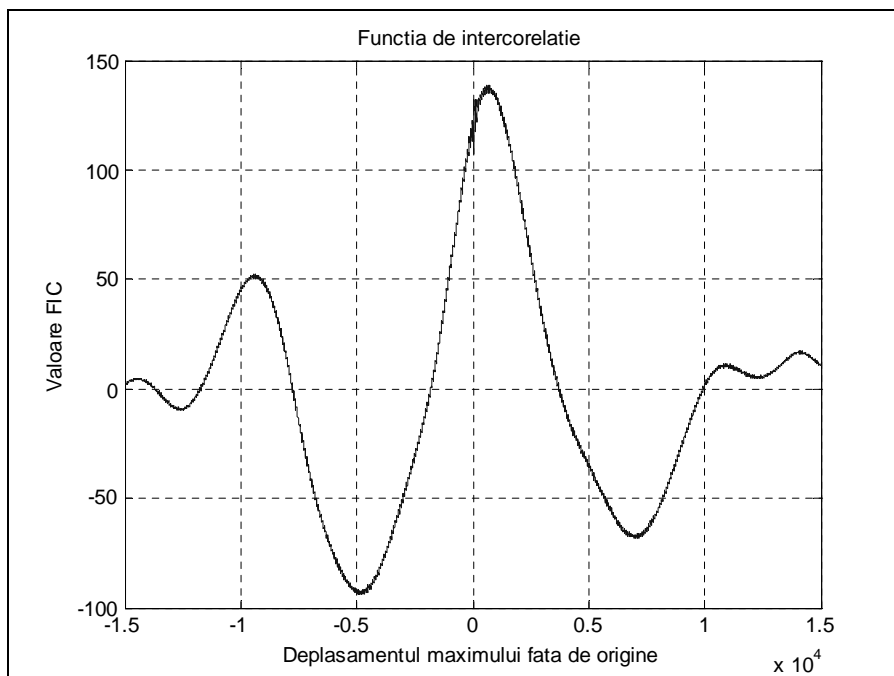


Fig.3.19. Funcțiile de autocorelație pentru  $m = 15000$

Fig.3.20. Funcția de intercorelație pentru  $m = 15000$ 

Din perechea de semnale prezentată mai sus (Fig.3.18), s-a ales o secvență de lungime 16384 eșantioane. Această secvență a fost împărțită în 255 de segmente a câte 64 de eșantioane. Acoperim astfel 16320 de eșantioane (din selecția de 16384 eșantioane) valoare suficientă pentru a studia problema nestaționării.

În urma calculului coeficientului de staționare se vor efectua (dacă valoarea coeficientului nu se încadrează în intervalul  $(86 \div 115)$ ) filtrări succesive ale semnalelor în intervalul  $(0 \div 100)$  Hz. Pe măsură ce se efectuează aceste filtrări, se testează coeficientul și se alege limita de filtrare optimă pentru eliminarea nestaționării.

În continuare, se prezintă valorile coeficientului de staționare pentru semnalele achiziționate la debitul de 0,35 l/min, înainte și după filtrare, până la limita determinată în mod automat. Valorile acestor coeficienți și ale limitelor de filtrare, vor fi diferite. Ele depind de debitul din fisură, acesta influențând cât de puternice sunt componentele modale din semnale [B6].

În funcție de valoarea limitei de frecvență cu care se face filtrarea semnalelor, valorile coeficienților de staționare se modifică. Figura 3.21 prezintă această evoluție a coeficienților în funcție de limita de filtrare.

Cu linie întreruptă s-au marcat limitele intervalului  $(86 \div 115)$ . Se remarcă faptul că, dacă filtrăm semnalele cu frecvențele din intervalul  $(0 \div 23)$  Hz, valorile coeficienților de staționare se încadrează în intervalul  $(86 \div 115)$ . Suntem interesați ca domeniul de filtrare să fie minim pentru a renunța exact la banda de frecvențe de care nu avem nevoie.

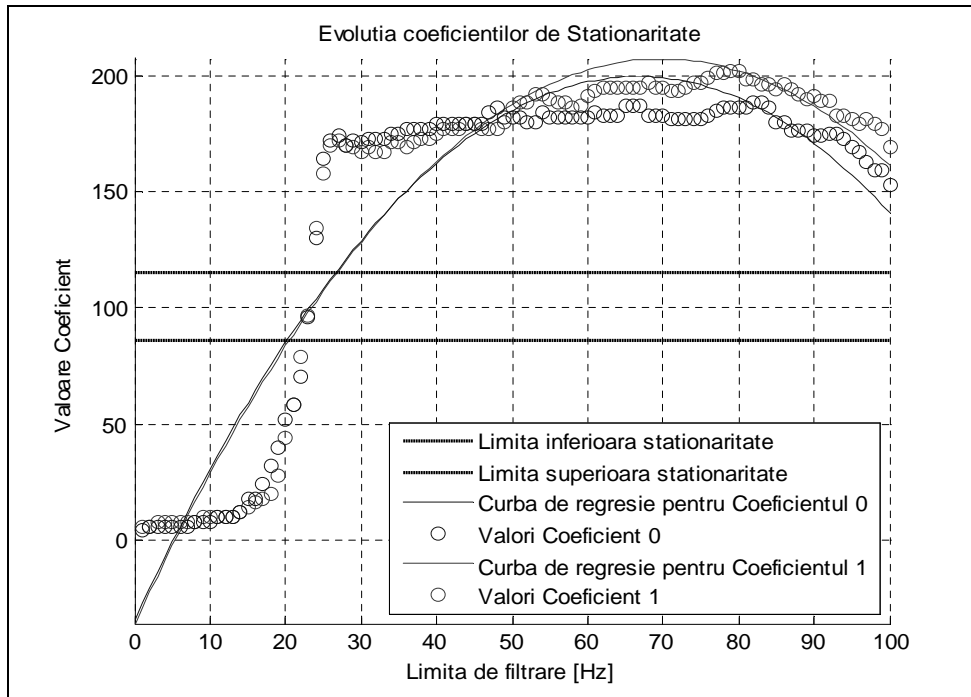


Fig.3.21. Evoluția coeficienților de staționaritate în funcție de limita de filtrare

Tabelul 3.2 prezintă parametrii calculați în urma filtrării pentru staționizare a semnalelor prezentate în Fig.3.18.

Tabel 3.2. Detaliile staționizării semnalelor pentru debitul de 0,35 l/min

	<b>Semnal 0</b>	<b>Semnal 1</b>
<b>Debit [l/min]</b>	0,35	0,35
<b>Coeficient de Staționaritate inițială</b>	4	5
<b>Interval filtrare [Hz]</b>	0÷23	0÷23
<b>Coeficient de Staționaritate după filtrare</b>	96	97

În Fig.3.22 și Fig.3.23 se arată evoluția valorilor staționarităților de medie pentru semnale. După cum se poate observa, în cazul calculului mediilor pe segmente în cazul semnalelor brute, fluctuațiile valorilor sunt mari. Nu se pot obține rezultate corecte dacă se utilizează semnalele în această formă.

Faptul este dovedit prin funcțiile de autocorelație și intercorelație reprezentate în Fig.3.19 și Fig.3.20. După filtrarea pentru staționizare valorile mediilor pe segmente se apropie de 0. Caracterul oscilant al acestor valori medii este aproape eliminat. Dacă vom calcula funcțiile de autocorelație și intercorelație pentru semnalele filtrare rezultatele vor fi mult îmbunătățite. Noile funcții sunt reprezentate în Fig.3.24 și Fig.3.25.

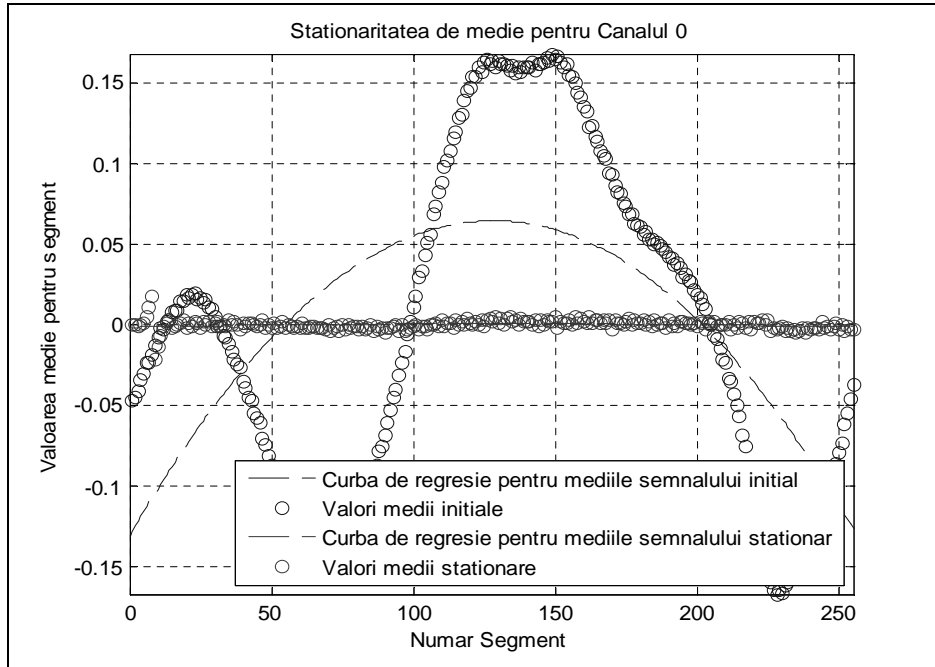


Fig.3.22. Îmbunătățirea fluctuațiilor valorilor medii pentru Semnalul 0 la debitul de 0,35 l/min

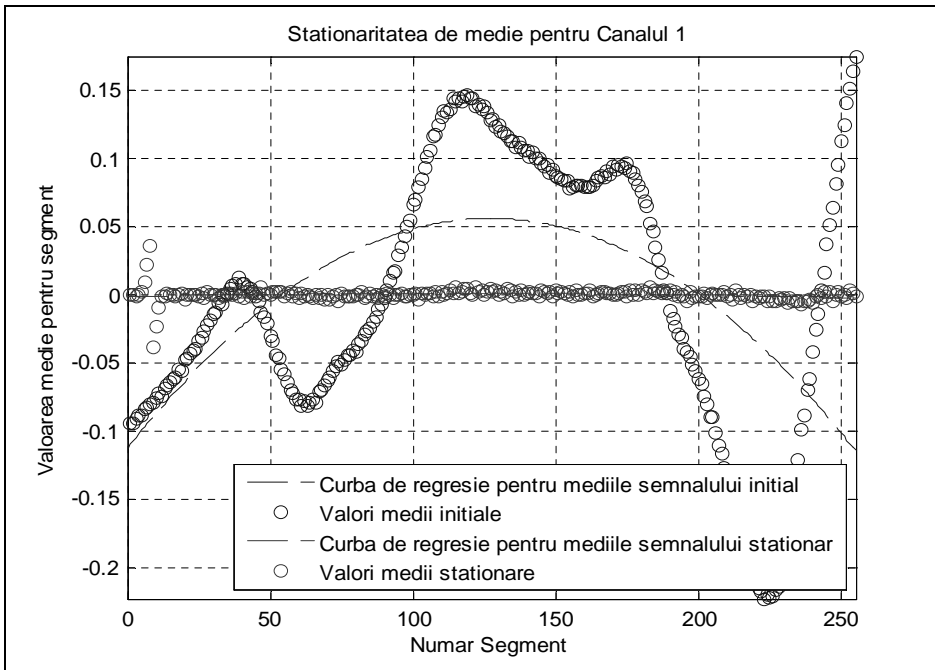


Fig.3.23. Îmbunătățirea fluctuațiilor valorilor medii pentru Semnalul 1 la debitul de 0,35 l/min

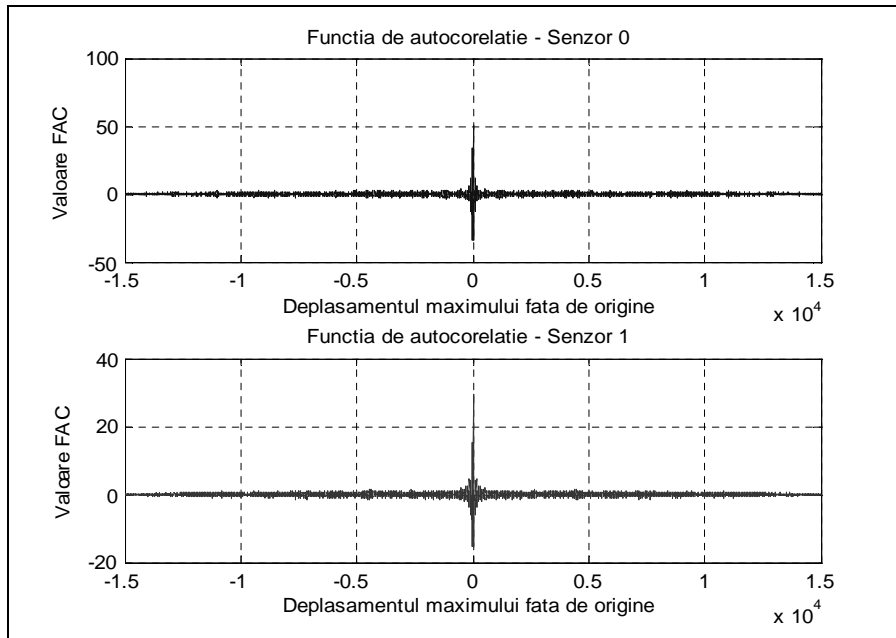


Fig.3.24. Funcțiile de autocorelație după staționarizare pentru  $m = 15000$

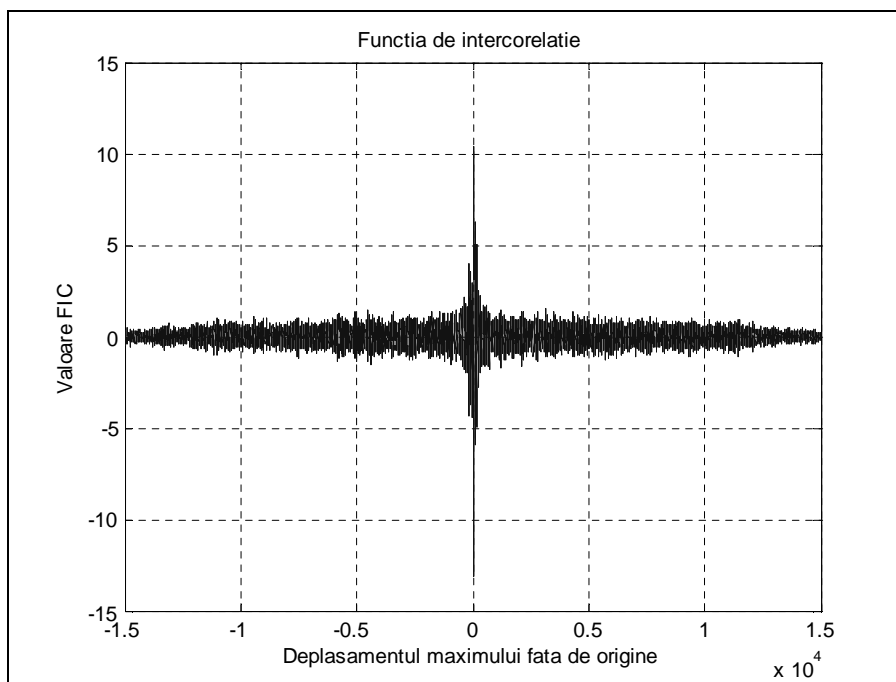


Fig.3.25. Funcția de intercorelație după staționarizare pentru  $m = 15000$

Pentru perechile de semnale aferente debitelor din tabelul 3.1 se vor prezenta intervalele de frecvențe prin eliminarea cărora se pot îndepărta componentele modale.

Se pot constata situații în care, pentru aceeași pereche de semnale, unul dintre semnale se poate staționariza prin filtrarea unui interval diferit față de intervalul pe care se filtrează celălalt semnal. În acest caz, se alege filtrarea ambelor semnale pe intervalul minim. Se acceptă astfel ideea că unul dintre semnale este staționar, iar celălalt este "aproape" staționar.

Îmbunătățirea este evidentă față de situația în care se lucrează cu semnalele brute. Vom introduce notațiile *CSI\_0* și *CSI\_1* pentru coeficienții de staționaritate inițiali și vom nota cu *CSF\_0* și *CSF\_1* coeficienții de staționaritate obținuți după filtrare. *IF* reprezintă intervalul de filtrare detectat automat prin testul de "drum".

Tabelul 3.3. Staționarizarea semnalelor achiziționate, intervale și coeficienți

Debit [l/min]	CSI_0	CSI_1	IF [Hz]	CSF_0	CSF_1
<b>0,20</b>	3	5	0 ÷ 23	104	108
<b>0,25</b>	14	11	0 ÷ 19	82	90
<b>0,35</b>	4	5	0 ÷ 23	96	97
<b>0,85</b>	2	11	0 ÷ 18	74	88
<b>1,06</b>	47	48	0 ÷ 12	75	87
<b>2</b>	21	16	0 ÷ 14	83	96
<b>2,76</b>	4	7	0 ÷ 20	67	94
<b>3,87</b>	34	34	0 ÷ 12	86	85
<b>4,27</b>	56	72	0 ÷ 5	82	90
<b>5,26</b>	41	73	0 ÷ 5	56	89
<b>6,09</b>	58	52	0 ÷ 7	89	72
<b>8,27</b>	21	35	0 ÷ 13	95	91

Prin filtrarea semnalelor pe intervalul *IF* s-a obținut staționarizarea. Evident, semnalele ai căror coeficienți sunt prezentați, nu reprezintă totalitatea măsurărilor efectuate.

Tabelul 3.3 este o ilustrare a faptului că algoritmul testului de "drum" funcționează și că rezultatele obținute prezintă îmbunătățiri semnificative.

### 3.4 Caracterizarea primară, analiza de corelație și analiza spectrală a semnalelor

Puterea semnalelor achiziționate ne poate ajuta să stabilim care dintre cei doi senzori este mai aproape de fisură. Prin studiul puterii unui semnal, putem stabili dacă în momentul achiziționării aceluși semnal, regimul de curgere al apei prin fisură a avut un caracter turbulent sau laminar. Puterile semnalelor captate în regim de curgere laminară au tendința de a avea o lege de variație parabolică. Trebuie efectuată și o analiză spectrală a semnalelor deoarece este de așteptat ca, la fisurile de dimensiuni mici (debite de fisură mici), puterea să fie repartizată mai ales în domeniul frecvențelor înalte, iar la fisurile de dimensiuni mari, puterea să fie repartizată preponderent în domeniul frecvențelor joase.

Pentru a determina puterea totală și repartiția ei în domeniul frecvențelor, introducem termenul de periodogramă a unui semnal [S13]. Periodograma reprezintă densitatea de putere a semnalului repartizată în domeniul frecvență. Putem defini periodograma unui semnal ca fiind pătratul magnitudinii transformatei Fourier discrete, scalată cu numărul de eșantioane din semnal. Pentru un semnal discret  $[x_k]$ , de lungime  $N$  eșantioane ( $N$  fiind un număr par), definim periodograma  $P_m$ :

$$P_m = \frac{1}{N} \cdot |X_m|^2, \quad m = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.17)$$

unde  $X_m$  reprezintă transformata Fourier discretă (DFT) a semnalului  $[x_k]$ . Periodograma rezultată este de lungime  $N$ , fiind simetrică. Dacă valorile lui  $m$  sunt în intervalul  $(N/2+1 \div N-1)$ , atunci  $P_m = P_{N-m}$  [S13]. Puterea totală din semnalul  $[x_k]$  este integrala periodogramei calculate sau aria de sub graficul acesteia, în cazul în care reprezentarea periodogramei se face pentru  $m = 0, 1, \dots, N-1$ . Puterea totală  $E[x_k^2]$  se definește astfel:

$$E[x_k^2] = \frac{1}{N^2} \sum_{m=0}^{N-1} |X_m|^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} P_m \quad (3.18)$$

Dacă reprezentarea  $P_m$  se face pentru intervalul  $m = 0, 1, \dots, N/2$ , pentru calculul puterii totale apare o dublare a valorilor periodogramei din acest interval.

Pentru a obține o acuratețe îmbunătățită a calculului, pentru semnalele aleatoare staționare se utilizează periodograma mediată. Semnalul inițial se împarte în segmente de lungimi egale, iar pentru fiecare segment în parte, se calculează periodograma. Pentru îmbunătățiri suplimentare, segmentele pot fi înmulțite cu o fereastră de ponderare (de exemplu Hamming) [S13]. În final, se mediază periodogramele obținute. Segmentele în care se împarte semnalul inițial pot fi unul în continuarea altuia sau suprapuse. Factorul de suprapunere utilizat cu precădere este de 50% [S13].

O metodă utilizată pentru calculul periodogramelor în cazul semnalelor aleatoare staționare este metoda Welch (Periodogram Method for Power Spectrum Estimation) [S13], [I7]. Semnalul  $[x_k]$  se împarte în  $K$  segmente de lungime  $L$ . Fiecare segment se înmulțește cu o fereastră de ponderare  $f_L[k]$ . Media celor  $K$  periodograme rezultate se definește astfel:

$$\hat{S}_{xx}^W(e^{j\Omega}) = \frac{1}{K \cdot A} \sum_{i=1}^K \frac{1}{L} \cdot \left| \sum_{k=0}^{L-1} x_i[k] \cdot f_L[k] \cdot e^{-j\Omega k} \right|^2 \quad (3.19)$$

În Fig.3.26 și Fig.3.27 se prezintă periodogramele semnalelor achiziționate, după procesul de staționarizare. Ele sunt calculate prin metoda Welch, pe segmente de lungime de 1024 eșantioane, cu o suprapunere de 50%.



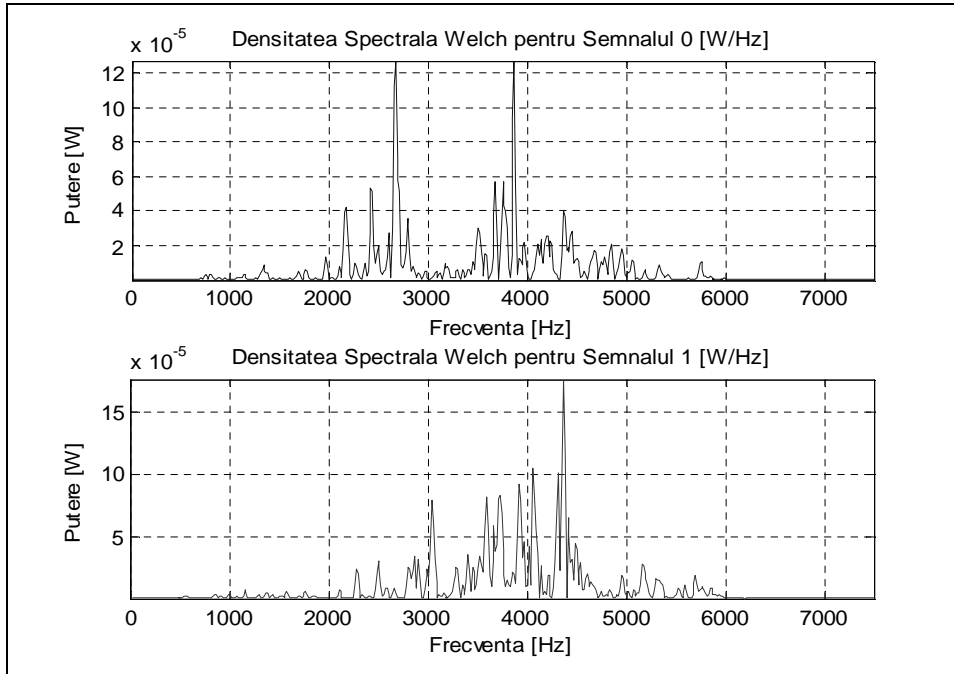


Fig.3.26. Densitatea spectrală pentru semnale staționare la debitul de 8,27 l/min

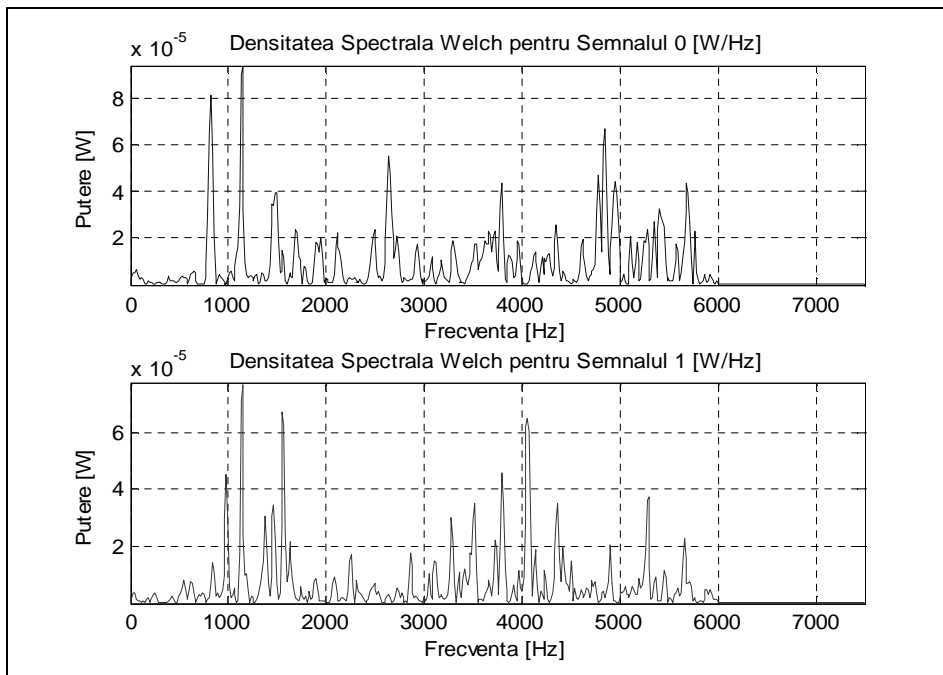


Fig.3.27. Densitatea spectrală pentru semnale staționare la debitul de 2,76 l/min

În continuare, se studiază dependența puterii totale a semnalelor în funcție de debitul din fisură. După cum rezultă din tabelul 3.1, pentru a achiziționa corect semnalele, amplificarea acestora s-a făcut cu valori de 60 dB, 40 dB și 20 dB. Dependența puterii totale în funcție de debit trebuie analizată pentru semnalele care au aceeași amplificare.

Tabelul 3.4 arată puterile totale  $E_0$  și  $E_1$ , pentru semnalele achiziționate și staționarizate, după ajustarea amplificării. Pentru a avea semnalele staționarizate, iar intervalul de filtrare pentru staționarizare să fie unitar, vom calcula puterea semnalelor în intervalul (20÷6000) Hz. Puterea totală poate fi calculată în domeniul timp sau frecvențe, iar rezultatele trebuie să fie egale, conform teoremei lui Parseval. Putem obține puterea totală a unui semnal și prin intermediul funcției de autocorelație (FAC) [S13], [B6]. În domeniul frecvențe, puterea totală reprezintă aria de sub periodograma calculată. Obținem valoarea puterii prin înmulțirea sumei valorilor periodogramei  $P_m$  cu rezoluția unei linii spectrale. Valorile puterilor din tabelul 3.4 au fost calculate pe baza periodogramelor obținute prin metoda Welch. Aceste puteri sunt calculate pentru o singură pereche de semnale măsurate la debite diferite. Pentru moment, suntem interesați în obținerea unei evoluții a puterii totale a semnalelor în funcție de debitul de curgere la fisură. Debitul minim ales este cel de 0,85 l/min. Pentru debite extrem de reduse, puterile totale ale semnalelor devin extrem de mici, iar acuratețea măsurărilor este mai scăzută. Chiar și așa, tabelul 3.4 arată că numai în cazul măsurării 7, puterea totală a semnalului achiziționat de senzorul 0 este mai mare decât puterea semnalului achiziționat de senzorul 1. Aceste cazuri pot să apară datorită perturbațiilor nedorite din cadrul sistemului. Pentru a evidenția concluzia că unul dintre senzori este mai apropiat de fisură, se arată dependențele acestor puteri totale față de debitul din fisură.

Tabelul 3.4. Evoluția puterii totale pentru cele două canale în funcție de debitul din fisură

Măsurarea	Debit [l/min]	$E_0$	$E_1$
<b>4</b>	<b>0,85</b>	0.09	4.80
<b>5</b>	<b>1,06</b>	1.11	1.02
<b>6</b>	<b>2</b>	2.96	3.21
<b>7</b>	<b>2,76</b>	11.01	9.61
<b>8</b>	<b>3,87</b>	13.36	16.83
<b>9</b>	<b>4,27</b>	41.79	65.84
<b>10</b>	<b>5,26</b>	228.35	338.38
<b>11</b>	<b>6,09</b>	128.85	179.52
<b>12</b>	<b>8,27</b>	534.80	924.85

În Fig.3.28 se observă evoluția ascendentă a curbelor de regresie pe măsură ce debitul din fisură crește. După cum reiese din valorile puterilor totale prezentate în tabelul anterior, dar și din evoluția curbelor de regresie, semnalul 1 are, în majoritatea cazurilor, o putere mai mare. Putem trage concluzia că senzorul 1 este mai aproape de fisură. Atenuarea puterii semnalului pe măsură ce distanța față de fisură crește este mai accentuată.

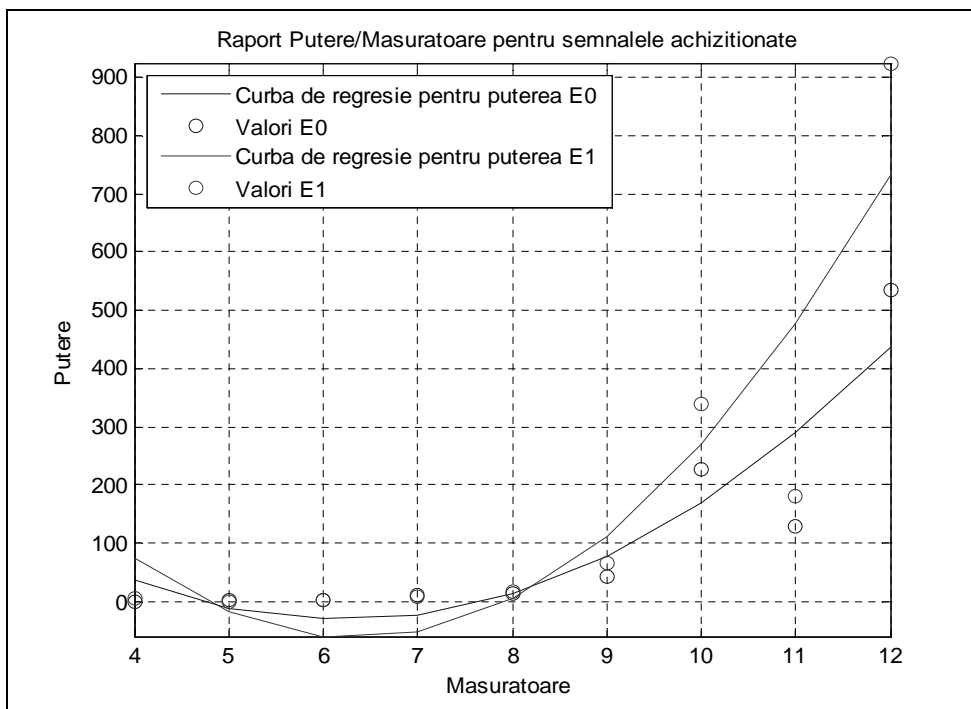


Fig.3.28. Evoluția puterii totale pentru cele două canale în funcție de debitul la fisură

Dacă studiem puterea totală a unor perechi de semnale achiziționate la același debit, remarcăm faptul că, deși puterea totală scade în timp (acest fapt se datorează fluctuațiilor în alimentarea conductei), semnalele achiziționate prin intermediul senzorului 1, rămân ca valoare a puterii, deasupra semnalelor achiziționate prin intermediul senzorului 0.

Pentru a studia raportul puterilor totale în cazul unor semnale măsurate la același debit, alegem măsurarea 6. Debitul este de 2 l/min și amplificarea este de 20 dB. Pentru acest debit s-au înregistrat 5 perechi de semnale. Puterile totale pentru aceste semnale sunt prezentate în tabelul 3.5. Remarcăm puterea totală mai mare a semnalelor măsurate de senzorul care este mai apropiat de fisură.

Tabelul 3.5. Puteri totale pentru semnalele staționarizate la, debitul de 2 l/min

Perechea	$E_0$	$E_1$
1	5.02	7.25
2	6.44	8.69
3	4.21	4.71
4	3.59	3.95
5	3.13	3.41

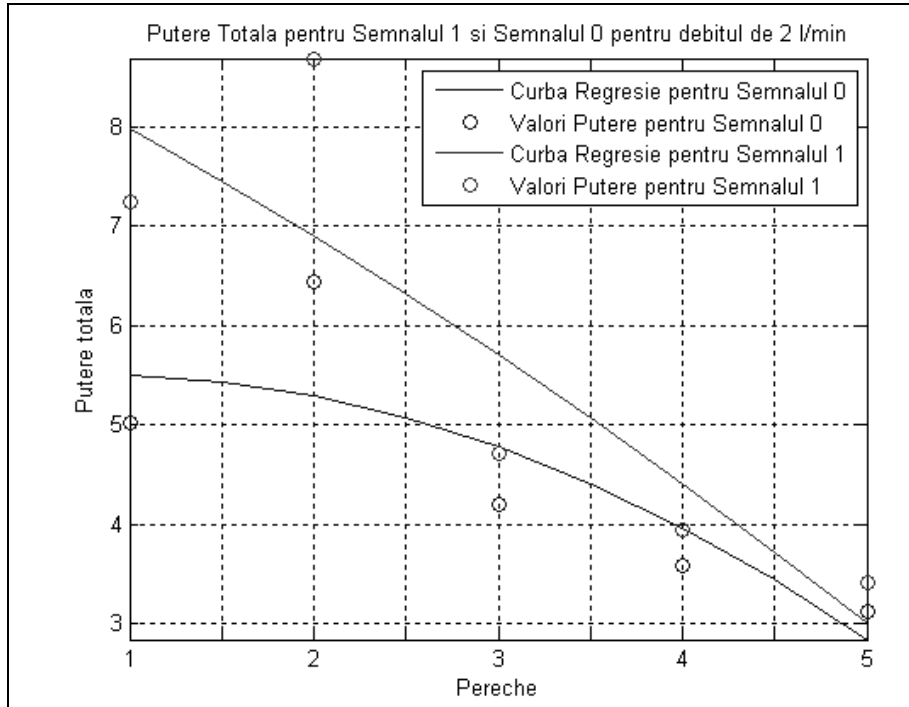


Fig.3.29. Evoluția puterii totale pentru semnalele staționare la debitul de 2 l/min

Un indiciu despre apropierea sau depărtarea unui senzor față de fisură se poate deduce și din faza densității spectrale de putere mutuală (*cross power spectral density*) [K3].

În funcție de panta pozitivă sau negativă a unghiului acestei faze, putem aprecia dacă întârzierea între cele două semnale este pozitivă sau negativă (fapt evidențiat în relația 3.12). Prin calculul densității spectrale de putere mutuală pe secvențe infinite de lungi, zgomotele nedorite, necorelate dispar.

Dacă presupunem că viteza de propagare (prin materialul conductei), a zgomotelor de fisură rămâne constantă, panta negativă a fazei densității spectrale de putere mutuală indică o întârziere pozitivă [K3].

Putem obține valoarea densității spectrale de putere mutuală prin aplicarea transformării Fourier asupra funcției de intercorelație. Ordinea semnalelor în calculul funcției de intercorelație este importantă.

În cazul nostru, calculul funcției de intercorelație a fost făcut între semnalele achiziționate de senzorul 0 și cele achiziționate de senzorul 1. Întârzierea indicată de calculul FIC trebuie să fie pozitivă deoarece senzorul 1 este plasat mai aproape de fisură, zgomotul de fisură ajungând mai rapid la el.

Pentru a exemplifica utilitatea studierii fazei densității spectrale de putere mutuală, considerăm două semnale de tip zgomot, simulate cu ajutorul programului Matlab (Fig.30).

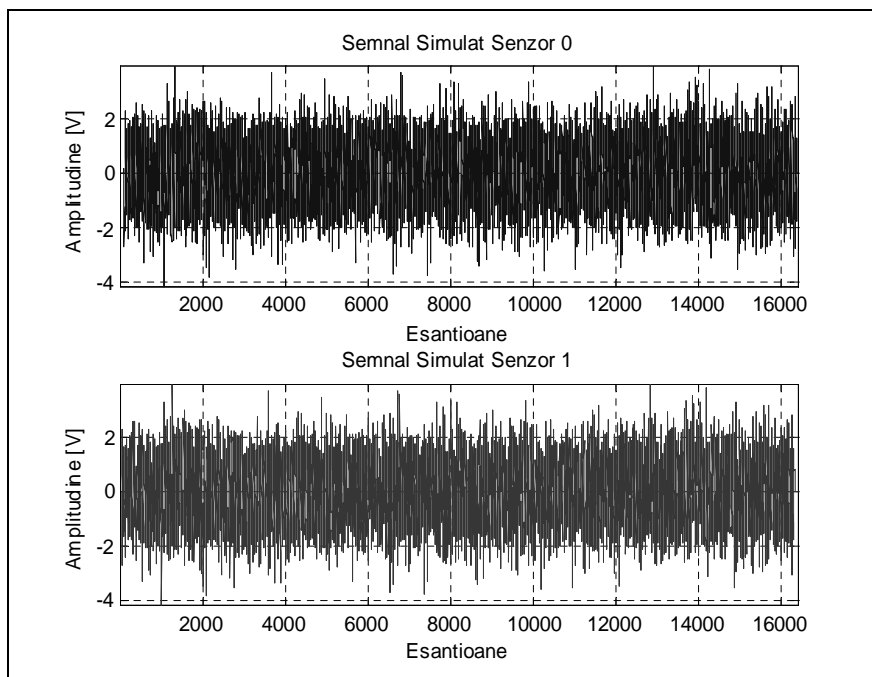


Fig.30. Semnale simulate de tip zgomot

Aceste semnale au o parte comună (aceleași valori ale amplitudinii) astfel încât să respecte condiția că provin de la aceeași sursă. Apariția acestei părți comune în semnalul simulat 0 este întârziată cu 64 de eșantioane tocmai pentru a se simula diferența timpilor de propagare. Semnalele au o lungime de 16384 eșantioane, frecvența de eșantionare fiind  $f_E = 1$  kHz.

Codul programului utilizat pentru generarea celor două semnale simulate este:

```

Fs = 1000;
Ts = 1/Fs;
t = 0:Ts:16.383;
R = randn(1,16300); %Generez un sir aleator din care lipsesc 16 esantioane.
x = [zeros(1,74),R,zeros(1,10)]; %Senzorul 0 mai depărtat de fisură
y = [zeros(1,10),R,zeros(1,74)]; %Senzorul 1 mai apropiat de fisură

```

În cazul simulării celor două semnale, FIC calculată prezintă deplasamentul de 64 eșantioane și un aspect foarte clar (Fig.3.31). Acest fapt este posibil datorită lipsei zgomotelor perturbatoare, semnalele inițiale fiind simulate. Calculul factorului de calitate pentru funcția de intercorelație din Fig.3.31 nu a fost efectuat. Aspectul foarte clar al funcției dovedește că nu este nevoie de o îmbunătățire suplimentară la nivel de calitate a reprezentării. Densitatea spectrală a semnalelor simulate prezintă frecvențe bine definite în întreaga bandă de frecvențe (Fig.3.32). Acest lucru se observă și dacă privim reprezentarea densității spectrale de putere mutuală și o

comparăm cu densitatea spectrală de putere mutuală calculată pentru semnalele măsurate (Fig.3.35). Întârzierea între cele două semnale simulate și faptul că semnalul 1 este mai apropiat de sursa de zgomot se observă din Fig.3.34. În figurile 3.35 și 3.36 se prezintă evoluția pantei fazei densității spectrale de putere mutuală pentru semnalele reale, provenite de la fisură la debite de 6,09 l/min și 0,20 l/min.

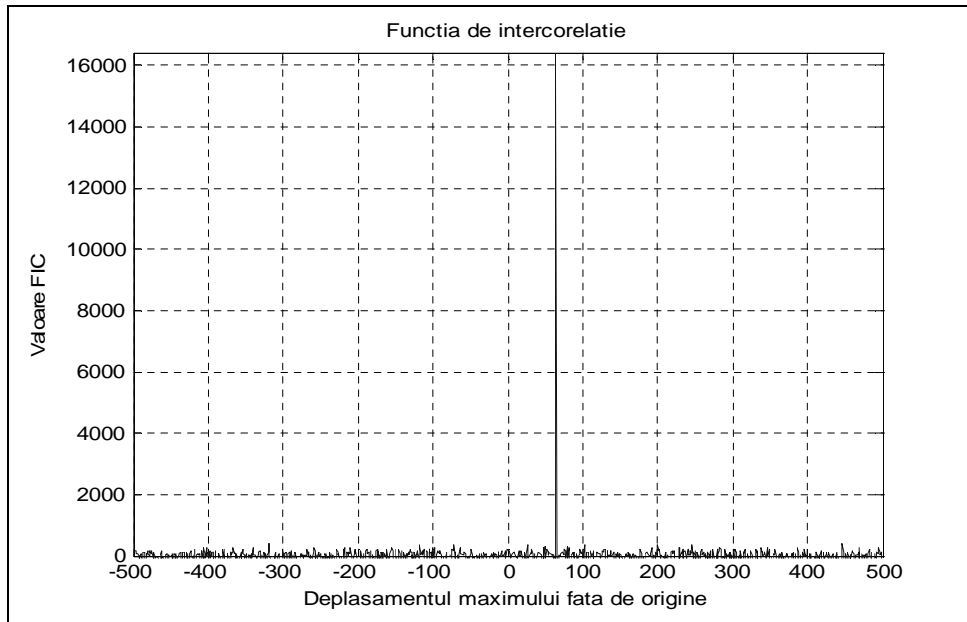


Fig3.31. Funcția de intercorelație între semnalele simulate de tip zgomot

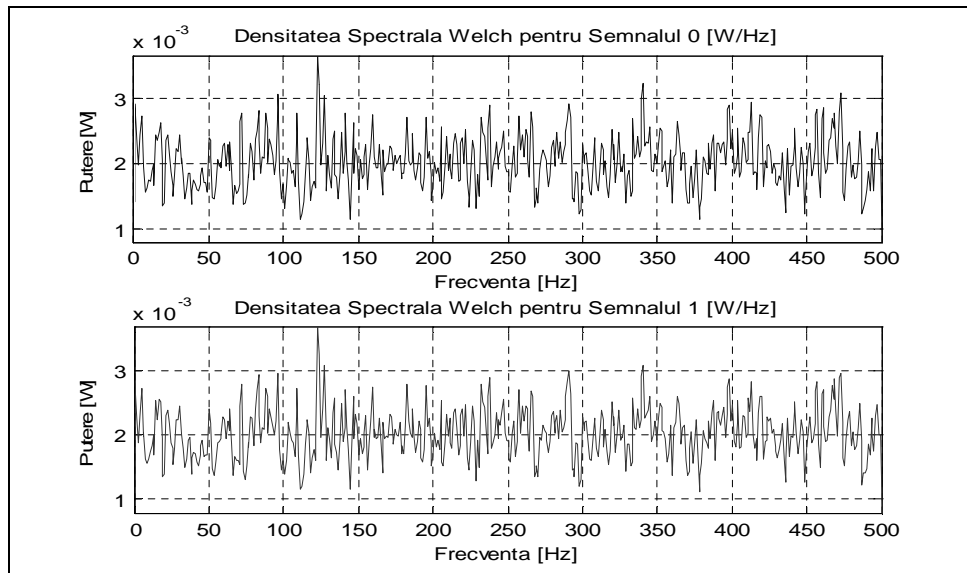


Fig 3.32. Densitatea spectrală pentru semnale simulate

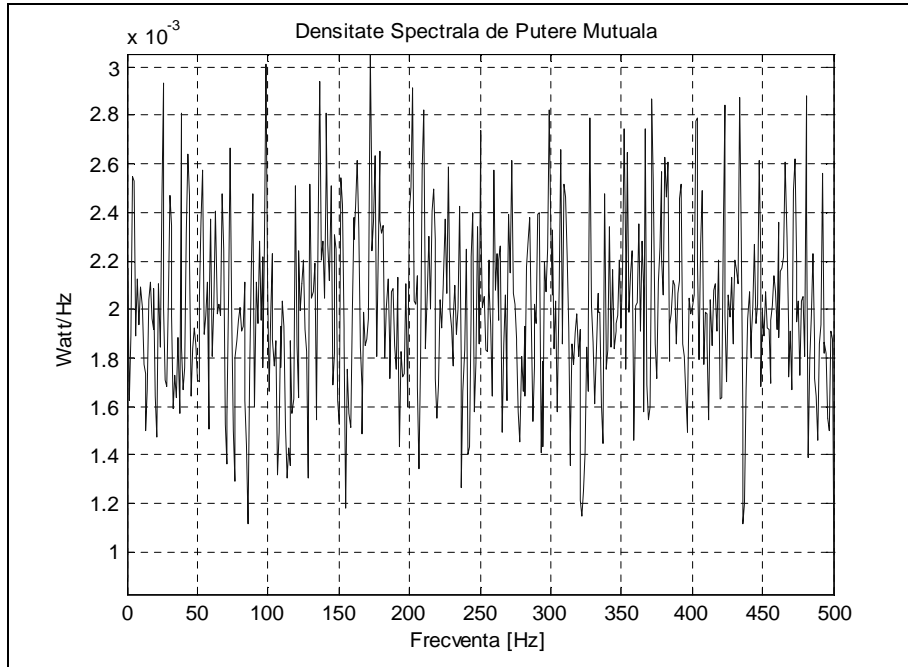


Fig.3.33. Densitatea Spectrală de Putere Mutuală între semnalele simulate

Panta fazei densității spectrale de putere mutuală prezintă o evoluție descrescătoare (Fig.3.34).

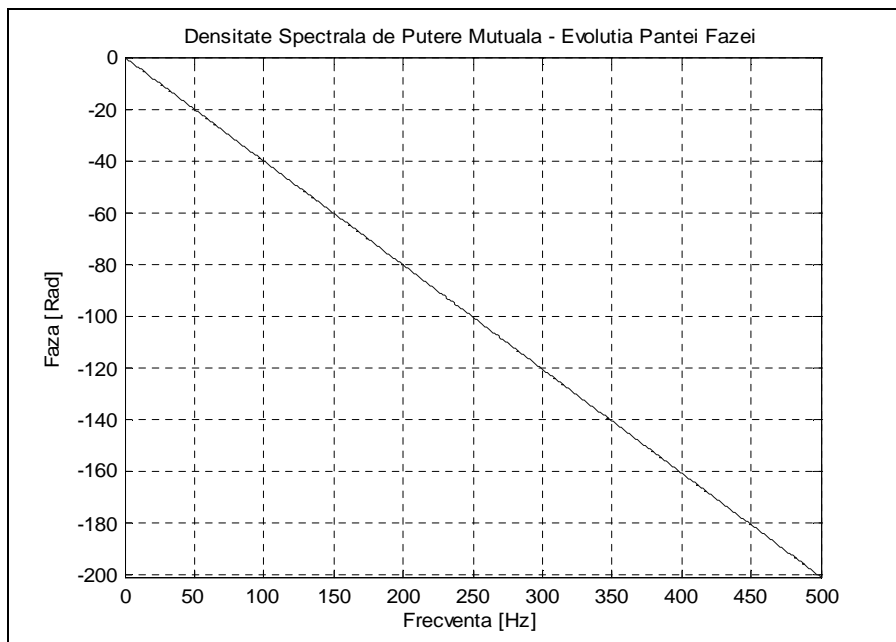


Fig.3.34. Evoluția negativă a pantei (întârziere pozitivă) pentru semnalele simulate

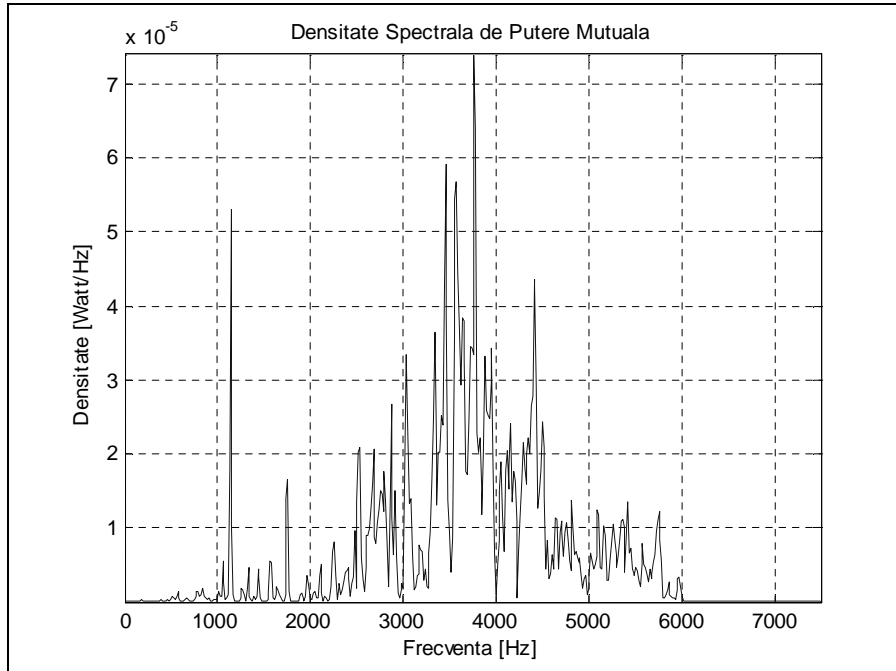


Fig.3.35. Densitatea Spectrală de Putere Mutuală la debitul de 6,09 l/min

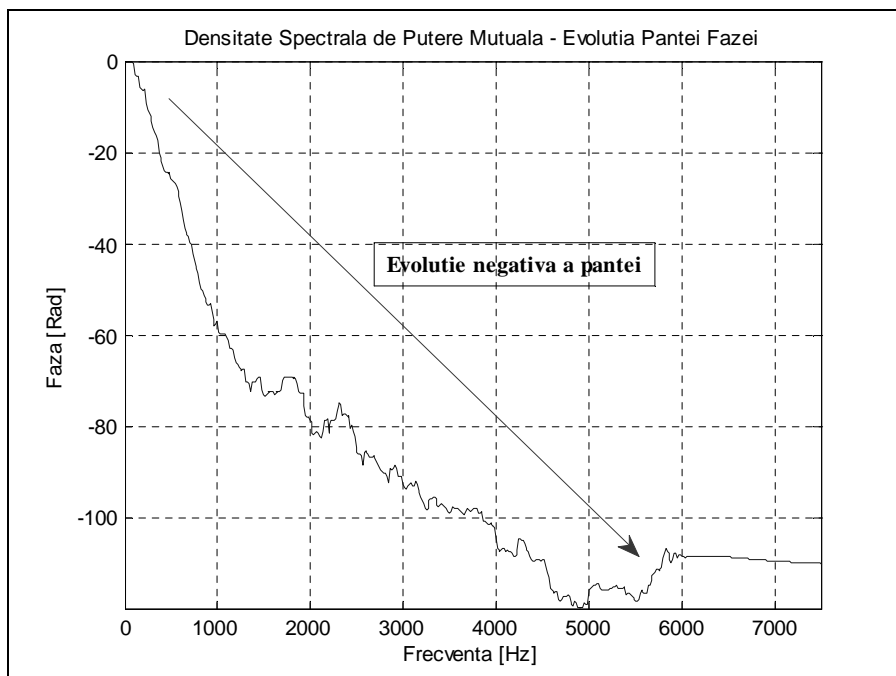


Fig.3.36. Evoluția negativă a pantei (întârziere pozitivă) la debitul de 6,09 l/min



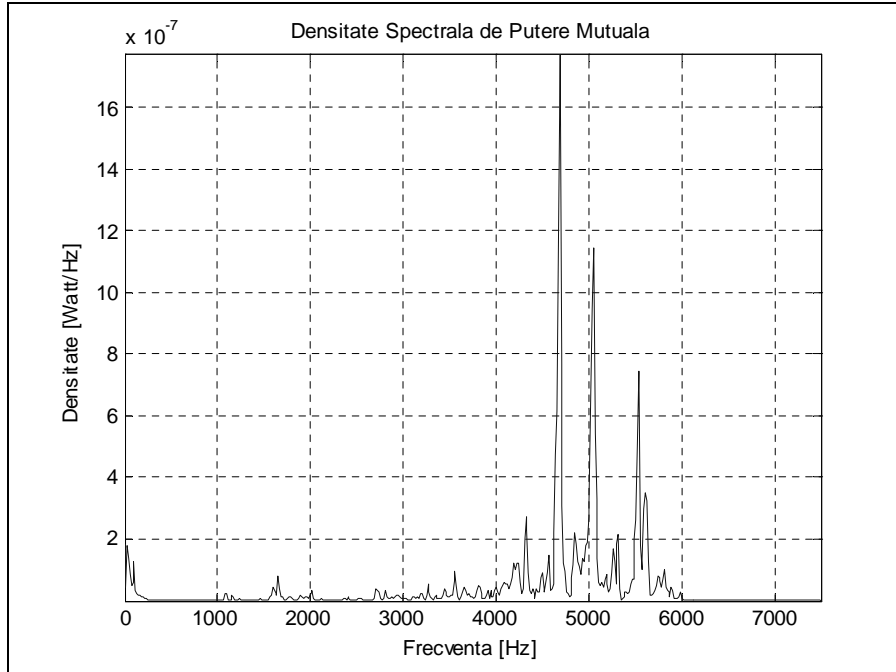


Fig.3.37. Densitatea Spectrală de Putere Mutuală la debitul de 0,20 l/min

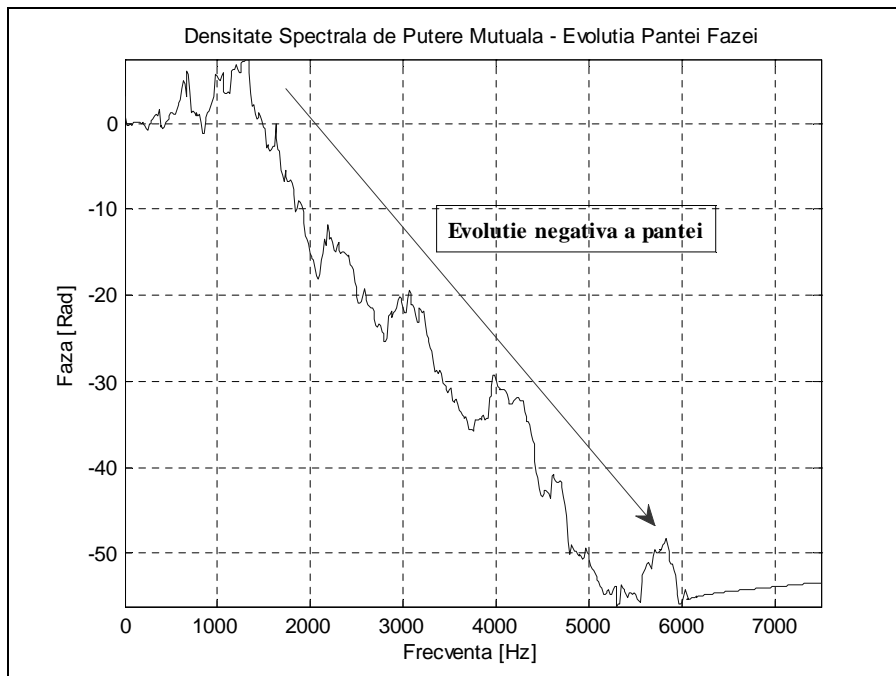


Fig.3.38. Evoluția negativă a pantei (întârziere pozitivă) la debitul de 0,20 l/min

Din studiul repartizării puterii totale la nivelul senzorilor, dar și din reprezentarea evoluției pantei fazei pentru densitatea spectrală de putere mutuală, putem trage concluzia că senzorul 1 este cel mai apropiat de fisură. Studiul este util în cazul real în care nu cunoaștem distanțele între senzori și fisură și vine în sprijinul calculului deplasamentului FIC. Putem considera că puterea totală la nivelul senzorilor și evoluția pantei fazei pentru densitatea spectrală de putere mutuală sunt indicatori suplimentari care verifică dacă poziționarea maximului FIC față de origine este corectă.

În cazul unei perechi de semnale măsurate la debitul de 0,20 l/min (debit redus) se remarcă caracterul descrescător al evoluției pantei fazei densității spectrale de putere mutuală. Rezultatele sunt prezentate în Fig.3.37 și Fig.3.38.

### 3.5 Concluzii

Capitolul prezintă, în prima parte, o colecție de semnale măsurate la o conductă cu o fisură simulată prin intermediul unui robinet (Fig.3.1). Prin conductă circulă apă menajeră de la rețeaua de distribuție. Prin închiderea și deschiderea robinetului care simulează fisura (Fig.3.2), se generează în materialul conductei și în apa care circulă în interior, zgomotele specifice acestei surse de zgomot. Conducta utilizată prezintă un capăt obturat datorită necesității asigurării unei presiuni interioare suficientă pentru dezvoltarea aplicației. Cazul localizării unei fisuri pe o porțiune de conductă obturată reprezintă o practică întâlnită care poartă denumirea de "testare pas cu pas" (*step testing*).

Datorită faptului că fișierele achiziționate acoperă 8,73 secunde de curgere a apei prin fisură, apar scăderi de presiune în conductă, în special la debite mari (Fig.3.6). Această scădere a presiunii din conductă afectează viteza de deplasare a sunetului prin material. În vederea înlăturării acestui impediment, analiza semnalelor se face atât pe secvențe mari (unde sunt cuprinse aceste căderi de presiune), cât și pe secvențe foarte scurte (unde evităm aceste căderi de presiune). În momentul analizării semnalelor pe secvențe foarte mici (de exemplu 512 eșantioane), surprindem porțiuni în care putem presupune că viteza de deplasare a zgomotelor de fisură prin conductă rămâne constantă sau că presiunea este constantă. În cazul debitelor reduse, problema căderii presiunii din conductă are un efect minim asupra prelucrărilor. Practic, putem spune că acest impediment apare datorită dimensiunilor reduse ale instalației experimentale.

Caracteristicile instalației experimentale sunt studiate și prin funcțiile pondere și de transfer. Pentru acest studiu s-a propus utilizarea unei metode neconvenționale de identificare a modelului experimental. Metoda are caracter neconvențional datorită faptului că semnalul de intrare nu este cunoscut. În ceea ce privește funcțiile de transfer ale modelului experimental, s-au dedus formule empirice. Se remarcă faptul că în literatura de specialitate [B6] se acceptă ideea că zgomotele din mediu perturbatoare care intervin peste semnalele utile sunt necorelate. Această ipoteză nu este valabilă în condițiile în care instalațiile experimentale sunt de dimensiuni reduse. Astfel, se propune un model nou pentru instalația experimentală, model care asigură corelarea între perturbațiile prezente.

Pe lângă precizarea condițiilor experimentale și prezentarea instrumentelor tehnice utilizate pentru achiziționarea semnalelor, în această primă parte a lucrării se aduce în discuție prezența unor componente periodice (modale) care provin din oscilațiile modale ale conductei și se suprapun peste vibrațiile cauzate de fisură.

Prezența componentelor periodice trebuie înlăturată. Semnalele achiziționate la debite mici sunt puternic afectate de către aceste componente modale (Fig.3.18, Fig.3.19, Fig.3.20). Influența acestor componente asupra funcțiilor de corelație (FAC) și intercorelație (FIC) este negativă. Nu se poate realiza o localizare corectă în condițiile caracterului nestaționar al semnalelor.

Pentru eliminarea problemei nestaționarității semnalelor s-au implementat o serie de programe care aplică în mod automat testul de "drum". În cadrul Anexei 1 se poate vedea un sub instrument virtual implementat cu scopul aplicării automate a testului de drum (Coeficienti\_Stationaritate.vi). Coeficientul de staționaritate al semnalelor, determinat automat de către programele implementate, trebuie să se încadreze în limitele intervalului  $(86 \div 115)$  [B6]. Prin eliminarea unor frecvențe joase din cadrul semnalelor, reducerea influenței componentelor periodice este evidentă (Fig.3.24, Fig.3.25). Acest fapt este dovedit prin tabele și imaginile prezentate. Prin această eliminare a componentelor modale din cadrul semnalelor, îmbunătățirile aduse în ceea ce privește reprezentarea FAC și FIC se pot remarca în reprezentările celor două funcții. Prin filtrarea automată a componentelor introduse de vibrațiile sistemului, semnalele devin cvasi staționare și pot fi utilizate în vederea procesului de localizare. Un aspect important este acela că eliminarea unor frecvențe pentru staționarizarea semnalelor trebuie să se facă pe un interval minim. În următoarele calcule se vor utiliza semnalele staționarizate.

Analiza spectrală este o etapă importantă în prelucrarea semnalelor având ca scop localizarea surselor de zgomot. Un studiu al repartizării puterii semnalelor în funcție de fiecare senzor, poate indica față de care canal este mai apropiată sursa de zgomot (fisura).

Studiul puterii semnalelor atât în funcție de debitul din fisură, cât și pentru același debit, indică apropierea mai pronunțată (față de fisură) a senzorului 1. Chiar dacă studiem puterea totală a unor perechi de semnale achiziționate la același debit, remarcăm faptul că semnalele achiziționate prin intermediul senzorului 1, rămân ca valoare a puterii, mai mari decât semnalele achiziționate prin intermediul senzorului 0. În cazul experimentelor efectuate cunoaștem repartizarea senzorilor față de fisură. În cazul în care nu am cunoaște această repartizare (cazul în care conducta ar fi îngropată), prin analiza spectrală a semnalelor, putem trage concluzia că senzorul 1 este mai aproape de fisură.

Se studiază faza densității spectrale de putere mutuală. Panta pozitivă sau negativă a unghiului acestei faze arată dacă întârzierea dintre cele două semnale este pozitivă sau negativă. Valoarea negativă a pantei sugerează faptul că întârzierea între cele două semnale este pozitivă. Studiul evoluției pantei unghiului acestei faze confirmă calculul corect al funcțiilor de intercorelație.

## 4. STUDIUL DINAMICII SENZORILOR

### 4.1 Timpul de stabilire generalizat

Timpul de stabilire (timp de răspuns, settling time, Einschwingzeit) este cel mai important parametru pentru caracterizarea comportării dinamice a sistemelor în domeniul timp. În mod obișnuit, acest parametru numit și durată a regimului tranzitoriu, se definește pe baza răspunsului sistemelor liniare la semnal treaptă. Totuși, în literatura de specialitate este cunoscută și o generalizare timpului de stabilire, astfel încât această mărime să se poată determina în mod unitar atât pentru semnale deterministe cât și pentru semnale aleatoare.

În acest capitol se folosește timpul de stabilire generalizat pentru caracterizarea comportării dinamice a senzorilor. Utilizarea timpului de stabilire generalizat este necesară deoarece semnalele provenind de la sursele de zgomot au în general un caracter aleator sau mixt (semnal aleator suprapus aditiv peste un semnal determinist). Această analiză este importantă pentru că, înainte de aplicarea oricărei metode de prelucrare, calitatea semnalelor captate de senzori este esențială.

Conform definiției clasice, timpul de stabilire este intervalul scurs dintre momentul aplicării unui semnal treaptă la intrarea unui sistem, până în momentul în care răspunsul sistemului intră și rămâne într-o anumită bandă de eroare [R2]. Timpul de stabilire este cel mai important parametru utilizat pentru caracterizarea comportării dinamice a sistemelor în domeniul timp [K4].

Pornind de la faptul că definiția clasică, bazată pe forma de undă de la ieșirea sistemelor, nu se aplică și regimurilor tranzitorii aleatoare, în literatură s-a introdus o generalizare a timpului de stabilire [I12], [I13], [I4]. Astfel, timpul de stabilizare generalizat,  $T$ , se poate determina conform relației :

$$1 - \varepsilon\% \leq \sqrt[n]{\frac{m_{Yn}(T)}{m_{Yn}(\infty)}} \leq 1 + \varepsilon\% \quad (4.1)$$

în care mărimile

$$m_{Yn}(T) = E\{y^n(T)\} \quad \text{și} \quad m_{Yn}(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} E\{y^n(t)\}$$

sunt momentele statistice de ordinul  $n$  ale semnalului de ieșire [P1]. Semnificația dublei inegalități din (4.1) este că valoarea finală a radicalului poate fi aproximată prin eroare negativă sau pozitivă  $\pm \varepsilon\%$  : timpul de stabilire generalizat,  $T$ , corespunde momentului când radicalul din (4.1) intră definitiv în banda de aproximare  $1 \pm \varepsilon\%$ . Un semnal determinist poate fi privit ca un proces aleator degenerat, în sensul că are toate realizările identice [I13]. Astfel, în cazul determinist, în relația (4.1) trebuie considerat  $n$  momentul statistic de ordinul  $n = 1$ , care reprezintă însăși valoarea semnalului. Relația (4.1) devine:

$$1 - \varepsilon\% \leq \frac{y(T)}{y(\infty)} \leq 1 + \varepsilon\% \quad (4.2)$$

unde eroarea se alege de obicei  $\varepsilon\% = 5\%$ .

Pentru a ilustra determinarea timpului de stabilire conform relațiilor (4.1) și (4.2), se poate considera un sistem simplu de ordinul unu, de tipul unui filtru RC trece-jos, descris prin ecuația diferențială:

$$\frac{dy(t)}{dt} + a \cdot y(t) = a \cdot x(t); \quad a = \frac{1}{RC} \quad (4.3)$$

În (4.3),  $a^{-1} = RC$  reprezintă constanta de timp a circuitului iar  $x(t)$  și  $y(t)$  sunt tensiunile de intrare și de ieșire. Dacă la intrarea circuitului descris de ecuația (4.3), aflat în condiție inițială nulă,  $y(0) = 0$ , se aplică o treaptă ideală de tensiune

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{for } t < 0 \\ U & \text{for } t \geq 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

tensiunea tranzitorie de ieșire are expresia [R2]:

$$y(t) = U \cdot (1 - e^{-at}); \quad t \geq 0 \quad (4.5)$$

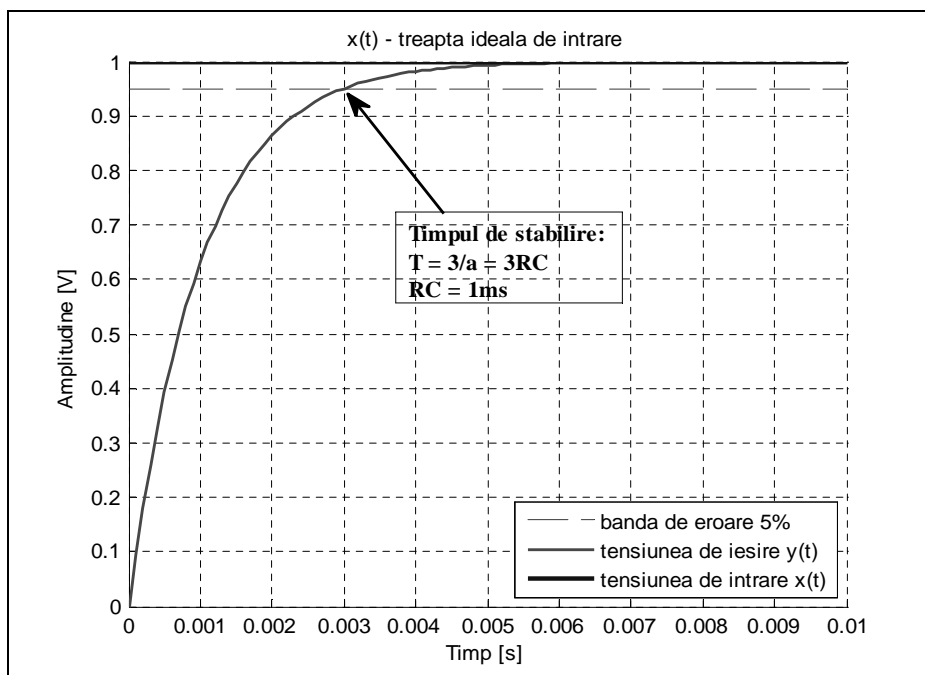


Fig.4.1 Timpul de stabilire pentru cazul determinist pur

Aplicarea relației (4.2) pentru  $\varepsilon\% = 5\%$  conduce în acest caz la ecuația:

$$\frac{y(T)}{y(\infty)} = 1 - e^{-aT} = 0.95 \quad (4.6)$$

Din (4.6) rezultă timpul de stabilire, ca durată practică a regimului tranzitoriu. Conform unui rezultat cunoscut din cazul determinist, regimul tranzitoriu

durează „practic” trei constante de timp:  $T = 3/a = 3 \cdot RC$ . Cazul este ilustrat grafic în Fig.4.1. Teoretic, durata regimului tranzitoriu este infinită.

În cazul în care semnalul de intrare are o componentă aleatoare sau este aleator pur, definirea timpului de stabilire pe baza formei de undă nu este posibilă. Altfel spus, în formula (4.1) nu este suficient să se considere  $n = 1$  ci trebuie să se ia  $n \geq 2$ . Pentru simplitate, este bine să se considere  $n = 2$ , caz în care în formula (4.1) intervine un profil al funcției de autocorelație a procesului de ieșire

$$m_{Y2}(t) = C_Y(t, t) + m_Y^2(t) = \sigma_Y^2(t) + m_Y^2(t) \quad (4.7)$$

În relația (4.7)  $m_Y(t) = m_{Y1}(t)$  reprezintă valoarea medie a procesului de ieșire (de ordinul 1),  $C_Y(t, t) = C_Y(t_1, t_2) | t_1 = t_2 = t$  este profilul funcției de autocovarianță a procesului de ieșire intersectat cu planul  $t_1 = t_2 = t$  (Fig.4.4 și Fig.4.5). Acest profil este identic cu varianța  $\sigma_Y^2(t)$  a procesului de ieșire. Similar  $m_{Y2}(t) = R(t_1, t_2) | t_1 = t_2 = t$  este profilul funcției de autocorelație a procesului de ieșire intersectat cu același plan,  $t_1 = t_2 = t$ .

Ținând seama de (4.7), pentru  $n = 2$  și  $\varepsilon\% = 5\%$ , relația (4.1) de calcul a timpului de stabilire generalizat, devine:

$$0.95 \leq \sqrt{\frac{\sigma_Y^2(T) + m_Y^2(T)}{\sigma_Y^2(\infty) + m_Y^2(\infty)}} \leq 1.05 \quad (4.8)$$

În cazul unui regim tranzitoriu determinist, varianța este nulă,  $\sigma_Y^2(t) = 0$  iar  $m_Y(t) = y(t)$ . Astfel relația (4.8) este echivalentă cu (4.6). Cazul unui regim

tranzitoriu pur aleator se tratează în continuare.

Pentru simplitate se consideră din nou circuitul descris de ecuația (4.3) aflat în condiție inițială nulă,  $y(0) = 0$ , iar la intrarea lui acționează pentru  $t \geq 0$  procesul aleator staționar  $x(t)$ , cu funcția de autocorelație

$$R_X(\tau) = \frac{B}{2} \cdot e^{-b|\tau|}; \quad b > 0 \quad (4.9)$$

Funcția de autocorelație (4.9) corespunde unui proces de tipul zgomot alb cu bandă limitată [P1] care pentru  $B = b \rightarrow \infty$  tinde să devină un zgomot alb pur:  $R_X(\tau) \rightarrow \delta(\tau)$ . În Fig.4.2 se prezintă 200 de realizări ale unui astfel de proces centrat (adică având  $m_X(t) = 0$ ) și de varianță  $\sigma_X = 1$ . Fiecare realizare conține zece eșantioane generate cu funcția *randn* din Matlab, la o perioadă de eșantionare de  $10\mu s$ . În Fig.4.3 se prezintă 200 de realizări ale procesului de ieșire, fiecare cuprinzând câte 200 de eșantioane. Sistemul și procesul de intrare s-au definit prin

următorii parametri:  $R = 100 \text{ k}\Omega$ ;  $C = 10 \text{ nF}$ ;  $B = b = 10 \cdot a = 10/(RC)$ . De menționat că egalitatea  $B = b$  este numai numerică, cele două constante având dimensiuni diferite ( $\text{V}^2$  respectiv  $\text{rad/s}$ ). În Fig.4.3 se poate observa comportarea tranzitorie a procesului de la ieșirea sistemului, caracterizată de creșterea în timp a varianței.

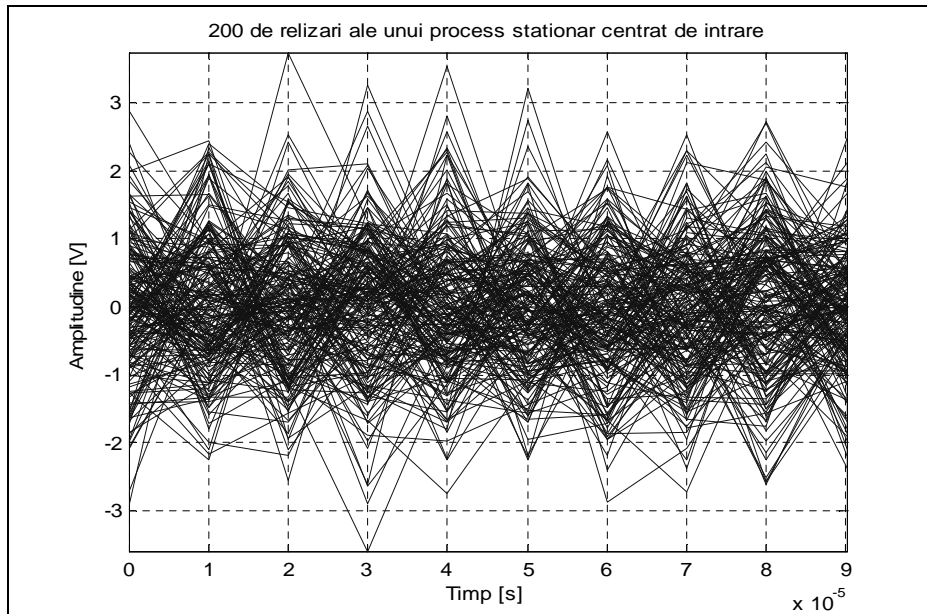


Fig.4.2 Realizări suprapuse ale unui proces staționar centrat de tipul zgomotului alb

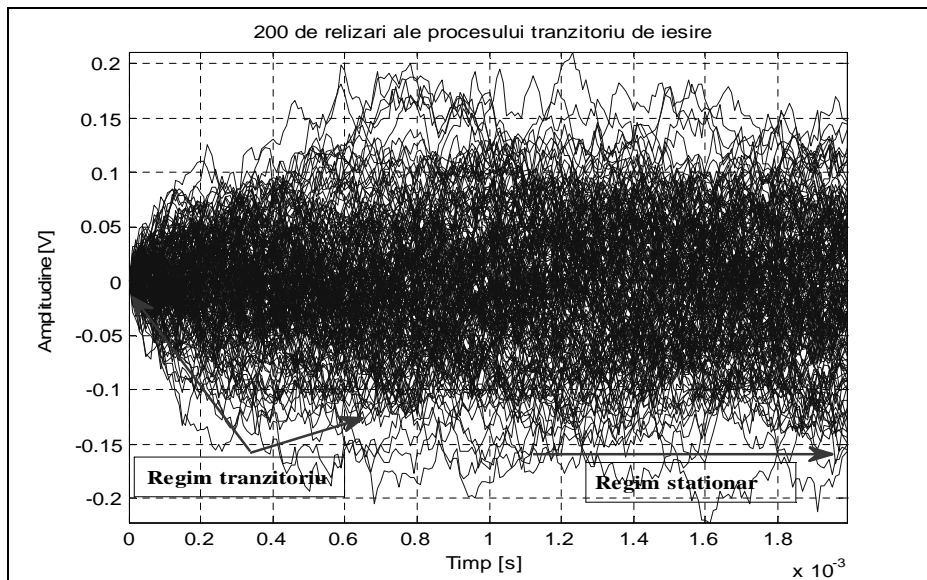


Fig.4.3 Procesul tranzitoriu de la ieșirea circuitului

Folosind metode de calcul specifice [P1], [I12], [I13], [I4], se pot determina momentele statistice ale procesului de ieșire. În acest caz, datorită condiției inițiale nule și faptului că procesul de intrare este centrat, nu există un regim tranzitoriu al valorii medii; ea rămâne nulă,  $m_Y(t) = 0$  pentru  $t \geq 0$ , cum a fost și pentru  $t < 0$ . Există în schimb un regim tranzitoriu al autocovarianței procesului de ieșire. Astfel, folosind notația  $E\{\cdot\}$  pentru operația de mediere statistică, se dovedește că funcția de autocovarianță a procesului de la ieșirea sistemului are expresia [P1]:

$$C_Y(t_1, t_2) = E\{[y(t_1) - m_Y(t_1)] \cdot [y(t_2) - m_Y(t_2)]\}$$

În final se obține funcția de autocovarianță tranzitorie (Fig.4.4):

$$C_Y(t_1, t_2) = \frac{aB}{2 \cdot (a^2 - b^2)} \cdot \{a \cdot e^{-b|t_1 - t_2|} - b \cdot e^{-a|t_2 - t_1|} + (a+b) \cdot e^{-a(t_1 + t_2)} - a(e^{-b t_1 - a t_2} + e^{-a t_1 - b t_2})\} \quad (4.10)$$

Funcția de autocovarianță a procesului staționar de ieșire  $C_Y^s(t_1, t_2)$ , se obține din (4.10) pentru  $t_1 \rightarrow \infty$ ,  $t_2 \rightarrow \infty$  în condițiile păstrării diferenței  $(t_2 - t_1)$  la valori finite:

$$C_Y^s(t_1, t_2) = \frac{aB}{2 \cdot (a^2 - b^2)} \cdot \{a \cdot e^{-b|t_1 - t_2|} - b \cdot e^{-a|t_2 - t_1|}\} \quad (4.11)$$

Autocovarianța procesului staționar de ieșire, conform relației (4.11) depinde doar de modulul diferenței  $(t_2 - t_1)$ , așa cum se poate vedea în Fig.4.5.

Procesul de intrare și sistemul s-au definit tot prin parametrii:  $R = 100 \text{ k}\Omega$ ;  $C = 10 \text{ nF}$ ;  $B = b = 10 \cdot a = 10/(RC)$ .

Varianța procesului de ieșire se poate obține tot din (4.10) pentru  $t_1 = t_2 = t$ :

$$\sigma_Y^2(t) = \frac{aB}{2 \cdot (a+b)} \cdot \left\{1 - \frac{e^{-at}}{a-b} \cdot [2a \cdot e^{-bt} - (a+b) \cdot e^{-at}]\right\} \quad (4.12)$$

Varianța de regim permanent este:

$$[\sigma_Y^2]^s = \lim_{t \rightarrow \infty} \sigma_Y^2(t) = \frac{aB}{2 \cdot (a+b)} \quad (4.13)$$

Pentru  $B = b \rightarrow \infty$ , adică pentru cazul că semnalul de la intrare este o realizare a zgomotului alb, expresia (4.12) devine:

$$C_Y(t, t) = \sigma_Y^2(t) = \frac{a}{2} \cdot (1 - e^{-2at}) \quad (4.14)$$

În timp ce după stabilirea regimului permanent varianța devine  $[\sigma_Y^2]^s = a/2$ . Cu aceste rezultate intermediare și ținând seama că în cazul unui regim tranzitoriu pur aleator  $m_Y(t) = 0$ , iar varianța (4.14) este o funcție monoton crescătoare, relația (4.8) devine:

$$0.95 = \sqrt{\frac{\sigma_Y^2(T)}{\sigma_Y^2(\infty)}} = \sqrt{1 - e^{-2aT}} \quad (4.15)$$



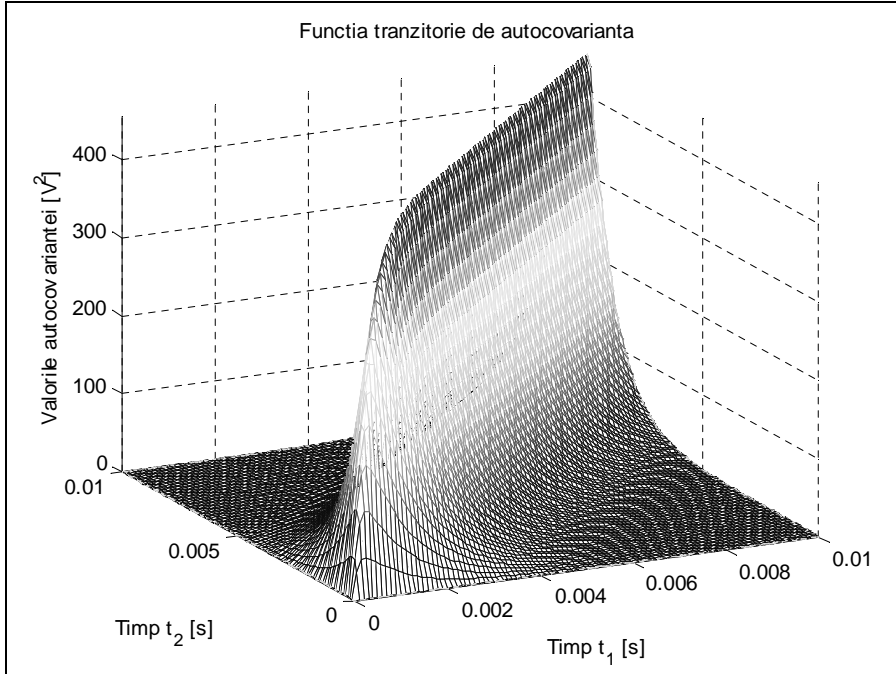


Fig.4.4 Funcția de autocovarianță tranzitorie a procesului de ieșire

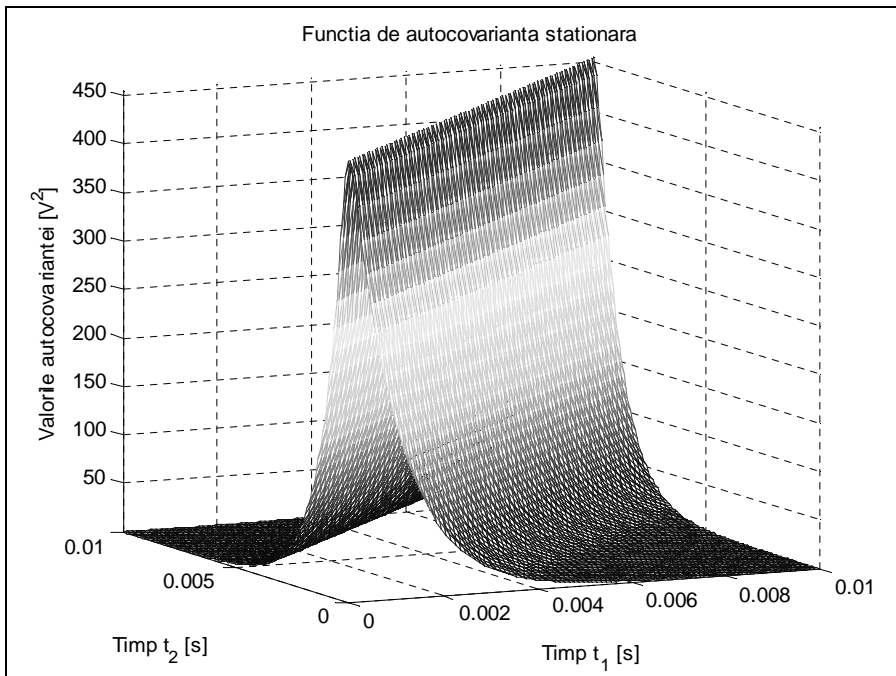


Fig.4.5 Funcția de autocovarianță a procesului staționar de ieșire

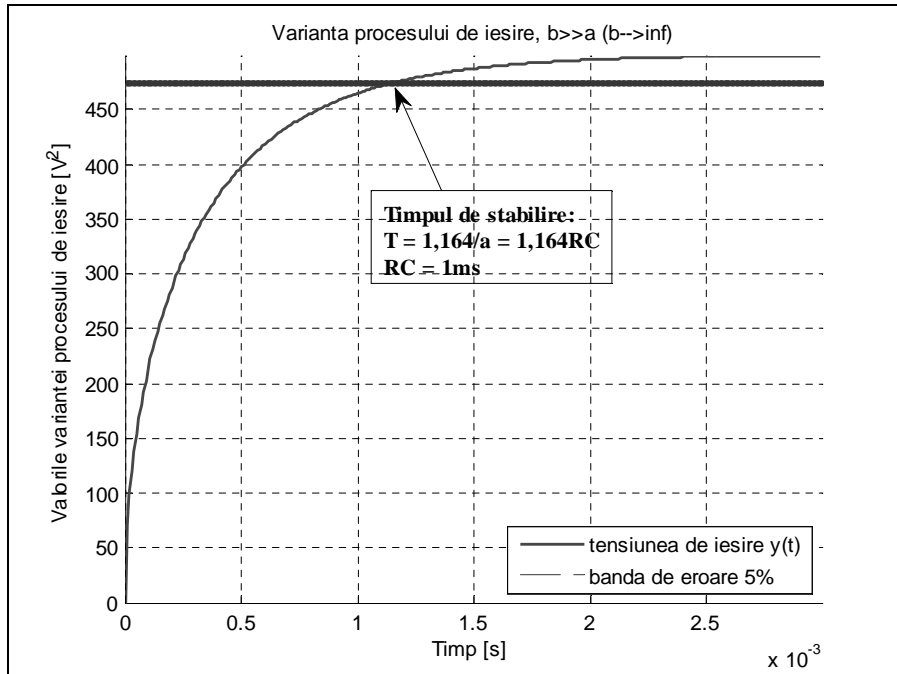


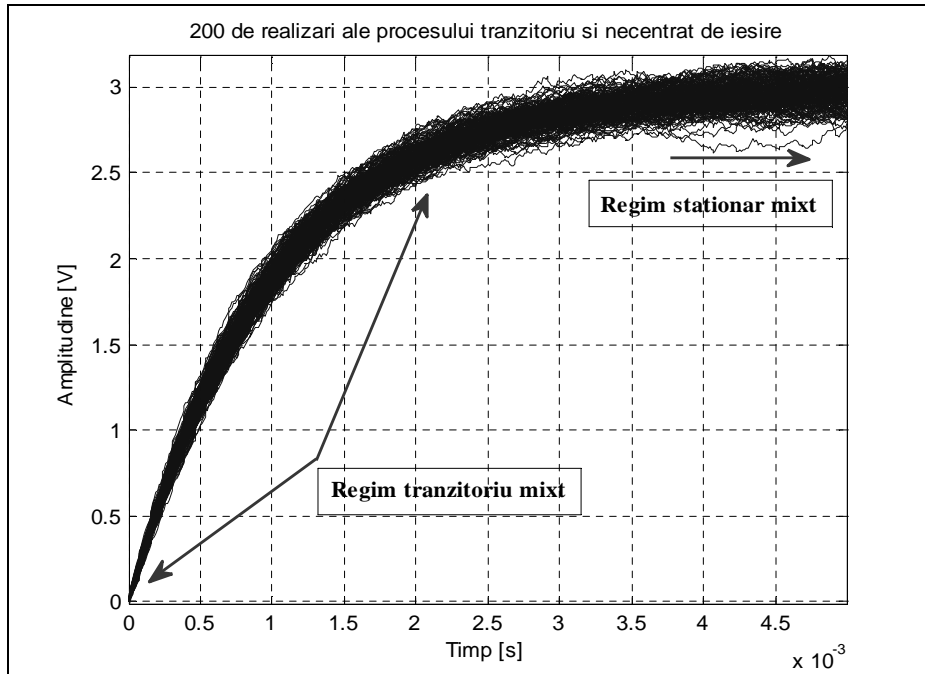
Fig.4.6 Definierea timpului de stabilire cu ajutorul varianței

Din (4.15) se obține,  $T \cong 1.164/a = 1.164 \cdot RC$ . Așa cum se poate observa și în Fig.4.6, durata practică a regimului tranzitoriu reprezintă doar aproximativ 38% din timpul de stabilire al unui regim tranzitoriu determinat cu treapta de intrare (4.4).

În continuare se ilustrează determinarea timpului de stabilire generalizat la un regim tranzitoriu mixt în sensul că peste componenta deterministă se suprapune o componentă aleatoare. Pentru aceasta considerăm că la intrarea circuitului descris de ecuația (4.3) se aplică treapta de tensiune (4.4) cu  $U = 3\text{ V}$ , suprapusă aditiv cu un zgomot alb. În acest caz și procesul tranzitoriu de ieșire prezintă o componentă continuă suprapusă peste o componentă aleatoare, așa cum se poate vedea în Fig.4.7. Ținând seama că perioada de eșantionare s-a considerat de  $10\mu\text{s}$ , înseamnă că fiecare din cele 200 de realizări ale procesului de ieșire reprezentat în Fig.4.7 conține câte  $5\text{ms}/10\mu\text{s} = 500$  de eșantioane.

Deoarece sistemul este liniar, se aplică principiul suprapunerii efectelor pentru a obține profilul funcției de autocorelație a ieșirii intersectat cu planul  $t_1 = t_2 = t$ . Astfel, adunând efectul zgomotului alb conform relației (4.14) și efectul treptei unitate de tensiune conform relației (4.5), rezultă momentul de ordinul doi al procesului de ieșire din Fig.4.7:

$$m_{Y_2}(t) = \frac{a}{2} \cdot (1 - e^{-2at}) + U^2 (1 - e^{-at})^2 \quad (4.16)$$

Fig.4.7 Regim tranzitoriu mixt pentru  $U = 3V$ 

Având în vedere că momentul tranzitoriu (4.16) este monoton crescător și tinde spre valoarea  $m_{Y_2}(\infty) = \frac{a}{2} + U^2$ , relația (4.8) pentru determinarea timpului de stabilire se scrie astfel:

$$1 - \varepsilon\% = \sqrt{\frac{\frac{a}{2} \cdot (1 - e^{-2aT}) + U^2 (1 - e^{-aT})^2}{\frac{a}{2} + U^2}} \quad (4.17)$$

Pentru  $U^2 = a/2$  și  $\varepsilon\% = 5\%$ , relația (4.17) se simplifică la egalitatea:

$$0.95 = \sqrt{1 - e^{-aT}} \quad (4.18)$$

de unde rezultă  $T \cong 2.33/a = 2.33 \cdot RC$ .

O analiză comparativă a timpilor de stabilire generalizați, pentru cele trei situații analizate (regim tranzitoriu pur determinist, regim tranzitoriu mixt și regim tranzitoriu pur aleator), arată că prezența componentei aleatoare duce la scăderea duratei regimului tranzitoriu de la trei constante de timp (în cazul pur determinist) la 1,164 constante de timp (în cazul aleator pur, cu intrarea de tipul zgomotului alb). În cazul regimurilor tranzitorii mixte, timpul de stabilire generalizat se află între  $T = 3 \cdot RC$  și  $T = 1,164 \cdot RC$ , în funcție de raportul dintre  $U^2$  și  $a/2$ .

## 4.2 Studiul analitic al timpului de stabilire

În continuare se folosesc expresiile analitice cunoscute pentru filtrul RC trece-jos în scopul evaluării dependenței timpului de stabilire de valoarea componentei continue a semnalului de intrare, de abaterea treptei de intrare de la forma ideală, de caracteristica de frecvență a sistemului precum și de banda de frecvențe a componentei aleatoare aplicată la intrarea sistemului. Această analiză prezintă interes pentru faptul că există senzori a căror caracteristică de frecvență este de tipul trece-jos, ca și la filtrul RC descris de ecuația (4.3).

### 4.2.1 Efectul componentei continue asupra timpului de stabilire

Caracteristicile de frecvență (Bode) ale filtrului RC trece-jos se prezintă în Fig.4.8, pentru valorile  $R = 100 \text{ k}\Omega$  și  $C = 10 \text{ nF}$ . Parametrul  $a = 1/RC = 1000 \text{ rad/s}$  reprezintă pulsația de tăiere a filtrului (senzorului), adică pulsația la care modulul amplificării scade de la 1 la  $1/\sqrt{2}$ , respectiv de la 0 dB la -3 dB, iar defazajul crește de la zero la  $\pi/4$  radiani.

Pentru început se ia în considerare efectul, abaterii de la forma ideală, a treptei de intrare asupra timpului de stabilire.

Așa cum s-a văzut, în cazul treptei de intrare ideală dată de relația (4.4), răspunsul circuitului are expresia (4.5) și conform Fig.4.1, timpul de stabilire reprezintă practic trei constante de timp ale circuitului. Dacă însă, în mod mai realist, se consideră o treaptă cu viteză de variație finită a frontului crescător,

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{for } t < 0 \\ U(1 - e^{-bt}) & \text{for } t \geq 0, b > 0 \end{cases} \quad (4.19)$$

expresia (4.5) a răspunsului devine:

$$y(t) = U \left( 1 - \frac{a}{a-b} \cdot e^{-bt} - \frac{b}{b-a} \cdot e^{-at} \right); t \geq 0 \quad (4.20)$$

Se poate observa că treapta ideală (4.4) și răspunsul (4.5) al circuitului sunt cuprinse în expresiile (4.19) și (4.20) ca și cazuri particulare pentru  $b \rightarrow \infty$ . Practic, pentru  $b \gg a$ , viteza de variație a lui  $x(t)$  este prea mare pentru ca semnalul să poată fi reprodus la ieșire.

În acest caz, timpul de stabilire este determinat practic doar de constanta de timp a circuitului care se comportă ca un circuit integrator. Acest lucru se evidențiază în Fig.4.9 unde s-a considerat  $b = 10 \cdot a$  și timpul de stabilire este practic tot 3ms, ca și în cazul treptei ideale din Fig.4.1. Dacă însă, în (4.20) se consideră  $a \rightarrow \infty$  (practic,  $a \gg b$ ), datorită vitezei mari de urmărire a circuitului, treapta de intrare (4.19) este reprodusă nemodificată la ieșire:

$$y(t) = U \cdot (1 - e^{-bt}); t \geq 0 \quad (4.21)$$

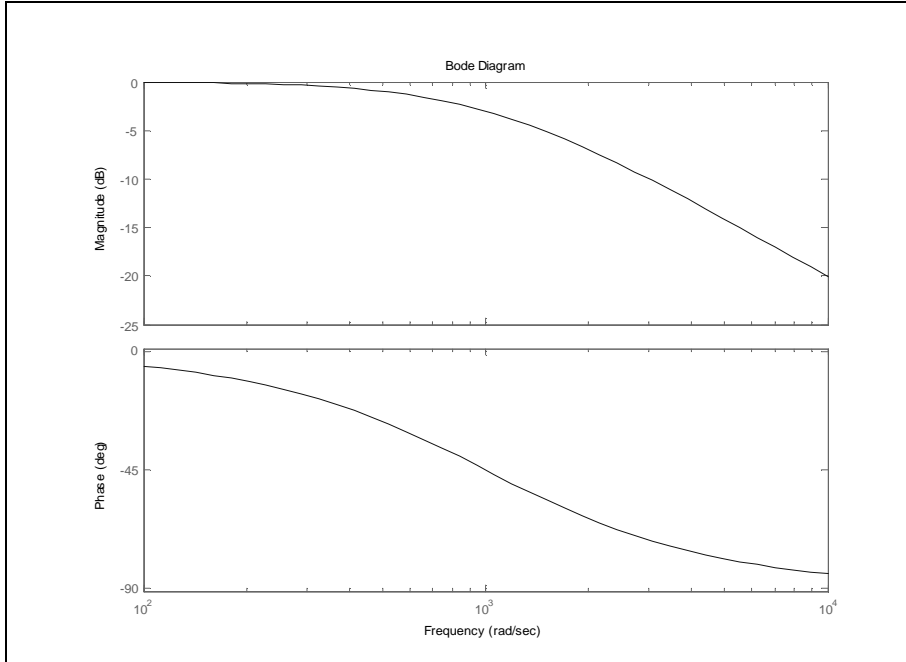


Fig.4.8 Caracteristicile de frecvență ale filtrului RC trece-jos

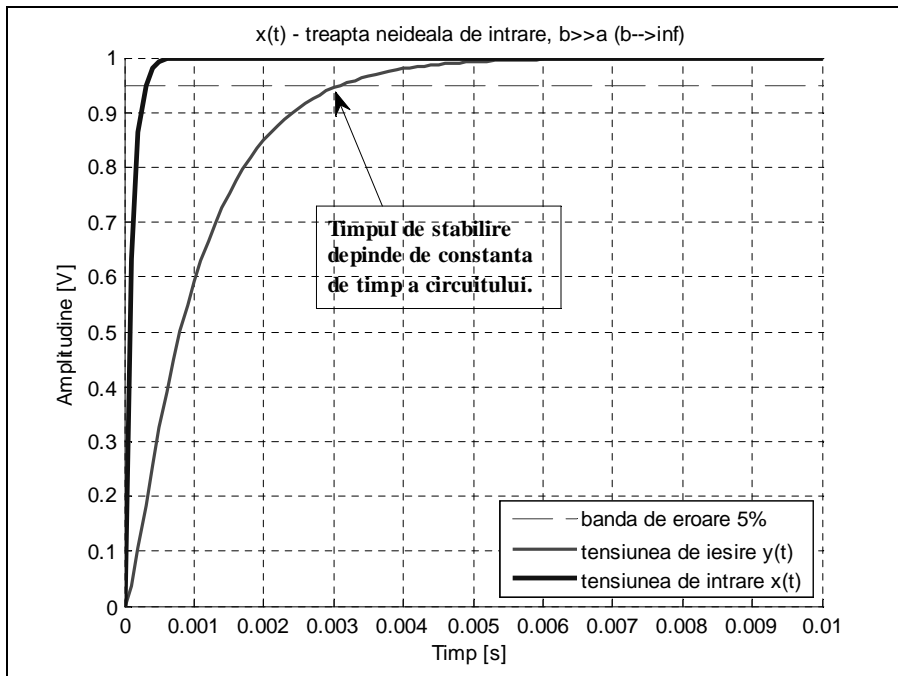
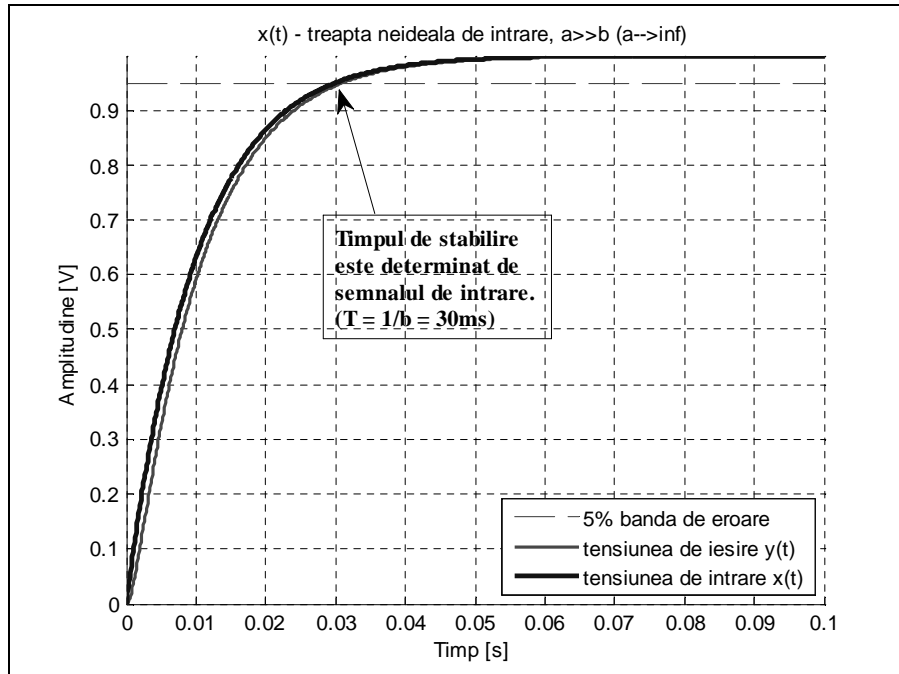


Fig.4.9 Timpul de stabilire în cazul unei trepte reale, pentru  $b = 10 \cdot a$

Fig.4.10 Timpul de stabilire în cazul unei trepte reale, pentru  $b = 0,1 \cdot a$ 

De observat că în acest caz, timpul de stabilire este  $T = 1/b = 30$  ms, adică de zece ori mai mare decât în cazul treptei ideale. Raportul dintre noul timpul de stabilire și timpul de stabilire în cazul treptei ideale este același ca și raportul  $a/b$ .

Un caz intermediar semnificativ intervine la egalitatea constantelor circuitului și a trepte de intrare:  $a=b$ . Dacă se notează cu  $c$  valoarea comună a celor două constante ( $a = b = c$ ), pentru tensiunea tranzitorie de ieșire se obține expresia:

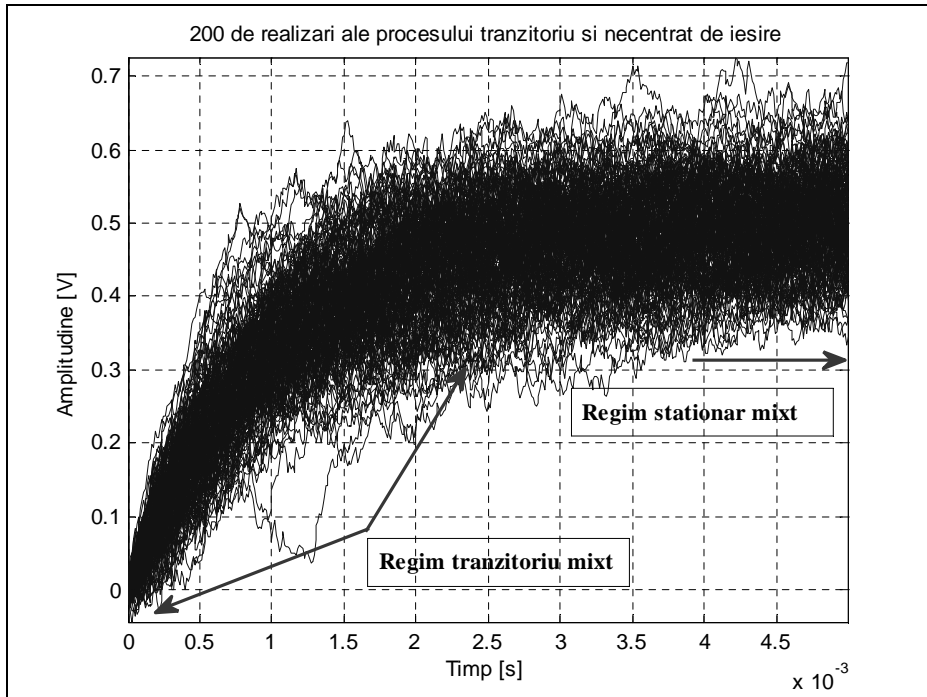
$$y(t) = U \cdot [1 - e^{-ct} (1 + ct)] \quad (4.22)$$

O condiție similară cu (4.6),

$$\frac{y(T)}{y(\infty)} = 1 - e^{-cT} (1 + cT) = 0.95 \quad (4.23)$$

conduce la valoarea  $T = 4,73/c = 4,73/1000 = 4,73$  ms a timpului de stabilire. Concluzia globală a rezultatelor precedente este că abaterea de la ideal a trepte de intrare determină creșterea timpului de stabilire.

În continuare, se analizează efectul combinat al componentelor deterministă și aleatoare asupra timpului de stabilire. Atât componenta deterministă, cât și cea aleatoare se consideră idealizate: treapta de tensiune are expresia (4.4) iar componenta aleatoare este un zgomot alb cu funcția de autocorelație  $R_x(\tau) = \delta(\tau)$ .

Fig.4.11 Regim tranzitoriu mixt, pentru  $U = 0,5V$ 

În Fig.4.11 se prezintă 200 de realizări ale procesului tranzitoriu provocat de realizări ale zgomotului alb peste care se suprapune o treaptă ideală de tensiune având valoarea  $U = 0,5V$ . Chiar și compararea vizuală a procesului tranzitoriu din Fig.4.11 cu cel din Fig.4.7 pentru  $U = 3V$ , sugerează că timpul de stabilire crește o dată cu creșterea componentei continue. Calitativ, dacă  $U^2 \gg a/2$ , la ieșirea circuitului se va produce un proces tranzitoriu determinist, mai mult sau mai puțin perturbat, ca cele din Fig.4.11 și Fig.4.7. Dacă, în schimb,  $U^2 \ll a/2$ , procesul tranzitoriu de ieșire, similar celui din Fig.4.3, este unul aleator dar ușor deplasat.

Pentru o evaluare cantitativă a timpului de stabilire pentru diferite valori ale treptei continue de intrare, se explicitează  $T$  din relația (4.17) în care se consideră, ca în toate exemplele precedente,  $\varepsilon\% = 5\%$ . În acest scop se folosește notația  $e^{-at} = x$  urmând ca pentru  $a/2 = U^2$  să se rezolve o ecuație de gradul doi în  $x$ . Se alege ca bună soluția  $x \in (0,1)$ , astfel încât valoarea timpului de stabilire  $T = -(\ln x)/a$  să rezulte pozitivă. Soluția valabilă este

$$x = \frac{2 \cdot U^2 - \sqrt{3,61 \cdot U^2 + 0,0975 \cdot a^2}}{2 \cdot U^2 - a}.$$

În cazul particular  $2 \cdot U^2 = a$ , se obține soluția  $x = 0,0975$  și apoi timpul de stabilire  $T = 2,328/a$ . Pe baza acestor relații, în Fig.4.12 se prezintă dependența timpului de stabilire de pulsația de tăiere a filtrului,  $a = (667 \div 1000)$  rad/s cu pasul

3 rad/s, și de valoarea treptei de tensiune aplicată la intrare,  $U = (-10 \div 10) \text{ V}$  cu pasul de 0,02 V. Se observă că  $T$  crește ușor cu scăderea pulsației de tăiere,  $a$ , de la 1000 la 667 rad/s dar creșterea este puternică o dată cu valoarea treptei de tensiune,  $U$ , putând atinge chiar șase constante de timp. Dacă se păstrează  $U = 0 \text{ V}$ , timpul de stabilire are valoarea  $T \cong 1.12 / a$ , ceea ce înseamnă o creștere relativ mică de la aproximativ 1,12 ms la 1,68 ms, atunci când  $a$  scade de la 1000 la 667 rad/s.

În literatură se arată că între timpul de stabilire „determinist”,  $T_D$ , și frecvența de tăiere a sistemului la ieșirea căruia se determină acel timp de stabilire,  $f_{\max}$  există o relație echivalentă cu teorema eșantionării [K4]:

$$T_D = \frac{1}{2 \cdot f_{\max}} \quad (4.24)$$

Se precizează că, în (4.24),  $T_D$  reprezintă durata regimului tranzitoriu „determinist” adică timpul de stabilire după care răspunsul sistemului la o treaptă ideală de tensiune intră în banda de eroare de  $\pm \varepsilon = \pm 5\%$ . Pe de altă parte,  $f_{\max}$  în (4.24) este frecvența la care amplificarea scade la  $1/\sqrt{2}$  din valoarea amplificării sistemului la frecvențe medii.

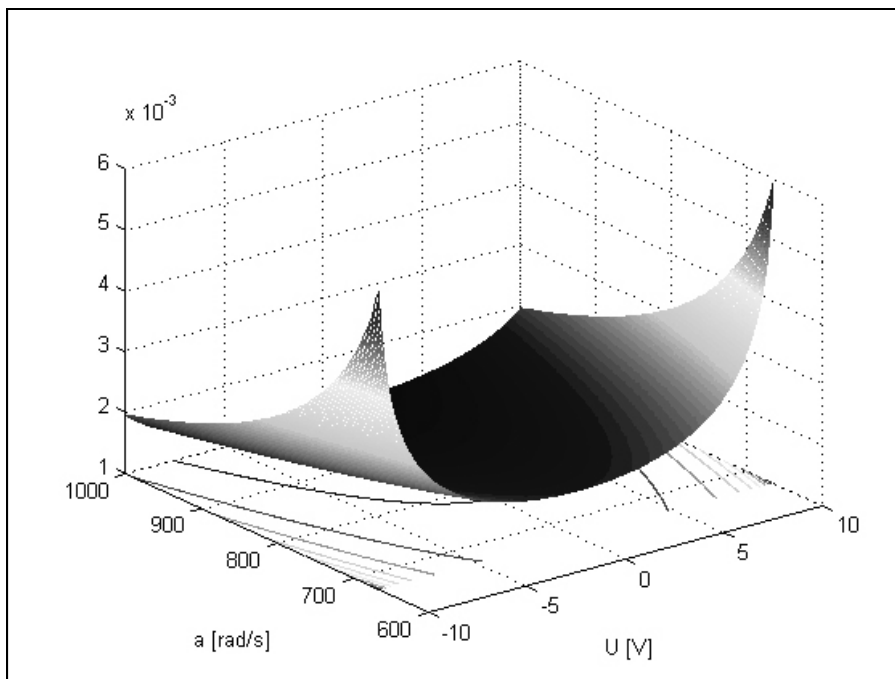


Fig.4.12 Dependența timpului de stabilire de parametrii  $a$  și  $U$

De fapt, teorema eșantionării, datorată lui Shannon și Nyquist, spune că pentru a putea fi reconstituit din eșantioanele sale, un semnal continuu al cărui spectru conține frecvențe  $f \leq f_{\max}$ , trebuie eșantionat cu o frecvență de eșantionare



$f_E \geq 2f_{\max}$  [S16]. Dacă această relație nu este respectată, frecvențele din semnal mai mari decât  $f_E/2$  apar în spectrul semnalului eșantionat de parcă ar avea o altă valoare decât cea reală (fenomenul aliasing). Deoarece există o anumită incertitudine asupra frecvenței maxime conținută într-un semnal și pentru faptul că sistemele fizice reale nu asigură eliminarea abruptă ci treptată a frecvențelor înalte, se recomandă ca frecvența de eșantionare minimă să fie stabilită după relația  $f_E = (2,4 \div 2,6) \cdot f_{\max}$ . De exemplu, în cadrul lucrării, pentru achiționarea semnalelor s-a folosit în lanțul de măsurare un filtru cu  $f_{\max} = 6 \text{ kHz}$  iar frecvența de eșantionare s-a stabilit la  $15 \text{ kHz} = 2,5 \cdot f_{\max}$ .

În termenii perioadei de eșantionare,  $T_E = 1/f_E$  și a timpului de stabilire determinist,  $T_D$ , relația practică  $f_E = (2,4 \div 2,6) \cdot f_{\max}$  este echivalentă cu:

$$T_E = \frac{1}{(2,4 \div 2,6) \cdot f_{\max}} = \frac{2 \cdot T_D}{(2,4 \div 2,6)} = (0,83 \div 0,77) \cdot T_D \quad (4.25)$$

Se observă că teorema eșantionării în forma  $f_E \geq 2f_{\max}$  stabilește o limită inferioară a frecvenței de eșantionare. În termenii perioadei de eșantionare și a timpului de stabilire determinist, teorema eșantionării poate fi scrisă în forma echivalentă, mai simplă,

$$T_E \leq \frac{1}{2 \cdot f_{\max}} = T_D \quad (4.26)$$

În forma (4.26), teorema eșantionării stabilește o limită superioară pentru perioada de eșantionare. Această limită este chiar timpul de stabilire determinist [K4].

Analiza precedentă a duratei regimurilor tranzitorii mixte arată că prezența componentei aleatoare a regimului tranzitoriu are ca efect scăderea timpului de stabilire,  $T$ . Acest parametru ce caracterizează comportarea dinamică a sistemelor în general și senzorilor în particular, are valoarea maximă în cazul regimurilor pur deterministe și valoarea minimă în cazul regimurilor pur aleatoare. Pe baza acestei observații și a faptului că semnalele provenind de la surse de zgomot au totdeauna o componentă aleatoare, sugerează alegerea perioadei de eșantionare în funcție de timpul de stabilire generalizat,  $T$ , în locul timpului de stabilire determinist. Astfel relația (4.26) devine:

$$T_E \leq T < T_D \quad (4.27)$$

De exemplu, în cazul unui senzor care poate fi modelat ca un filtru trece-jos de ordinul unu având pulsația de tăiere  $a$ , se știe că  $T_D = 3/a$ . Dacă semnalul măsurat nu are componentă continuă ( $U=0$ ) iar zgomotul ocupă toată banda de frecvență a filtrului, s-a arătat că timpul de stabilire generalizat este  $T \cong 1,12/a \cong 0,37 \cdot T_D$ . În aceste condiții, relația practică (4.25) devine:

$$T_E = (0,83 \div 0,77) \cdot T = (0,83 \div 0,77) \cdot 0,37 \cdot T_D \cong 0,3 \cdot T_D \quad (4.28)$$

Pentru a ilustra utilizarea relației (4.28) să considerăm o pulsație de tăiere  $a = 1000 \text{ rad/s}$ . Semnalul de la ieșirea senzorului ar conține frecvențe până la  $f_{\max} = a/(2\pi) \cong 160 \text{ Hz}$ . Timpul de stabilire determinist este  $T_D = 3/a = 3 \text{ ms}$  și în acord cu relația (3.25) perioada de eșantionare ar trebui aleasă în jurul valorii  $T_E = 0,8 \cdot 3 \text{ ms} = 2,4 \text{ ms}$  corespunzător unei frecvențe de eșantionare  $f_E \cong 420 \text{ Hz}$ . Presupunând însă că semnalul măsurat nu are componentă continuă, perioada de eșantionare trebuie stabilită în raport cu timpul de stabilire generalizat. Conform relației practice (4.28) rezultă  $T_E = 0,3 \cdot 3 \text{ ms} = 0,9 \text{ ms}$  ceea ce corespunde unei frecvențe de eșantionare  $f_E \cong 1100 \text{ Hz}$ . Cum funcțiile de intercorelație utilizate pentru localizarea surselor de zgomot au aceeași perioadă de eșantionare ca și semnalele pe baza cărora s-au estimat, creșterea frecvenței de eșantionare de la  $f_E \cong 420 \text{ Hz}$  la  $f_E \cong 1100 \text{ Hz}$  are ca efect creșterea de aproximativ 2,6 ori a numărului de valori estimate pe unitatea de timp ceea ce înseamnă creșterea rezoluției cu care poate fi estimată diferența timpilor de propagare. Acuratețea de localizare a sursei de zgomot crește corespunzător.

În legătură cu această posibilitate de creștere a rezoluției funcțiilor de corelație se impun câteva precizări. În primul rând, deoarece teorema eșantionării limitează unilateral frecvența respectiv perioada de eșantionare, principial este posibilă creșterea arbitrară a frecvenței de eșantionare (supraeșantionare) respectiv scăderea arbitrară a perioadei de eșantionare. Astfel, la o primă analiză, nu ar exista o limitare în creșterea rezoluției funcțiilor de intercorelație prin supraeșantionare. În realitate însă, la un număr dat de eșantioane prelucrate, creșterea frecvenței de eșantionare înseamnă implicit scăderea lungimii realizărilor semnalelor prelucrate. Or, se știe că acuratețea de calcul a funcțiilor de corelație scade o dată cu scăderea lungimii semnalelor prelucrate. În plus, în cazul special al semnalelor aleatoare, spectrul acestora se modifică în timp (densitatea spectrală de putere reprezintă o medie a spectrului pe durata realizărilor analizate). Ca urmare durata realizărilor trebuie să fie suficient de mare pentru ca semnalul să se manifeste indiferent de componența spectrală locală. Deci, creșterea arbitrară a frecvenței de eșantionare peste valoarea stabilită de teorema eșantionării nu este recomandată. De aici rezultă importanța practică a relației clasice (4.25) respectiv a relației propuse, (4.28), pentru stabilirea duratei perioadei de eșantionare.

Relația (4.28) se referă la cazul în care semnalele măsurate nu au componentă continuă și timpul de stabilire generalizat este substanțial mai mic decât timpul de stabilire determinist. În cazul zgomotelor generate de fisurile din conductele de transport fluide, semnalele măsurate (cu ajutorul accelerometrului piezoelectric) reprezintă accelerații și cerința anulării componentei continue este principial îndeplinită.

Totuși, în condițiile obturării țevii, în conductă apar unde periodice de joasă frecvență care se suprapun aditiv peste zgomotele de fisură și dau semnalelor măsurate un aspect puternic nestaționar. În plus, intervalele relativ scurte de timp în care hidroforul ridică presiunea lichidului din conductă se reflectă în semnalele măsurate ca regimuri tranzitorii ale valorii medii. În aceste condiții, relația (4.28) se aplică porțiunilor de semnal dintre două intervenții succesive ale hidroforului. Înaintea prelucrării lor, acele secvențe de semnal sunt staționarizate prin eliminarea cu ajutorul unei filtrări trece-sus atât a componentelor periodice cât și a ușoarei căderi a componentei continue între două activări succesive ale hidroforului.

### 4.2.2 Efectul lărgimii de bandă a zgomotului asupra timpului de stabilire

Considerând nulă componenta continuă a semnalelor măsurate, în continuare se va studia efectul lărgimii de bandă a zgomotelor generate de fisură, asupra timpului de stabilire. În acest sens, în funcția de autocorelație (4.9) a procesului de la intrarea filtrului trece-jos care modelează senzorul se consideră că  $B$  și  $b$  sunt numeric egale și finite. Densitatea spectrală de putere a procesului aleator cu FAC (4.9) este:

$$S_X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_X(\tau) \cdot \exp(-j\omega\tau) d\tau = \frac{Bb}{b^2 + \omega^2} \quad (4.29)$$

Puterea procesului de intrare este valoarea autocorelației în origine,  $R_X(0) = B/2$ , de unde rezultă că  $B$  se măsoară în  $V^2$ . În domeniul pulsațiilor, aceeași putere este dată de aria mărginită de densitatea spectrală de putere. Într-adevăr, deoarece

$$R_X(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_X(\omega) \cdot \exp(j\omega\tau) d\omega$$

rezultă

$$R_X(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_X(\omega) d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Bb}{b^2 + \omega^2} d\omega = \frac{B}{2} \quad (4.30)$$

Pentru  $B = b$  (egalitate numerică, nu și dimensională), expresia (4.29) a densității spectrale de putere se poate pune în forma

$$S_X(\omega) = \frac{1}{1 + (\omega/b)^2} \quad (4.31)$$

Din (4.31) rezultă că la pulsația  $\omega = b \text{ rad/s}$ , densitatea spectrală de putere scade la jumătate față de valoarea de la pulsația  $\omega = 0$ :

$$\frac{S_X(b)}{S_X(0)} = \frac{1}{2}. \quad (4.32)$$

Relația (4.32) arată că  $b$  reprezintă pulsația de tăiere sau altfel spus, lărgimea de bandă a zgomotului de intrare și se măsoară în  $[\text{rad/s}]$ .

Funcția de autocorelație  $R_X(\tau)$  (relația (4.9)) și densitatea spectrală de putere  $S_X(\omega)$  (relația (4.29)) sunt reprezentate în Fig.4.13 pentru  $B = b = 2000$ ;  $1000$  și respectiv  $500$ . Se poate constata că o dată cu creșterea valorii comune a celor două constante  $B$  și  $b$  puterea procesului de intrare crește datorită creșterii benzii de frecvență a zgomotului. Restrângerea în domeniul timp a autocorelației este echivalentă cu lărgirea densității spectrale de putere în domeniul frecvențe. Egalitatea numerică a constantelor  $B = b \rightarrow \infty$  face ca amplitudinea tuturor liniilor spectrale să tindă spre valoarea unu, adică zgomotul de intrare să tindă spre

zgomotul alb ideal. La valori finite  $B = b$ , procesul cu autocorelația și densitatea spectrală de putere din Fig.4.13 se numește zgomot alb cu banda limitată.

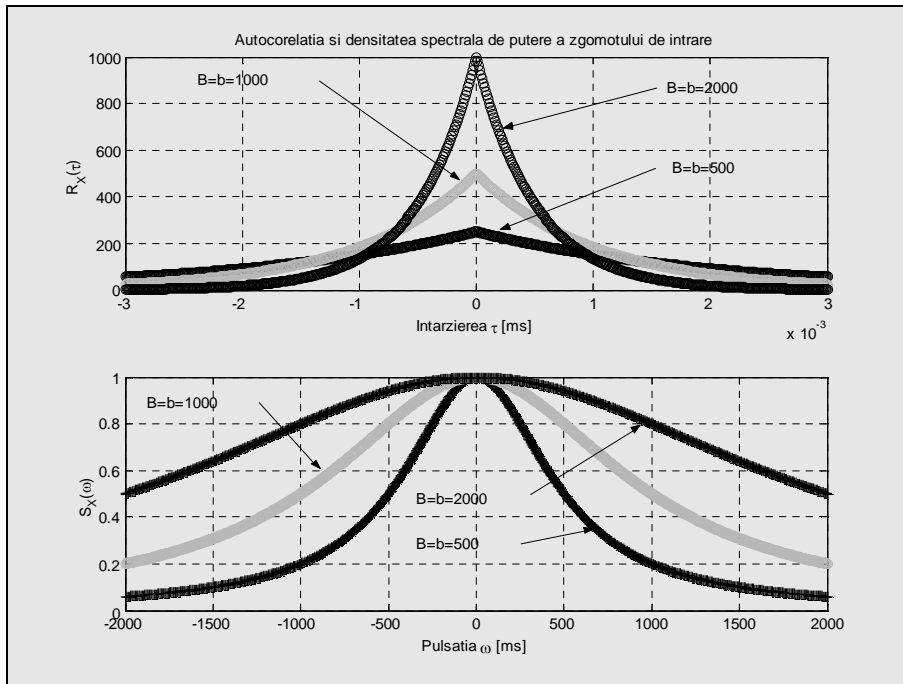


Fig.4.13 Dependența funcțiilor de autocorelație și densitate spectrală de putere în raport cu parametrii  $B$  și  $b$ , numeric egali

Pentru a evidenția efectul lărgimii de bandă a zgomotului de măsurat asupra timpului de stabilire a procesului de la ieșirea filtrului (senzorului), se consideră din nou varianța tranzitorie (4.12) și varianța de regim permanent (4.13). Spre deosebire de cazul limită  $B = b \rightarrow \infty$  căruia îi corespund relația (4.15) și Fig.4.6, de această dată se consideră că banda  $b$  a zgomotului și pulsația de tăiere  $a$  a

senzorului sunt finite și se află în raportul  $\eta = \frac{b}{a}$ . Folosind notațiile  $e^{-aT} = x$  și

$e^{-bT} = y$  și considerând  $\eta \neq 1$  (adică  $a \neq b$ ), relația (4.8) pentru determinarea timpului de stabilire devine:

$$0,95 = \sqrt{\frac{\sigma_Y^2(T)}{\sigma_Y^2(\infty)}} = \sqrt{1 - \frac{x}{a-b} [2a \cdot y - (a+b) \cdot x]} \quad (4.33)$$

După ridicarea la patrat a ambilor membri ai ecuației (4.33), ținând seama că

$$y = e^{-bT} = e^{-\eta a T} = (e^{-aT})^\eta = x^\eta$$

se obține o ecuație în  $x$ , în care  $\eta$  intervine ca parametru:

$$2 \cdot x^{(\eta+1)} + 0,0975 \cdot (\eta - 1) = (\eta + 1) \cdot x^2 \quad (4.34)$$

Ecuția (4.34) nu are soluție analitică, motiv pentru care ea s-a rezolvat grafic, pentru valori discrete ale parametrului  $\eta$ . Pentru exemplificare, în Fig. 4.14 se prezintă reprezentările grafice ale membrului stâng,  $f_s(x)$ , respectiv ale membrului drept,  $f_d(x)$ , ale ecuației (4.34), pentru valoarea  $\eta = 0,9$  a parametrului. Prin detalierea punctului de intersecție a celor două curbe se determină soluția  $x = 0,1338$ . În acest mod s-au determinat 20 de soluții ale ecuației (4.34). Valorile parametrului  $\eta$  și soluțiile  $x$  corespunzătoare sunt înscrise în tabelul 4.1 și în tabelul 4.2.

Tabelul 4.1. Primele 10 valori ale lui  $x$

$\eta$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9
$x$	0,06	0,08	0,10	0,11	0,13	0,14	0,15	0,17	0,18	0,18

Tabelul 4.2. Ultimele 10 valori ale lui  $x$

$\eta$	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9
$x$	0,19	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24

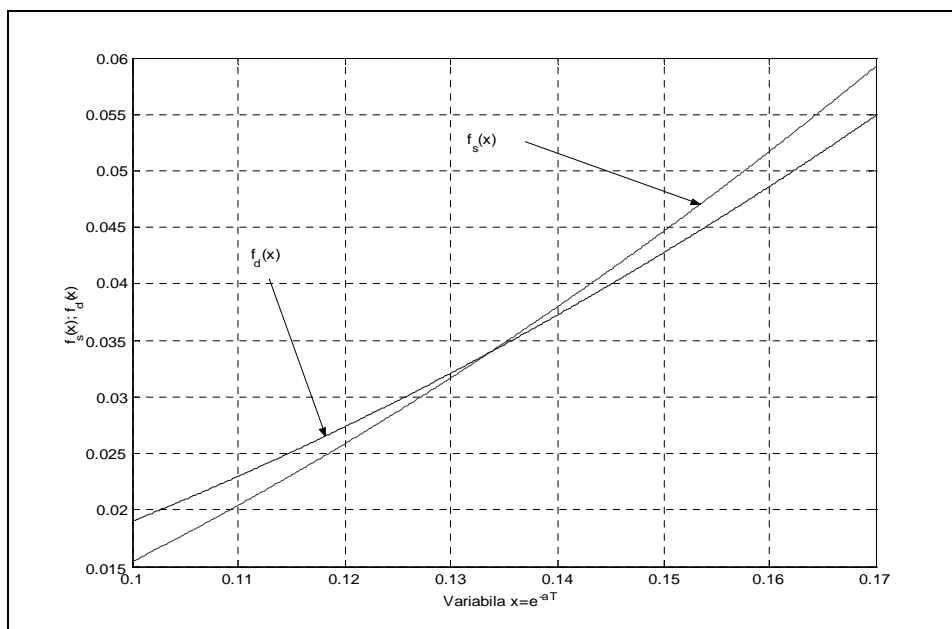


Fig.4.14 Rezolvarea grafică a ecuației (4.34)

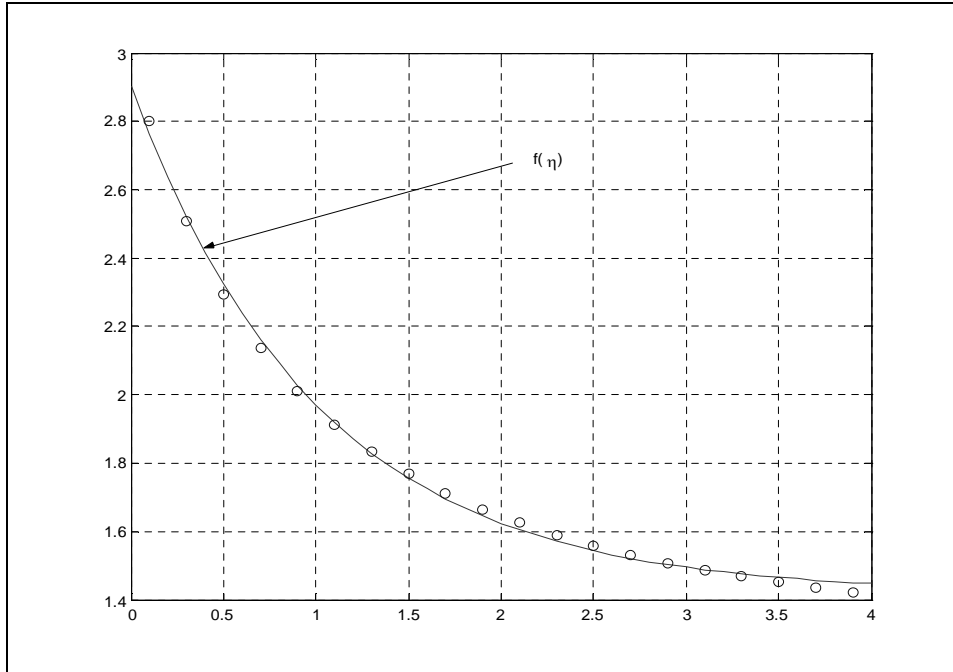


Fig.4.15 Aproximarea printr-o formulă empirică a dependenței  $a \cdot T = f(\eta)$

Dintre soluțiile posibile ale ecuației (4.34) s-a ales soluția  $x \in (0,1)$  astfel încât  $\ln x < 0$  și din  $aT = -\ln x$ , în care  $a > 0$  să rezulte un timp de stabilire pozitiv,  $T > 0$ .

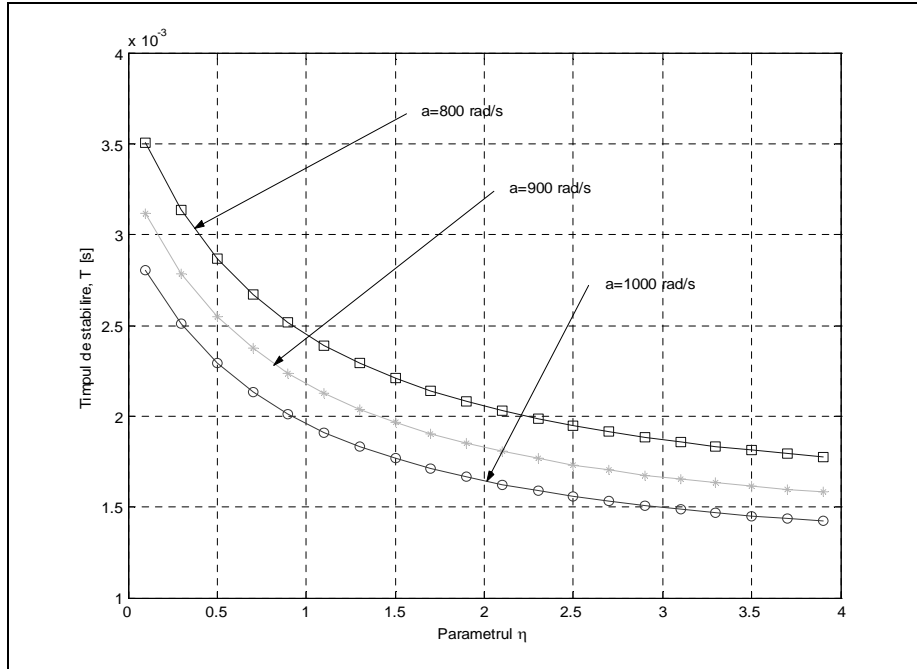
În continuare s-a folosit operatorul \ (Backslash) din Matlab pentru aproximarea funcției  $a \cdot T = -\ln x = f(\eta)$ . Astfel, în Fig.4.15 sunt marcate prin cercuri valorile logaritmului natural al soluțiilor  $x$  din Tabelul 1 și prin linie continuă funcția de aproximare

$$f(\eta) = 1,4196 + 1,4836 \cdot e^{-\eta} + 0,0139 \cdot \eta \cdot e^{-\eta} \quad (4.35)$$

În final se poate scrie formula de aproximare a timpului de stabilire, în funcție de parametrul  $\eta = b/a$  și de valoarea pulsației de tăiere a senzorului,

$$T = \frac{f(\eta)}{a} = \frac{1,4196 + 1,4836 \cdot e^{-\eta} + 0,0139 \cdot \eta \cdot e^{-\eta}}{a} \quad (4.36)$$

În Fig.4.16 se prezintă trei curbe de aproximare ale timpului de stabilire pentru pulsații de tăiere ale filtrului de 800, 900 și respectiv 1000 rad/s. Parametrul  $\eta$  ia valori în intervalul important din punct de vedere al aplicațiilor,  $\eta \in [0,1 \div 3,9]$ . Altfel spus, banda de frecvențe a zgomotului măsurat poate lua valori  $b = [0,1 \cdot a \div 3,9 \cdot a]$ , adică între a zecea parte și de patru ori pulsația de tăiere a senzorului.

Fig.4.16 Curbe de aproximare a timpului de stabilire pentru  $a = 800, 900$  și  $1000$  rad/s

Formula (4.36) și graficele din Fig.4.16 arată că timpul de stabilire este invers proporțional cu pulsația de tăiere a senzorului și scade cu creșterea raportului  $\eta$  respectiv cu creșterea benzii zgomotului de măsurat. Acest tip de dependență sugerează că pentru a reduce timpul de stabilire și a crește frecvența de eșantionare, cei doi parametri,  $a$  și  $\eta$  trebuie să aibă valori cât mai mari. Dintre acești parametri, se poate alege doar frecvența de tăiere  $a$ , în măsura în care există posibilitatea alegerii senzorului. Parametrul  $\eta$  nu este independent de  $a$ , ci la o bandă dată a zgomotului de măsurat,  $\eta$  scade o dată cu creșterea lui  $a$ . În final, formula (4.36) în care  $\eta$  se înlocuiește cu raportul  $b/a$ , poate fi utilizată pentru alegerea senzorului care asigură timpul de stabilire minim.

În legătura cu formula de aproximare (4.36) se poate observa, conform Fig.4.15 și Fig.4.16, că ea oferă o bună aproximare a timpului de stabilire, pentru domeniul ales al raportului  $\eta$ . Totuși, dacă în (4.36) se face trecerea la limită  $\eta \rightarrow \infty$ , se obține pentru timpul de stabilire expresia  $T = 1,4196/a$  ceea ce diferă semnificativ de expresia teoretică  $T = 1,12/a$ , obținută anterior. De altfel, chiar și în graficul din Fig.4.15 se poate observa că deja pentru  $\eta = 3,8 \dots 3,9$  punctele reprezentând valorile din Tabelul 1 rămân sub curba de aproximare. Oricum, domeniul valorilor lui  $\eta$  cuprinse în Fig.4.16 sunt cele de interes aplicativ iar dacă interesează un alt domeniu de valori pentru,  $\eta$  procedura de determinare a formulei empirice (4.36) poate fi reluată.

### 4.3 Concluzii

Studiul comportării dinamice a senzorilor cu ajutorul timpului de stabilire generalizat evidențiază posibilitatea creșterii frecvenței de eșantionare a semnalelor provenite de la surse de zgomot. Această posibilitate duce la creșterea rezoluției funcțiilor de intercorelație și implicit la creșterea acurateții de determinare a diferenței timpilor de propagare a semnalelor respectiv la creșterea acurateții de localizare a surselor de zgomot.

O primă concluzie a analizei din acest capitol este că prezența componentei aleatoare în semnalul de măsurat duce la scăderea timpului de stabilire generalizat în raport cu timpul de stabilire determinist. Astfel, semnalele fără componentă continuă sau cu componentă continuă cu valori reduse permite creșterea semnificativă a frecvenței de eșantionare.

Un alt rezultat al analizei este că timpul de stabilire scade o dată cu creșterea frecvenței de tăiere a senzorului și cu creșterea benzii zgomotului de măsurat. Formula empirică (4.36) dedusă în acest capitol permite alegerea celui mai potrivit senzor astfel încât să se asigure timpul de stabilire minim. După estimarea acestui timp de stabilire, relația (4.28) introdusă tot în acest capitol permite stabilirea perioadei (frecvenței) de eșantionare adecvată.



## 5. CREȘTEREA ACURATEȚEI DE LOCALIZARE A SURSELOR DE ZGOMOT

### 5.1 Observații privind localizarea fisurilor utilizând semnalele staționarizate

Am arătat că putem estima diferența timpilor de propagare între două semnale pe baza deplasamentului maximului funcției de intercorelație (FIC) calculată. Vom calcula acest deplasament pentru semnalele staționarizate, fără alte prelucrări suplimentare. Problema staționarității semnalelor este tratată în capitolul 3 al lucrării. Deoarece lungimea semnalelor achiziționate este mare (131072 eșantioane), calculul FIC se poate efectua și pe segmente mai scurte preluate din aceste semnale. Semnalele trebuie prelucrate inițial, iar porțiunile unde apar artefacte ar trebui evitate. Se va urmări stabilirea unui deplasament unitar pentru toate cazurile de calcul a FIC, acesta fiind considerat parametrul care indică poziția fisurii.

Pentru evaluarea calității cu care s-a făcut calculul funcției de intercorelație introducem un criteriu de calitate. Suntem interesați de două aspecte în ceea ce privește maximul FIC. Primul aspect este deplasamentul valorii maxime (la stânga sau la dreapta față de centrul funcției). Al doilea aspect este măsurarea gradului de calitate cu care valoarea maximă se evidențiază față de restul valorilor calculate. În Fig.5.1 se arată cei doi parametri de interes în cazul unei FIC calculate pentru o pereche de semnale achiziționate la debitul de 8,27 l/min. Deplasamentul rezultat în acest caz este de 15 eșantioane la dreapta față de origine.

Definim un *factor de calitate al reprezentării FIC*. Modul de calcul al factorului de calitate  $Q$  se face prin selectarea unei porțiuni din funcția de intercorelație care cuprinde valorile din intervalul  $(IndexMaxim - 100 \div IndexMaxim + 100)$ . Se preiau câte 100 de valori din stânga și din dreapta valorii maximului funcției. Pentru această selecție, valorile negative vor deveni nule. Nu vom urmări modul în care maximul funcției de intercorelație se evidențiază în comparație cu valorile negative ale selecției. Urmărim cum se evidențiază acest maxim în comparație cu valorile mai mari decât 0. Prin raportul între valoarea maximului funcției și valoarea deviației standard, pentru restul valorilor din porțiunea selectată, putem calcula calitatea estimării FIC.

Pentru FIC calculată anterior, factorul de calitate  $Q$  are valoarea de 6,24.

Pentru semnalele staționarizate, fără alte îmbunătățiri, vom calcula funcțiile de intercorelație și vom stabili un deplasament de referință în funcție de debitul la fisură. Prelucrarea se va face pe segmente de lungimi diferite tocmai pentru a evita situațiile în care presiunea din instalație scade dar și pentru a completa studiul cu cât mai multe situații posibile.

Calculul FIC nenormalizate se va face și pe segmente de câte 32768 eșantioane (*sferturi*), 65536 eșantioane (*jumătăți*), iar în final pe lungime totală de 131072 eșantioane. Pentru debitul la fisură de 8,27 l/min, s-au achiziționat 3 perechi de semnale. Aceste perechi se prezintă în tabelul 5.1 împreună cu

parametrii deplasament, calitate (Q) și valoare a maximumului obținuți prin calculul FIC. Numerotarea celor 3 perechi s-a făcut prin valorile 0, 1 și 2.

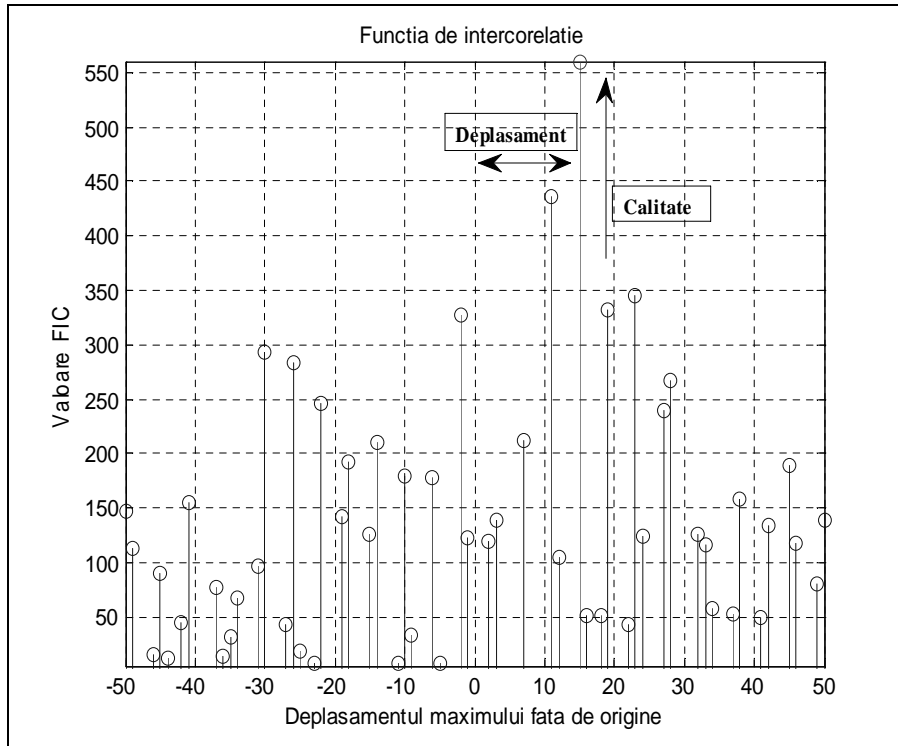


Fig.5.1. Parametrii deplasament și calitate (Q) pentru funcția de intercorelație calculată

În cazul ideal, indiferent de împărțirea pe segmente a semnalelor, valoarea deplasamentului maximumului FIC ar trebui să rămână neschimbată. În cazul real, datorită faptului că achiziția semnalelor este afectată de perturbații (de exemplu, căderea nivelului de presiune în conductă, zgomotele din mediul înconjurător, zgomotele la îmbinări), vom avea mai multe valori pentru deplasamentele maximumului calculate. Putem considera corectă valoarea deplasamentului care apare predominant.

În cazul măsurărilor pentru debitul de 8,27 l/min, remarcăm valoarea deplasamentului de 15 eşantioane la dreapta față de centrul FIC. Această valoare apare în majoritatea cazurilor, doar în două cazuri estimarea fiind diferită.

Putem calcula viteza de deplasare a zgomotelor de fisură. Dacă perioada de eşantionare a semnalelor este  $T_E = 66,6\mu s$ , atunci deplasamentul de 15 eşantioane acoperă (în timp) o durată de  $t = 66,6\mu s \cdot 15 = 999\mu s \approx 1 ms$ .

Presupunem că viteza este constantă în timp și conform descrierii instalației, diferența de distanță  $d$  între drumurile parcurse de zgomote până la cei doi senzori este de 2 m (senzorul 1 este plasat la 1 m de fisură, senzorul 0 este plasat la 3 m de fisură).

Astfel, pentru debitul 8,27 l/min, viteza de propagare a semnalelor de la fisură către senzori prin materialul conductei este  $V = d/t \approx 2m/1ms \approx 2000 m/s$ .

Faptul că maximul FIC se află la dreapta față de origine era de așteptat. În capitolul 3 am evidențiat faptul că Senzorul 1 este plasat mai aproape de fisură prin studiul puterii semnalelor și a reprezentării evoluției pantei fazei pentru densitatea spectrală de putere mutuală. Putem aprecia care este eroarea de localizare introdusă de un eșantion al funcției de intercorelație în cazul acestor perechi de semnale.

Eroarea de localizare este  $E_l = d/15 \text{ esantioane} = 13 \text{ cm}$ .

Tabelul 5.1. Parametrii FIC calculați pentru semnalele obținute la debitul de 8,27 l/min

Perechea	Segmentul	Valoare Maxim	Deplasament	Calitate
0	Sfertul 1	1343.10	15	6,46
	Sfertul 2	1526.39	15	6,02
	Sfertul 3	1322.92	15	6,48
	Sfertul 4	1396.03	15	6,41
	Jumătatea 1	2883.21	15	6,24
	Jumătatea 2	2740.98	15	6,56
	Lungime Totală	5651,05	15	6,42
1	<b>Sfertul 1</b>	<b>59.78</b>	<b>62</b>	<b>4,76</b>
	Sfertul 2	316.69	15	6,22
	Sfertul 3	1003.24	15	6,83
	Sfertul 4	1540.16	15	6,57
	Jumătatea 1	359.44	15	5,77
	Jumătatea 2	2566.22	15	6,72
	Lungime Totală	2939,12	15	6,68
2	Sfertul 1	1275.28	15	6,95
	Sfertul 2	831.05	15	6,20
	Sfertul 3	398.61	15	6,91
	<b>Sfertul 4</b>	<b>58.54</b>	<b>62</b>	<b>4,63</b>
	Jumătatea 1	2127.59	15	6,70
	Jumătatea 2	446.13	15	6,62
	Lungime Totală	2583,45	15	6,74

Dacă studiem tabelul 5.1, între deplasamentul considerat ca fiind corect (valoarea 15) și valoarea de 62 de eșantioane (de exemplu Perechea 1, Sfertul 1) este o diferență de 47 de eșantioane. Această diferență conduce la o localizare total greșită a fisurii. Prin prelucrări suplimentare se va încerca obținerea aceluiași deplasament pentru toate situațiile de calcul cât și îmbunătățirea calității FIC calculate.

Tabelele 5.2 și 5.3 prezintă parametrii calculului FIC pentru alte două măsurări. Se observă că și în cazul semnalelor achiziționate la debitele de 6,09 l/min, respectiv 1,06 l/min se conturează câte un deplasament unitar. În aceste cazuri apar erori de localizare care se datorează unor fenomene perturbatoare imposibil de controlat (de exemplu, zgomotele interne ale conductei, zgomotele din mediul înconjurător).

Tabelul 5.2. Parametrii FIC calculați pentru semnalele la debitul de 6,09 l/min

Perechea	Segmentul	Valoare Maxim	Deplasament	Calitate
0	<b>Sfertul 1</b>	<b>39.22</b>	<b>92</b>	<b>4,32</b>
	<b>Sfertul 2</b>	<b>31.62</b>	<b>17</b>	<b>4,60</b>
	<b>Sfertul 3</b>	<b>53.36</b>	<b>79</b>	<b>4,26</b>
	Sfertul 4	396.76	15	6,77
	<b>Jumătatea 1</b>	<b>70.51</b>	<b>92</b>	<b>4,43</b>
	Jumătatea 2	396.76	15	6,77
	Lungime Totală	361,20	15	5,47
1	Sfertul 1	703.97	15	7,71
	Sfertul 2	393.86	15	7,59
	Sfertul 3	126.24	15	5,59
	Sfertul 4	239.80	15	5,28
	Jumătatea 1	1102.65	15	7,71
	Jumătatea 2	239.80	15	5,28
	Lungime Totală	1352,27	15	7,39
2	<b>Sfertul 1</b>	<b>34.60</b>	<b>92</b>	<b>4,48</b>
	<b>Sfertul 2</b>	<b>38.66</b>	<b>24</b>	<b>4,42</b>
	Sfertul 3	210.73	15	6,94
	Sfertul 4	1044.94	15	7,29
	<b>Jumătatea 1</b>	<b>73.45</b>	<b>24</b>	<b>4,37</b>
	Jumătatea 2	1044.94	15	7,29
	Lungime Totală	1015,33	15	6,88

Tabelul 5.3. Parametrii FIC calculați pentru semnalele la debitul de 1,06 l/min

Perechea	Segmentul	Valoare Maxim	Deplasament	Calitate
0	<b>Sfertul 1</b>	<b>6948,34</b>	<b>18</b>	<b>5,81</b>
	<b>Sfertul 2</b>	<b>13727.30</b>	<b>18</b>	<b>5,82</b>
	Sfertul 3	13198.42	14	5,23
	Sfertul 4	14384.41	14	5,24
	<b>Jumătatea 1</b>	<b>28038,14</b>	<b>18</b>	<b>5,76</b>
	Jumătatea 2	27838.22	14	5,24
	Lungime Totală	54900,04	14	5,29
1	Sfertul 1	6265,31	14	4,98
	Sfertul 2	13026.46	14	5,15
	<b>Sfertul 3</b>	<b>12504.40</b>	<b>18</b>	<b>5,47</b>
	Sfertul 4	12414.43	14	5,28
	Jumătatea 1	27044,61	14	5,21
	Jumătatea 2	24686.88	14	5,24
	Lungime Totală	51949,12	14	5,23
2	<b>Sfertul 1</b>	<b>5707,72</b>	<b>18</b>	<b>5,24</b>
	Sfertul 2	12024.49	14	4,08
	<b>Sfertul 3</b>	<b>11230.19</b>	<b>18</b>	<b>5,44</b>
	Sfertul 4	11429.38	14	4,80
	Jumătatea 1	23872,03	14	4,92
	<b>Jumătatea 2</b>	<b>22342.86</b>	<b>18</b>	<b>5,02</b>
	Lungime Totală	46357,49	14	4,93

## 5.2 Creșterea acurateții de localizare prin albirea semnalelor

În literatura de specialitate apare ideea de “filtrare inversă” sau “albire a semnalelor” (signal whitening) înainte de calculul funcției de intercorelație [B12], [I11]. Acest procedeu are rolul de a ajuta la evidențierea maximului funcției de intercorelație și de a îmbunătăți aspectul acestei funcții. Prin procedeu de albire se urmărește apropierea caracteristicilor semnalelor achiziționate de caracteristicile semnalului de tip zgomot alb. Albirea are rolul de a egaliza (netezi) spectrul de putere al unui semnal. Astfel, influența frecvențelor puternic reprezentate, specifice componentelor continuă și/sau periodice din cadrul unui semnal poate fi atenuată. Se presupune într-un fel, amplificarea puterii liniilor spectrale slab reprezentate și micșorarea puterii liniilor spectrale puternic definite.

Un semnal care are componente periodice, va avea o funcție de autocorelație (FAC) periodică. Astfel, dacă în semnal există o singură componentă periodică importantă, FAC a semnalului va avea o componentă cosinusoidală preponderentă. Influența componentelor periodice se vede și în cadrul spectrului de putere, care prezintă linii spectrale pronunțate, totuși inutile pentru analiza noastră. Aceste fapte ne duc la ideea de eliminare a componentelor periodice din cadrul semnalelor, pentru calcularea unei FAC în care maximul să fie cât mai bine reprezentat. Reprezentarea FAC în cazul eliminării componentelor continuă și/sau periodice prezintă un maxim pronunțat în origine iar în rest, valori aproape nule. Pentru a îmbunătăți aspectul funcției de intercorelație suntem interesați de evidențierea cât mai pronunțată a maximului și de netezirea valorilor calculate care nu prezintă interes. O îmbunătățire a calității semnalului, prin apropierea acestuia de un semnal de tip zgomot alb, conduce la o îmbunătățire a reprezentării frecvențelor în cadrul spectrului de putere. Vom observa o egalizare a acestor spectre. Este important ca semnalele cu care lucrăm să prezinte un spectru cât mai aplatizat. Dacă se îndeplinește această condiție, calculul funcției de intercorelație (FIC) va prezenta un maxim foarte pronunțat.

Din punct de vedere teoretic, putem presupune că zgomotul real produs de fisură, se poate obține prin trecerea unui semnal de tip zgomot alb,  $w(n)$ , printr-un filtru cu funcția de transfer discretă,  $H(z)$ . Traseul parcurs de zgomot de la sursa primară (fisura), până la senzori, este modelat în Fig.5.2, prin funcțiile de transfer  $H1(z)$  și  $H2(z)$ . Aceasta înseamnă că transformarea semnalului primar pe căile de propagare este o operație liniară (filtrare, atenuare, întârziere).

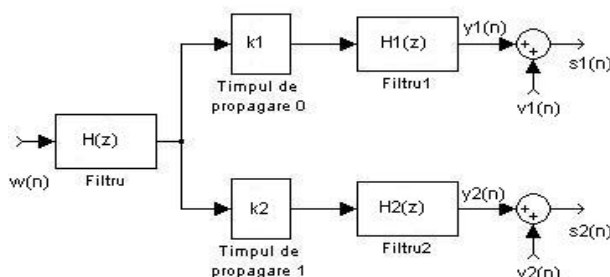


Fig.5.2. Modelul propagării zgomotelor de fisură

În Fig.5.2 se observă prezența timpilor de propagare diferiți,  $k_1$  și  $k_2$ . Semnalele care ajung la senzori,  $s_1(n)$  și  $s_2(n)$ , sunt compuse din semnalele utile  $y_1(n)$  și  $y_2(n)$ , la care se adaugă semnalele perturbatoare,  $v_1(n)$  și  $v_2(n)$ . Modelul de mai sus poate fi transformat în unul echivalent prin gruparea funcției de transfer comună  $H(z)$ , cu funcțiile de transfer  $H_1(z)$  și  $H_2(z)$ , specifice celor două căi de propagare. Din punct de vedere teoretic, funcția de intercorelație (FIC) a celor două semnale, va prezenta un maxim în poziția  $k=k_1-k_2$ , acest maxim reprezentând diferența timpilor de propagare până la cei doi senzori.

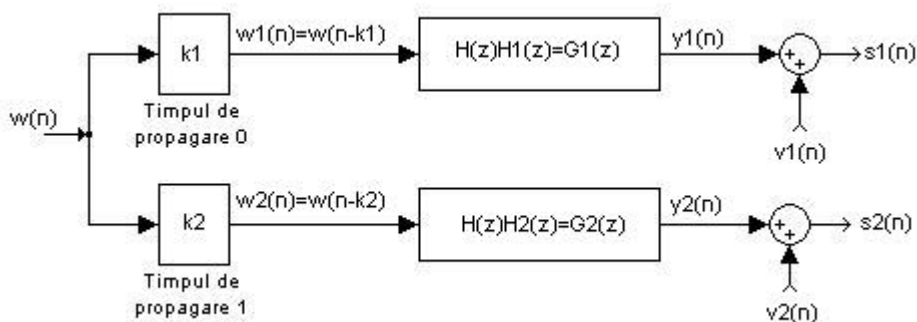


Fig.5.3. Schema echivalentă a modelului de propagare a zgomotului de fisură

Putem presupune că FIC a semnalelor  $s_1(n)$  și  $s_2(n)$  este aceeași cu a semnalelor utile  $y_1(n)$  și  $y_2(n)$ , deoarece zgomotele perturbatoare  $v_1(n)$  și  $v_2(n)$  nu sunt corelate nici între ele și nici cu componentele utile  $y_1(n)$  și  $y_2(n)$ . Vom considera zgomotele  $v_1(n)$  și  $v_2(n)$  independente și fără influență asupra FIC [I11].

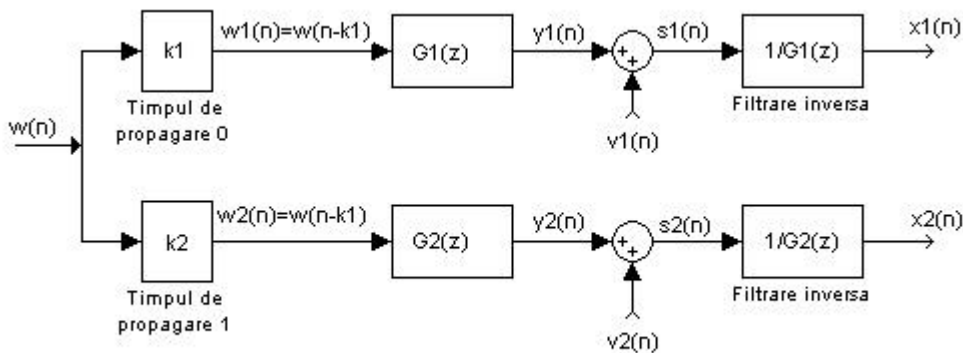


Fig.5.4. Modelul filtrării inverse a semnalelor generate de fisură

Funcțiile de transfer  $G_1(z)$  și  $G_2(z)$ , dau spectrele semnalelor utile  $y_1(n)$  și  $y_2(n)$ . Transformatele Fourier ale celor două funcții de transfer reprezintă FAC ale semnalelor utile  $y_1(n)$  și  $y_2(n)$ . Trecerea zgomotului alb  $w(n)$  prin cele două funcții de transfer de pe fiecare ramură, face ca semnalele rezultate să aibă anumite

frecvențe mai bine reprezentate în spectru astfel încât semnalele  $y_1(n)$  și  $y_2(n)$  pot fi considerate zgomote roz. De asemenea, FAC ale semnalelor măsurate conțin și efectul perturbațiilor  $v_1(n)$  și  $v_2(n)$ . Efectul acestor perturbații va putea fi eliminat prin calculul FIC. Pentru ca această FIC să aibă un maxim cât mai pronunțat, modelul din Fig.5.4. cuprinde pe fiecare ramură și filtrarea inversă (albirea) pentru semnalele măsurate. Filtrarea inversă se realizează cu funcția de transfer  $1/G_1(z)$ , respectiv  $1/G_2(z)$ .

Filtrarea inversă implică utilizarea unor algoritmi de estimare spectrală parametrică. Dacă presupunem că avem un set de date, spre exemplu, o secvență reală dintr-un semnal, putem aproxima acel set prin intermediul unui filtru liniar, la intrarea căruia se aplică un zgomot alb. Caracterizarea se poate face prin analiza puterii zgomotului de la intrare, precum și prin determinarea parametrilor filtrului implicat [I10].

Estimarea spectrală parametrică, înseamnă determinarea parametrilor care formează filtrul, precum și puterea zgomotului de la intrare, în raport cu funcția de autocorelație a semnalului care se dorește a fi analizat.

Pentru descrierea unui proces aleator sau set de date, se poate face o selecție dintr-o serie de modele de estimare parametrică. Pe baza modelului de estimare parametrică ales, rezultă analiza spectrală și concluziile aferente acesteia. Este important să se aleagă în mod cât mai corect modelul care poate caracteriza setul de date aleatoare.

În programele dedicate acestui scop, este important ca selecția modelului optim să se facă în mod automat, pe baze statistice, fără ca utilizatorul să cunoască în detaliu toate procedurile de alegere a modelului.

Tipul de structură sau model ales pentru caracterizarea semnalelor achiziționate este cel autoregresiv (AR) sau recursiv. Modelul autoregresiv exprimă valoarea curentă a unui eșantion, pe baza valorilor trecute ale propriilor eșantioane. Alegerea acestui model s-a făcut în urma studierii a 3 posibile modele: autoregresiv (AR), medie alunecătoare (MA) și autoregresiv- medie alunecătoare (ARMA). Estimarea automată și selecția unui model de tip AR, MA sau ARMA, se bazează pe alegerea celui model care prezintă eroarea minimă.

În cadrul studiilor efectuate pentru determinarea modelului care prezintă eroarea de estimare minimă, modelul AR a fost considerat ca fiind optim pentru caracterizarea semnalelor generate de fisuri în conducte. Indiferent de numărul de eșantioane cu care se lucrează (din același semnal), modelul pentru această estimare este cel autoregresiv (AR). Din acest punct de vedere, putem să spunem că este suficient să ne concentrăm pe acest tip de estimare, în cazul semnalelor achiziționate de la sursa de zgomot studiată. Foarte aproape de eroarea de estimare a metodei AR se situează și eroarea de estimare rezultată prin utilizarea modelului ARMA [I6].

Pentru a urmări mai ușor relațiile ce vor fi prezentate, se va ține cont de funcția de transfer a unui filtru liniar, definită de relația (5.1). Considerăm ieșirea filtrului (semnalul rezultat)  $X(z)$ , intrarea filtrului (zgomotul alb) fiind  $U(z)$ .

$$X(z) = H(z)U(z) = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-n}}{1 + a(2)z^{-1} + \dots + a(m+1)z^{-m}}U(z) \quad (5.1)$$

Funcția de transfer a modelului AR este [I10]:

$$H^{AR} = \frac{X(z)}{U(z)} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^p a_i z^{-i}} \quad (5.2)$$

Ordinul modelului, după cum rezultă din formulă, este  $p$ . Expresia rezultă din caracterizarea unui filtru, în funcție de transformatele  $Z$  ale intrării și ieșirii. Este cazul în care numărătorul este egal cu 1, deci  $n$  este zero.

Pentru studiul semnalelor obținute pe bază experimentală se vor utiliza două metode de analiză spectrală parametrică. Aceste metode sunt Yule-Walker (metoda autocorelației) și Burg. Justificarea pentru alegerea celor două metode, descrierea acestora dar și testarea lor împreună cu semnale generate de fisuri în conducte sunt tratate în raportul de cercetare intitulat *Îmbunătățirea preciziei de localizare a surselor de zgomot folosind filtre de albire*, susținut în timpul programului de doctorat [I7].

În Fig.5.5, se prezintă un mod de prelucrare a semnalelor măsurate care include determinarea coeficienților autoregresivi (AR) ai semnalelor  $s1(n)$  și  $s2(n)$ , filtrarea inversă a acestor semnale și calculul FIC pentru semnalele albite.

Semnalul de la fiecare senzor, este introdus într-un bloc de estimare parametrică (Estimare AR: Burg), în vederea obținerii ieșirea blocului a unui șir de coeficienți (ieșirea A) care aproximează semnalul provenit de la senzor. Pe baza acestor coeficienți se poate determina estimarea spectrală a semnalului de la intrare. După cum se observă, modelul autoregresiv AR, potrivit pentru utilizarea împreună cu zgomotele generate de fisuri în conducte, este util în determinarea coeficienților numitorului funcției de transfer.

Astfel, dacă avem un șir de coeficienți AR, aparținând numitorului funcției de transfer  $G(z)$ , putem realiza filtrarea inversă a semnalului de la intrare ( $1/G(z)$ ), dacă folosim un bloc Filter. Conexiunile blocului Filter, sunt *Input*, *Num* și *Den*. La intrarea pentru coeficienții numitorului (*Num*), vom conecta șirul de coeficienți obținuți după modelarea AR. Astfel, filtrarea inversă a semnalului de la intrarea *Input*, se va face printr-o funcție de transfer care are coeficienții AR (specfici numitorului, determinați automat prin blocul Estimare AR: Burg) plasați la intrarea pentru coeficienții numărătorului. Intrarea *Den* (coeficienții numitorului) rămâne neconectată, nefiind utilizată în acest caz. Funcția după care se va face filtrarea semnalelor achiziționate va fi inversa funcției de transfer care aproximează prin modelul AR coeficienții specfici semnalelor.

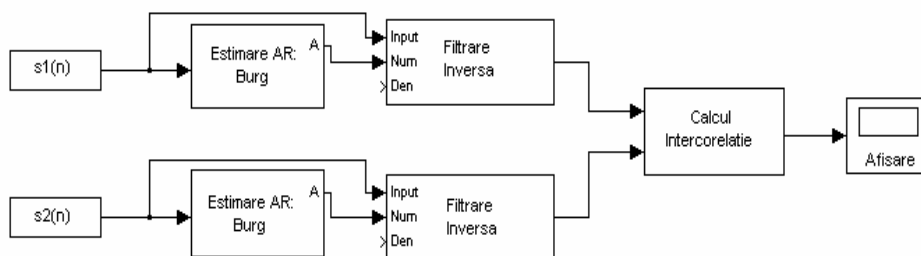


Fig.5.5. Filtrarea inversă a semnalelor generate de fisură



Procedeele de albire utilizează pentru estimarea Burg sau Yule-Walker un număr de coeficienți. Se pune problema utilizării unui număr de coeficienți suficient de mare pentru a obține o funcție de intercorelație cât mai clară, dar fără a utiliza inutil resursele de calcul ale sistemului. De asemenea, trebuie să alegem metoda de estimare potrivită (Burg sau Yule-Walker) astfel încât pentru un număr de coeficienți fix, să avem cele mai bune rezultate. În discuție intră și lungimea semnalelor care sunt prelucrate prin procedeul de albire.

Cu cât numărul de eșantioane al semnalelor este mai mare, cu atât procesul de albire durează mai mult. Timpul de execuție este un parametru relativ. El depinde de la un sistem de calcul la altul. Valorile acestui timp de execuție sunt orientative. Tendința pe care aceste valori o indică trebuie luată în considerare.

Pentru exemplificare, pentru o pereche de semnale staționarizate, de lungime 16384 eșantioane, achiziționate la debitul de 6,09 l/min (Fig.5.6), se va aplica procedeul de albire.

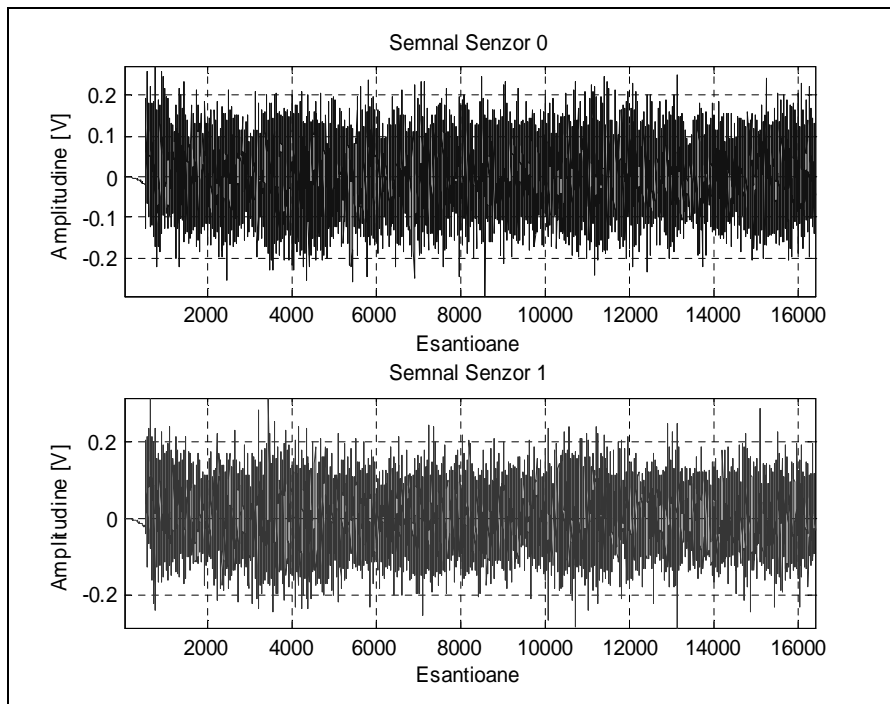


Fig.5.6. Pereche de semnale, debit 6,09 l/min

Conform tabelului 5.2, pentru, *Perechea 0, Sfertul 1*, deplasamentul estimat este de 92 eșantioane, iar factorul de calitate este 4,32. Alegem această pereche deoarece reprezintă unul dintre cazurile nefavorabile de calcul. Deplasamentul pe care dorim să îl obținem este de 15 eșantioane. Metoda aleasă este Burg, numărul de coeficienți utilizați este de 100.

Fig.5.7 prezintă funcția de intercorelație inițială, calculată înainte de implementarea procedurii de albire.

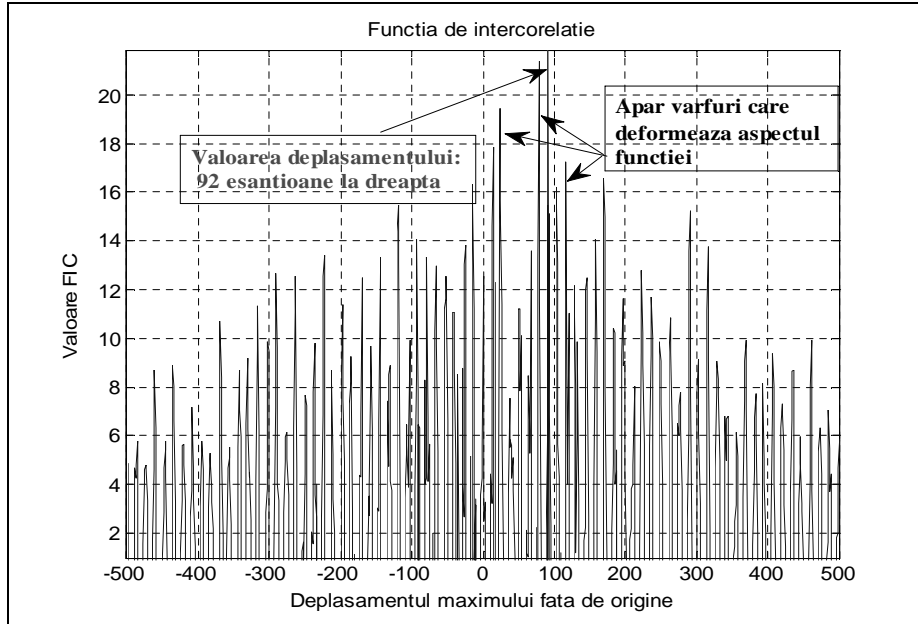


Fig.5.7. Funcția de intercorelație inițială, fără prelucrări suplimentare

În Fig.5.8 se prezintă densitatea spectrală a semnalelor inițiale înainte de aplicarea procedurii de albire.

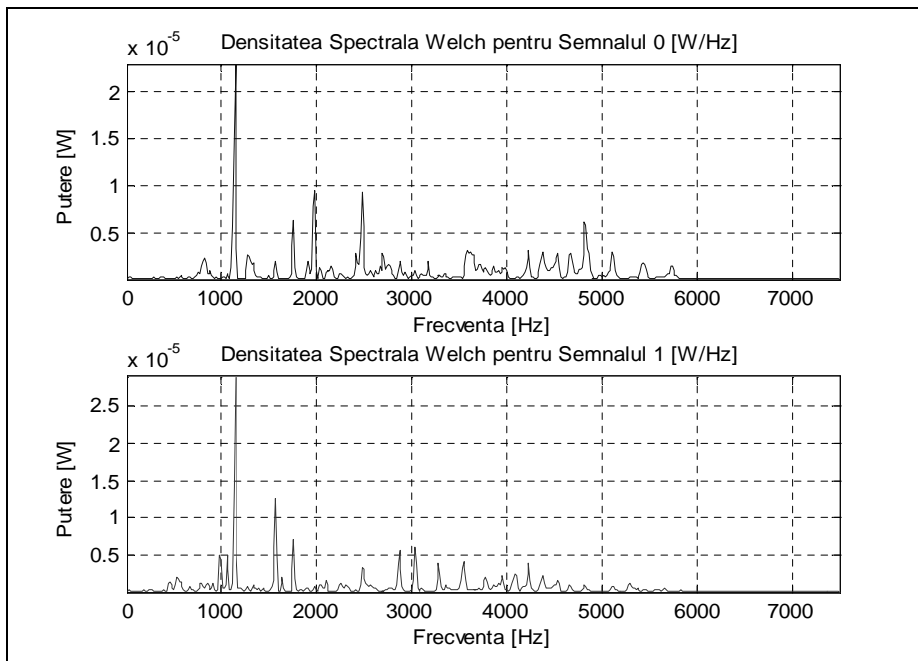


Fig.5.8. Densitatea spectrală a semnalelor inițiale, nealbite

În Fig.5.9 și Fig.5.10 se prezintă caracteristicile în domeniul frecvențe pentru procesele autoregresive care estimează semnalele achiziționate. Se arată faptul că după filtrarea pentru albire, caracteristica proceselor autoregresive se inversează.

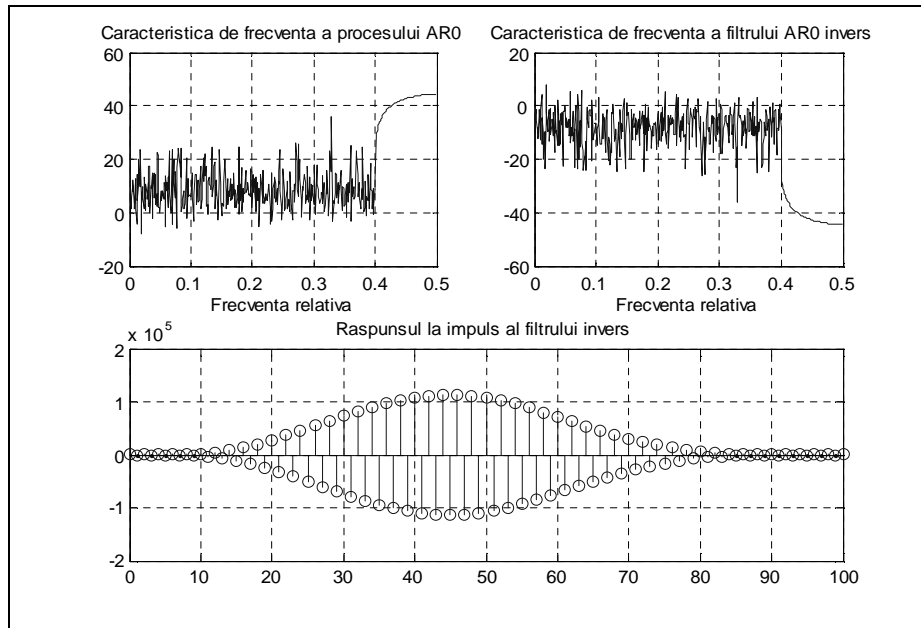


Fig.5.9. Caracterul de filtru invers al albirii pentru semnalul 0

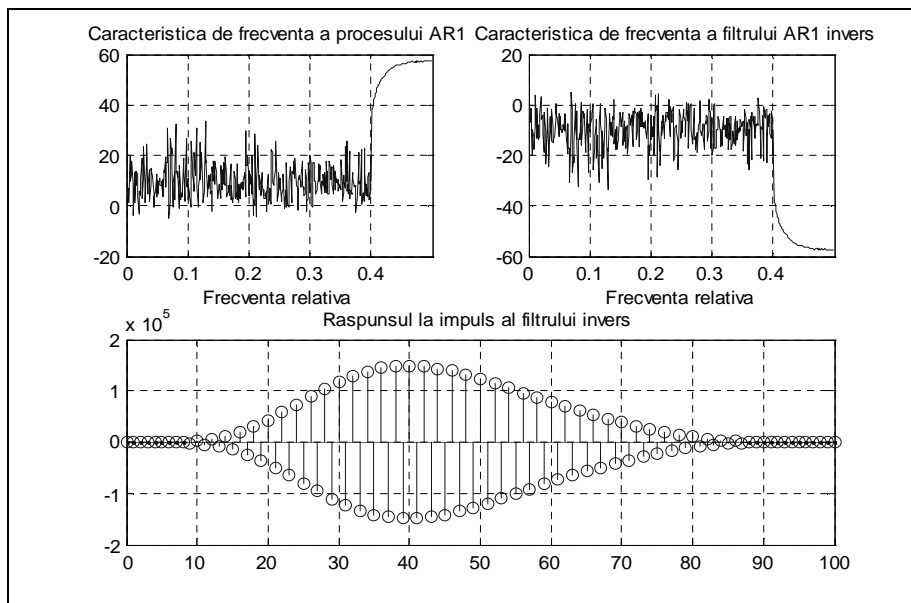


Fig.5.10. Caracterul de filtru invers al albirii pentru semnalul 1

Netezirea spectrelor se evidențiază în Fig.5.11. Față de reprezentarea spectrală inițială, se observă amplificarea componentelor spectrale care erau mai slab reprezentate.

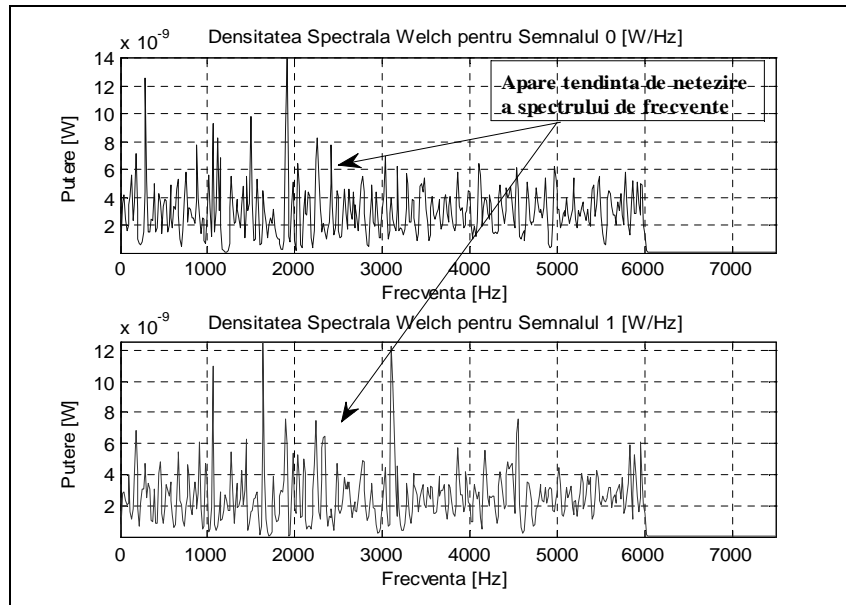


Fig.5.11. Netezirea spectrelor prin procesul de albire a semnalelor

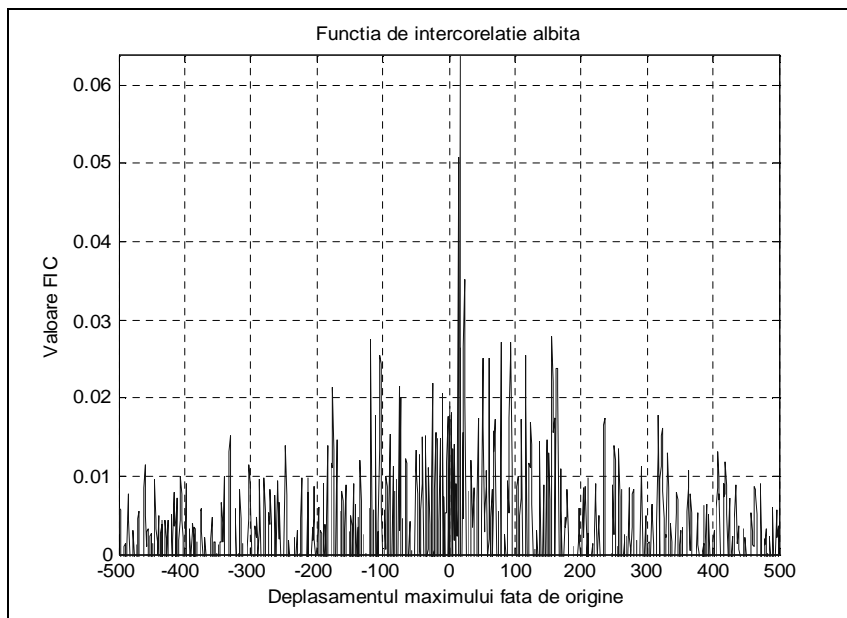


Fig.5.12. Funcția de intercorelație îmbunătățită după albire

După aplicarea procedurii de albire și calculul funcției de intercorelație, valoarea deplasamentului este 17 (Fig.5.12). Se remarcă o îmbunătățire evidentă la acest nivel dar și la nivelul coeficientului de calitate al funcției. Acesta are valoarea de 7,83.

Dacă privim procesul de albire din punctul de vedere al vitezei de execuție vom lua în calcul numărul coeficienților utilizați și lungimea semnalelor cu care lucrăm.

Pentru exemplificare, vom utiliza semnale staționarizate, achiziționate la debitul de 8,27 l/min și vom arăta valorile orientative ale timpului de execuție în funcție de numărul de coeficienți *Coef* (ordinul modelului) și de lungimea semnalelor *L*. Metoda de estimare aleasă este Burg.

Tabelul 5.4 arată timpii de execuție orientativi în cazul utilizării unui număr maxim de 100 de coeficienți. Lungimile segmentelor variază între 10000÷80000 eșantioane. În Fig.5.13 reprezentarea s-a făcut pentru lungimi ale segmentelor în intervalul 10000÷100000.

Tabelul 5.4. Timpul de execuție în funcție de ordinul modelului și lungimea semnalelor

<b>L/Coef</b>	<b>10000</b>	<b>20000</b>	<b>30000</b>	<b>40000</b>	<b>50000</b>	<b>60000</b>	<b>70000</b>	<b>80000</b>
<b>100</b>	0.375	0.796	1.234	1.406	1.734	2	2.984	3.468
<b>90</b>	0.328	0.718	1.156	1.328	1.703	1.875	2.765	3.125
<b>80</b>	0.281	0.625	1.046	1.234	1.437	1.703	2.625	2.828
<b>70</b>	0.296	0.578	0.937	1.171	1.328	1.546	2.281	2.578
<b>60</b>	0.234	0.546	0.828	1.015	1.203	1.453	2.046	2.296
<b>50</b>	0.203	0.468	0.734	0.890	1.078	1.218	1.796	2.015
<b>40</b>	0.187	0.437	0.640	0.812	0.921	1.109	1.562	1.75
<b>30</b>	0.156	0.375	0.562	0.671	0.812	0.921	1.328	1.5
<b>20</b>	0.125	0.296	0.421	0.562	0.671	0.796	1.062	1.203
<b>10</b>	0.125	0.250	0.343	0.468	0.546	0.656	0.859	0.953

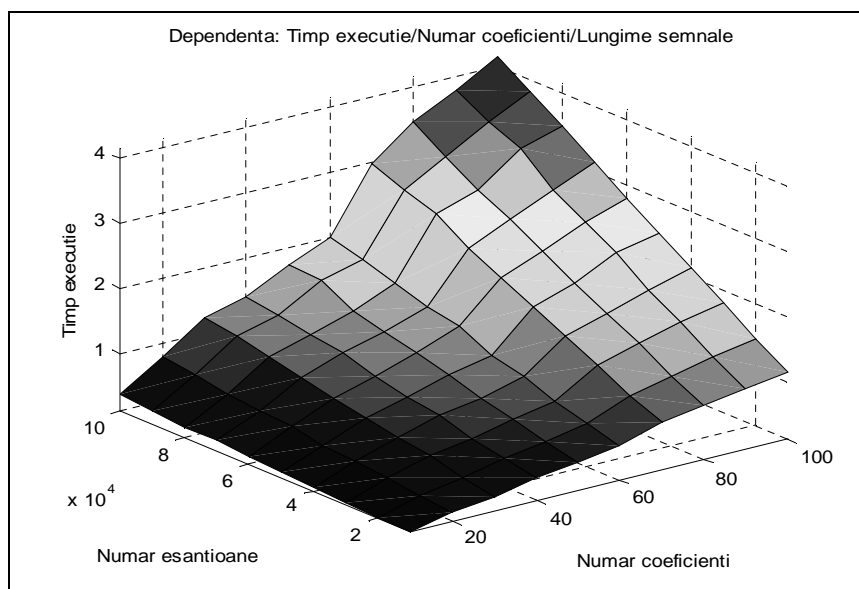


Fig.5.13. Reprezentarea raportului timp de execuție/ ordin model/ lungime semnale

Din figura 5.13 se observă că prin creșterea numărului de eșantioane cu care se lucrează, efectul asupra timpului de execuție nu este foarte pronunțat (pentru un număr mic de coeficienți). Creșterea numărului de coeficienți (ordinul modelelor), afectează destul de mult timpul de execuție al programului.

Îmbunătățirea factorului de calitate al calculului FIC reprezintă o prioritate în cazul semnalelor dominate de perturbații puternice. Pentru o pereche de semnale de lungime 16384 eșantioane, achiziționate la debitul de 8,27 l/min, se va aplica procedura de albire. Se urmărește evoluția deplasamentelor și a coeficientului de calitate în condițiile creșterii ordinului modelelor utilizate pentru albire. În Fig.5.14 se prezintă evoluția factorilor de calitate pentru calculul funcției de intercorelație pe baza metodelor Burg și Yule-Walker. Numărul de coeficienți este în intervalul (10÷250). Ceea ce se dovedește este că prin creșterea numărului de coeficienți suficient de mult nu obținem neaparat creșterea proporțională a factorului de calitate. Este important să urmărim și evoluția deplasamentelor calculate pe măsură ce numărul de coeficienți crește.

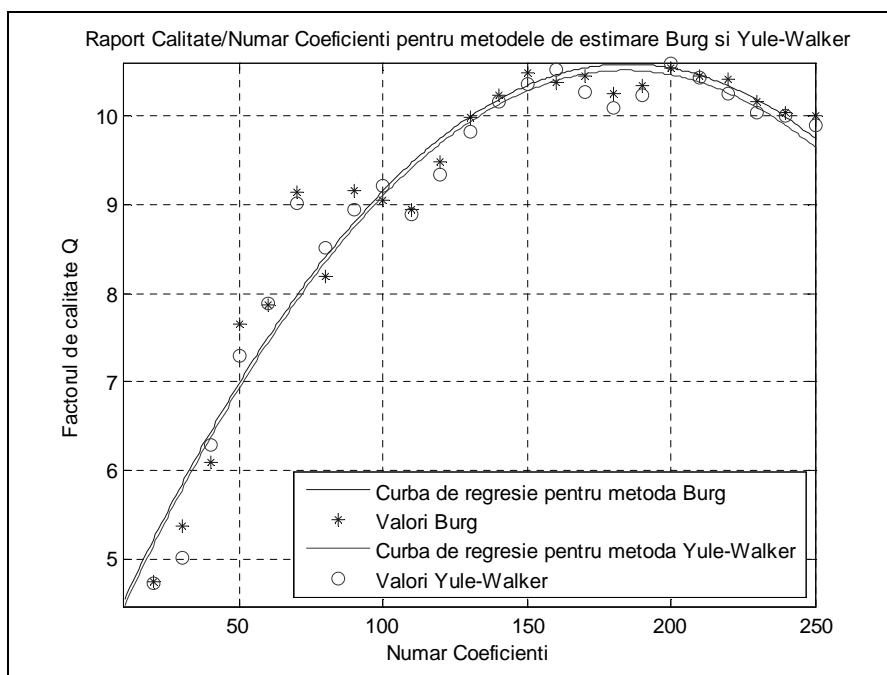


Fig.5.14. Evoluția calității în funcție de numărul de coeficienți, debit 8,27 l/min

După cum rezultă din imaginea precedentă, pentru aceste semnale putem sublinia două aspecte. Metoda Burg are un ușor avantaj în ceea ce privește calitatea cu care se face calculul funcției de intercorelație. Rezultatul este un sistem generator stabil, deoarece puterea erorilor este minimă. Metoda este avantajoasă pentru seturi reduse de date, precum și în cazul semnalelor de joasă frecvență, în aceste cazuri, estimările fiind foarte aproape de valorile reale [110].

Mai important este faptul că un număr mai mare de coeficienți nu asigură automat o calitate mai bună a estimării. Se observă micșorarea calității estimării dacă în procesul de albire sunt folosiți mai mult de 180 coeficienți. Deplasamentul

calculat pentru aceste semnale, pe măsură ce numărul coeficienților de albire crește, rămâne constant la valoarea așteptată (15 eşantioane). Pentru îmbunătățirea estimărilor vom utiliza metoda Burg și un număr de 150 coeficienți.

Pentru semnalele din tabelul 5.1., *Perechea 0*, vom aplica procedeul de albire în ideea îmbunătățirii factorului de calitate (Q) pentru reprezentarea FIC. Urmărim ca pentru același deplasament să obținem o calitate superioară a estimărilor. Astfel se studiază situația în care, pentru o pereche de semnale fără deplasamente diferite, după un prim calcul al intercorelației, se încearcă îmbunătățirea calității estimărilor (tabelul 5.5).

Tabelul 5.5. Evoluția calității după procesul de albire, perechea 0, debit 8,27 l/min

Segmentul	Deplasament	Q	Deplasament după albire	Q după albire	Număr coeficienți
Sfertul 1	15	6,46	15	10.40	150
Sfertul 2	15	6,02	15	10.70	150
Sfertul 3	15	6,48	15	10.80	150
Sfertul 4	15	6,41	15	10.29	150
Jumătatea 1	15	6,24	15	10.80	150
Jumătatea 2	15	6,56	15	10.73	150
Lungime Totală	15	6,42	15	10.88	150

După cum reiese din tabelul 5.5, în cazul în care semnalele achiziționate prezintă un deplasament unitar (15 eşantioane în cazul de față), procedeul de albire este util în vederea creșterii factorului de calitate al funcției de intercorelație calculate.

În cadrul tabelului 5.1 se remarcă două situații de achiziție unde apar probleme de estimare. Pentru *Perechea 1*, *Sfertul 1* și *Perechea 2*, *Sfertul 4* apar deplasamente de 62 eşantioane. Prin aplicarea procedurii de albire și alegerea numărului potrivit de coeficienți, se încearcă recalcularea funcțiilor de intercorelație astfel încât să se obțină același deplasament în tot tabelul. *Sfertul 1* înseamnă că intervalul de eşantioane utilizate este cuprins între  $(1 \div 32768)$ , iar pentru *Sfertul 4* se va utiliza intervalul de eşantioane  $(98305 \div 131072)$ . Dacă pentru *Perechea 1*, *Sfertul 1*, utilizăm 70 de coeficienți sau mai mult de 120 de coeficienți, vom obține estimarea dorită (Fig.5.15).

Spre exemplu, dacă utilizăm 150 de coeficienți obținem o estimare corectă a deplasamentului și un factor de calitate cu valoarea 5,27. Pentru *Perechea 2*, *Sfertul 4*, obținem estimarea dorită doar în cazul utilizării a 70 de coeficienți, iar factorul de calitate obținut este de 5,63 (Fig.5.16).

Se observă faptul că pentru semnalele a căror funcție de intercorelație prezintă inițial un deplasament greșit și o calitate slabă a evidențierii maximumului, prin procedura de albire, putem obține un deplasament corect însă creșterea factorului de calitate este redusă.

În tabelul 5.6 sunt prezentate rezultatele obținute în urma aplicării procedurii de albire pentru semnalele din tabelul 5.1. Se evidențiază obținerea unui deplasament unitar și a unui factor de calitate îmbunătățit, în special pentru semnalele care prezentau inițial un deplasament calculat corect.

În Fig.5.17 putem observa evoluția calității FIC după aplicarea procedurii de albire.

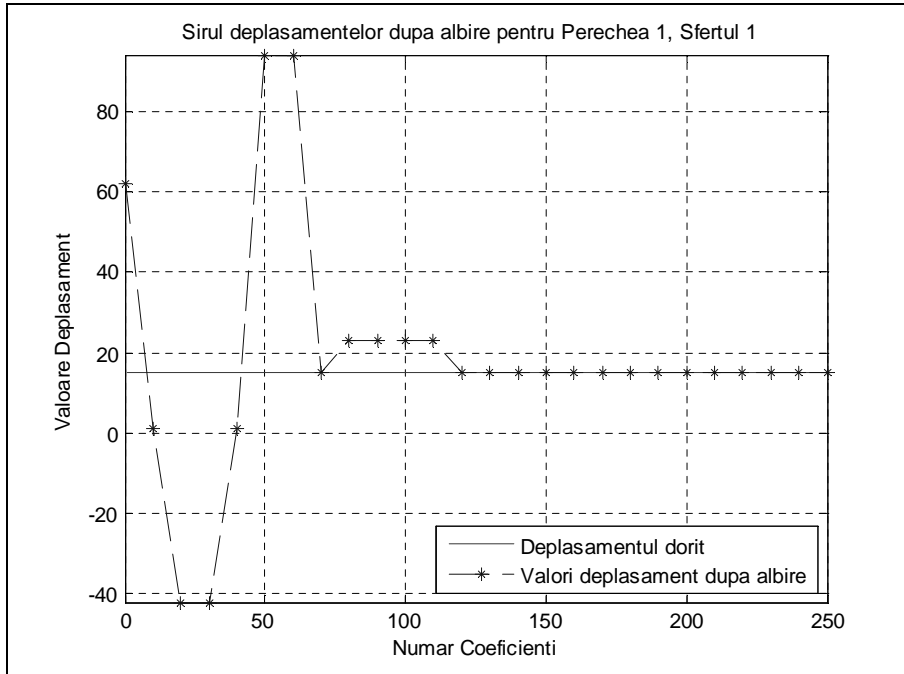


Fig.5.15. Evoluția deplasamentelor după procedura de albire, debit 8,27 l/min

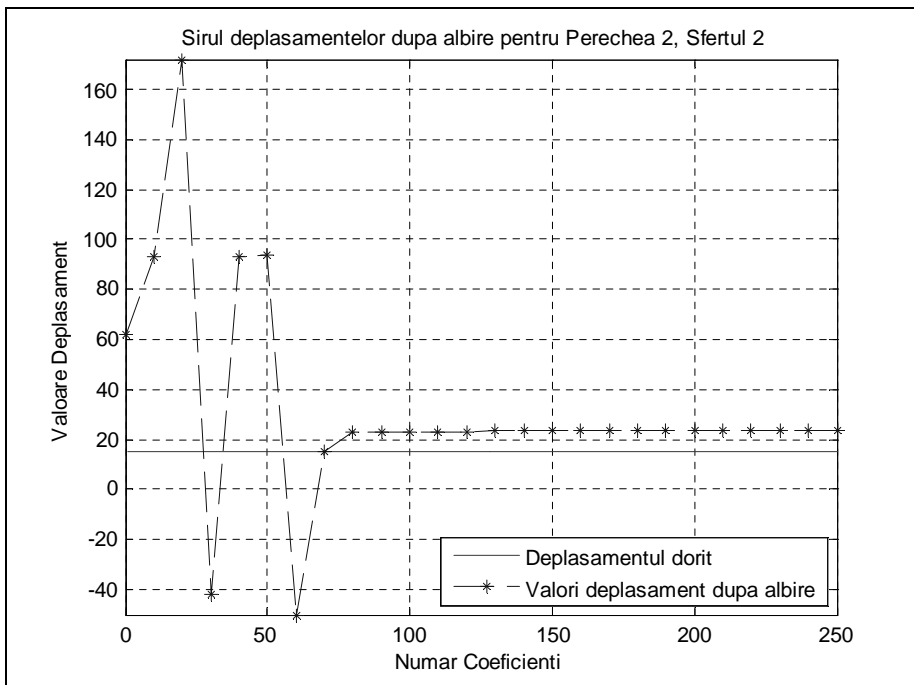


Fig.5.16. Evoluția deplasamentelor după procedura de albire, debit 8,27 l/min



Valorile coeficienților de calitate din tabelul 5.6 sunt mai mari în raport cu valorile coeficienților de calitate din tabelul 5.1. În cazul semnalelor din tabelele 5.2 și 5.3 se aplică în același mod procedeul de albire.

Tabelul 5.6. Situația FIC calculate după aplicarea albirii pentru semnalele la debitul 8,27 l/min

Perechea	Segmentul	Deplasament	Q	Coeficienți albire
0	Sfertul 1	15	10,40	150
	Sfertul 2	15	10,70	150
	Sfertul 3	15	10,80	150
	Sfertul 4	15	10,29	150
	Jumătatea 1	15	10,80	150
	Jumătatea 2	15	10,73	150
	Lungime Totală	15	10,88	150
1	Sfertul 1	15	5,27	150
	Sfertul 2	15	7,45	150
	Sfertul 3	15	10,71	150
	Sfertul 4	15	9,76	150
	Jumătatea 1	15	6,60	150
	Jumătatea 2	15	10,28	150
	Lungime Totală	15	9,59	150
2	Sfertul 1	15	10,50	150
	Sfertul 2	15	10,09	150
	Sfertul 3	15	9,53	150
	Sfertul 4	15	5,63	70
	Jumătatea 1	15	10,37	150
	Jumătatea 2	15	8,13	150
	Lungime Totală	15	9,76	150

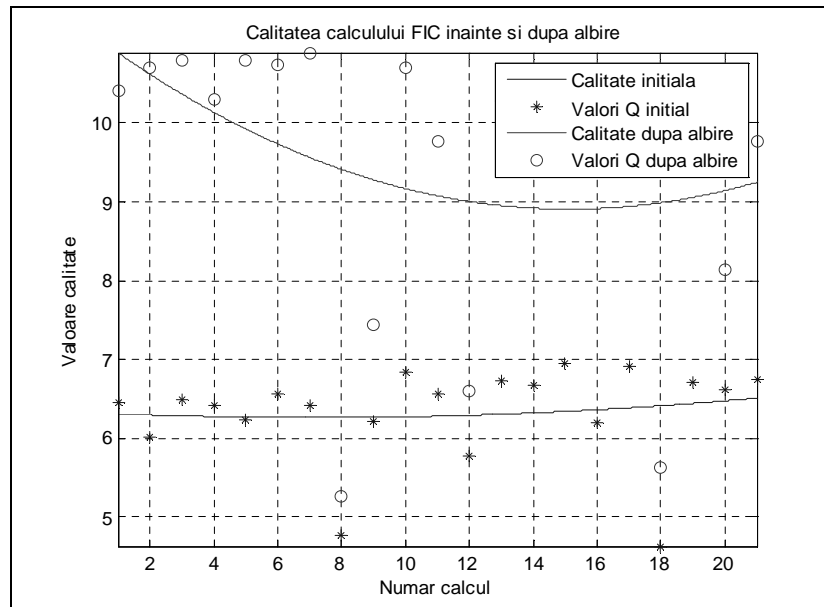


Fig.5.17. Evoluția calității FIC calculate după aplicarea albirii, debitul 8,27 l/min

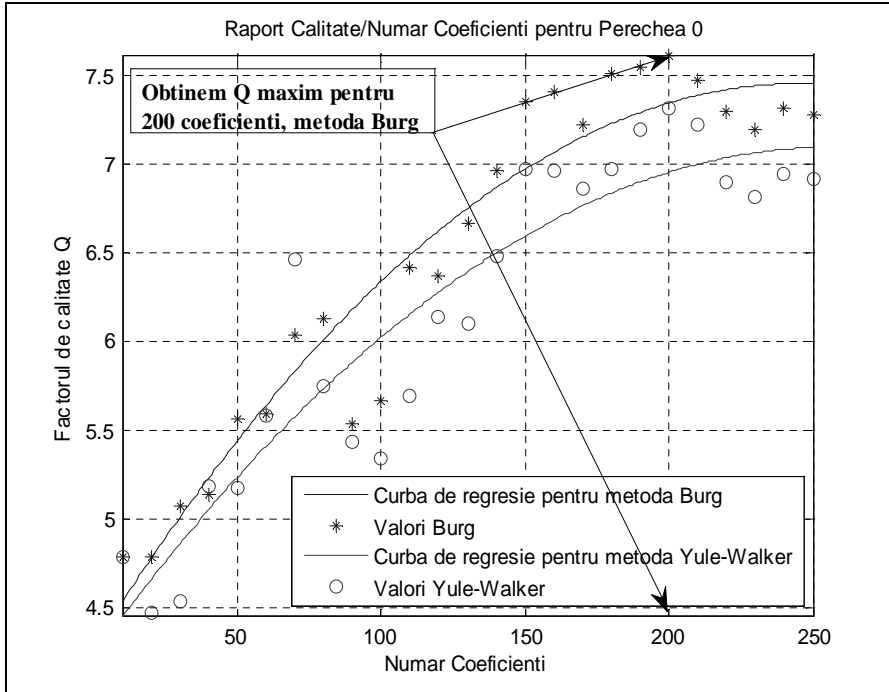


Fig.5.18. Evoluția calității în funcție de numărul de coeficienți, debit 6,09 l/min

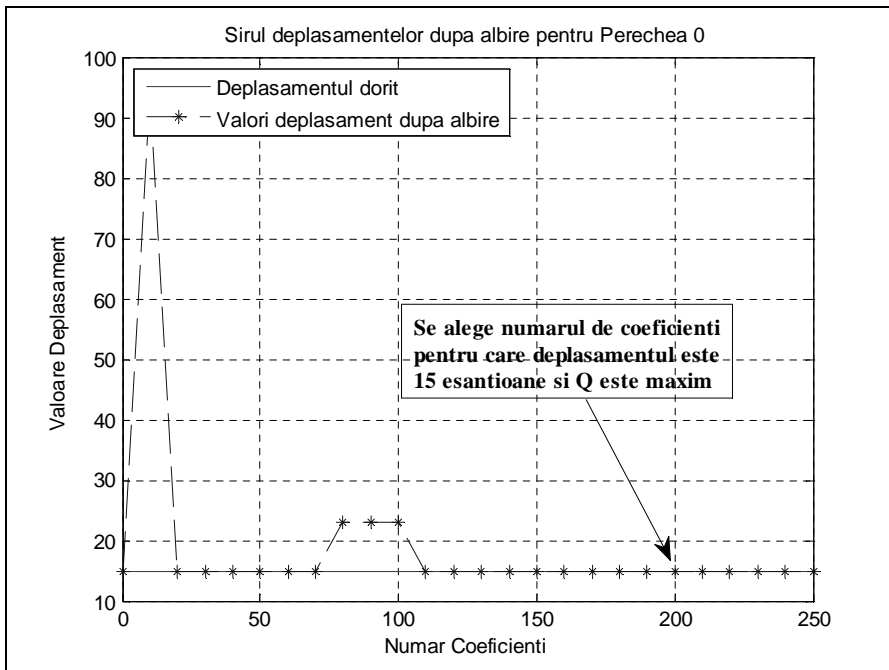


Fig.5.19. Evoluția deplasamentelor după procedura de albire, debit 6,09 l/min

În cazul în care obținem deplasamentul dorit, când am utilizat un număr diferit de coeficienți, avem mai multe opțiuni.

Pentru un timp de execuție mai scurt vom alege cazul în care numărul de coeficienți este minim. În cazul de față, am ales să utilizăm pentru albire acel număr de coeficienți pentru care obținem deplasamentul dorit (sau cel mai apropiat de cel dorit) și factorul de calitate cel mai ridicat.

Ca exemplu, considerăm rezultatele obținute pentru *Perechea 0* din tabelul 5.7. Tabelul 5.7 prezintă două valori care pot indica locul fisurii (17 și 15).

Ambele valori sunt plauzibile și datorită faptului că funcția de intercorelație calculată are coeficienți de calitate foarte buni. Putem accepta faptul că apare o eroare de estimare de 2 eșantioane.

Valoarea deplasamentului care apare cu precădere este cea de 15 eșantioane. În restul cazurilor dacă facem comparația cu rezultatele obținute inițial, îmbunătățirile aduse de procedeul albirii sunt evidente.

Tabelul 5.7. Situația FIC calculate după aplicarea albirii pentru semnalele la debitul 6,09 l/min

Perechea	Segmentul	Deplasament	Calitate	Coeficienți albire
0	Sfertul 1	17	9,75	170
	Sfertul 2	17	9,35	170
	Sfertul 3	17	8,37	170
	Sfertul 4	15	10,62	200
	Jumătatea 1	17	9,59	160
	Jumătatea 2	15	9,49	200
	Lungime Totală	15	7,40	200
1	Sfertul 1	15	11,20	210
	Sfertul 2	15	10,11	200
	Sfertul 3	15	7,00	200
	Sfertul 4	15	7,50	200
	Jumătatea 1	15	10,99	210
	Jumătatea 2	15	7,28	200
	Lungime Totală	15	10,00	200
2	Sfertul 1	17	8,33	170
	Sfertul 2	17	7,61	170
	Sfertul 3	15	9,24	200
	Sfertul 4	15	12,65	200
	Jumătatea 1	17	8,36	170
	Jumătatea 2	15	12,15	200
	Lungime Totală	15	11,05	200

O modificare importantă este reprezentată de valoarea deplasamentelor pentru situația din tabelul 5.3 .

Dacă inițial am fi considerat valoarea de 14 a deplasamentelor ca fiind cea corectă, aplicarea procesului de albire arată că valoarea corectă a deplasamentului pentru acest caz este 18 (tabelul 5.8). Valoarea considerată corectă inițial (valoarea 14) apare datorită faptului că fisura simulată (sursa de zgomete) nu este punctiformă.

Tabelul 5.8. Situația FIC calculate după aplicarea albirii pentru semnalele la debitul 1,06 l/min

Perechea	Segmentul	Deplasament	Calitate	Coefficienți albire
0	Sfertul 1	18	12,46	220
	Sfertul 2	18	12,45	220
	Sfertul 3	18	12,50	220
	Sfertul 4	18	12,40	240
	Jumătatea 1	18	12,37	220
	Jumătatea 2	18	12,36	220
	Lungime Totală	18	12,35	220
1	Sfertul 1	18	12,85	220
	Sfertul 2	18	12,55	220
	Sfertul 3	18	12,70	220
	Sfertul 4	18	12,15	240
	Jumătatea 1	18	12,70	220
	Jumătatea 2	18	12,55	220
	Lungime Totală	18	12,65	220
2	Sfertul 1	18	11,97	160
	Sfertul 2	18	11,95	160
	Sfertul 3	18	12,16	160
	Sfertul 4	18	12,15	160
	Jumătatea 1	18	11,95	160
	Jumătatea 2	18	12,15	160
	Lungime Totală	18	11,85	170

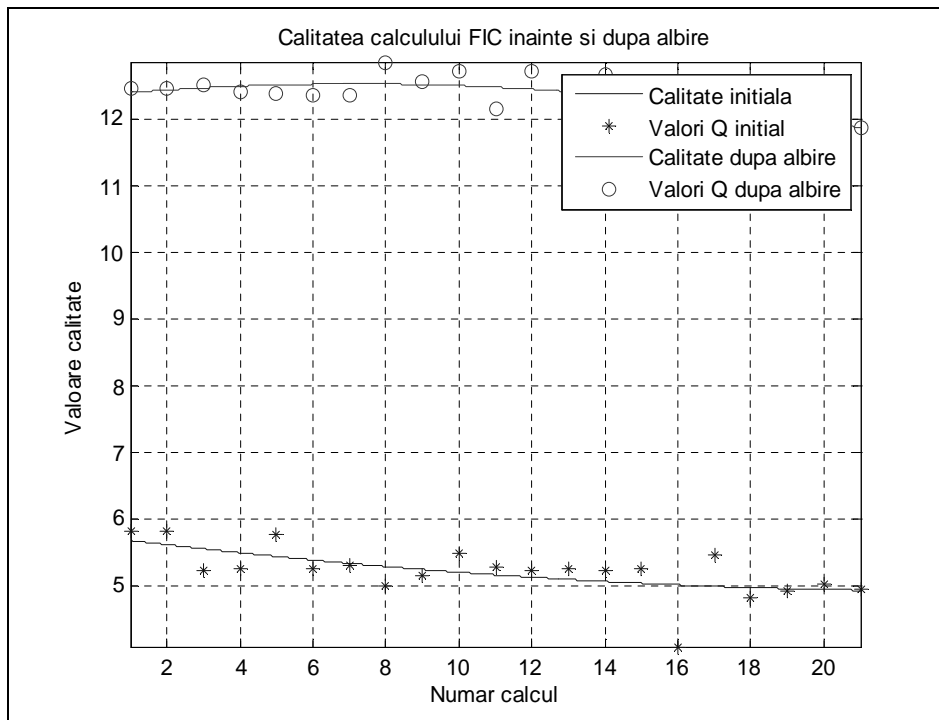


Fig.5.20. Evoluția calității FIC calculate după aplicarea albirii, debitul 1,06 l/min

În Fig.5.20 se prezintă evoluția factorului de calitate pentru FIC calculate pentru semnalele măsurate la debitul de 1,06 l/min. Se observă creșterea semnificativă a valorilor factorului de calitate  $Q$  în urma aplicării procedurii de albire.

### 5.3 Creșterea acurateții de localizare prin prelucrarea semnalelor pe benzi de frecvențe

Studiul acurateții de localizare, precum și a calității cu care funcția de intercorelație este reprezentată, se poate face prin utilizarea funcției de coerență. Datorită faptului că semnalele generate de fisură conțin informații care aparțin altor surse de zgomot (de exemplu joncțiuni, coturi), prelucrarea trebuie făcută în acele domenii de frecvențe unde semnalele sunt foarte "coerente".

Funcția de coerență arată asemănările unui semnal față de un alt semnal în întreaga bandă de frecvențe. Valorile sale sunt incluse în intervalul  $(0 \div 1)$  și arată cât de corelate sunt semnalele pe un domeniu de frecvențe [S13], [S11]. În acest caz, frecvențele care nu prezintă interes vor fi eliminate în mod automat, prin filtrare.

Materialul de fabricație al conductei influențează puternic domeniul de frecvențe al semnalelor achiziționate. Pentru conductele metalice (cupru, oțel), domeniul de frecvențe se întinde până la valori de 5 kHz [L3]. Pentru conductele din materiale plastice (polietilenă), domeniul de frecvențe se întinde până la câteva sute de Hz [H8].

O îmbunătățire importantă a aplicației pentru localizarea fisurilor din conducte ar fi ca în mod automat să se poată determina acele intervale de frecvențe în care prelucrarea semnalelor ar avea o calitate superioară. După determinarea celor mai potrivite intervale pentru analiză, semnalele vor fi filtrate în mod automat, iar apoi se va calcula funcția de intercorelație.

În urma utilizării algoritmului, suntem interesați de valoarea deplasamentului funcției de intercorelație, precum și de calitatea cu care această valoare maximă se evidențiază. Practic, vom introduce o metodă suplimentară pentru prelucrarea semnalelor inițiale. Important este faptul că stabilirea intervalelor de frecvențe în mod automat scutește utilizatorul aplicației de o operație care necesită experiență temeinică în domeniul procesării semnalelor.

Funcția de coerență este definită, pe intervalul de pulsație normată  $\omega$ , astfel [S11]:

$$C_{xy}(\omega) = \frac{|R_{xy}(\omega)|^2}{R_x(\omega) \cdot R_y(\omega)} \quad (5.3)$$

Formula coerenței pentru semnalele  $x$  și  $y$  este exprimată în funcție de densitatea spectrală de putere mutuală  $R_{xy}(\omega)$  și densitățile spectrale de putere  $R_x(\omega)$  și  $R_y(\omega)$ . Calculul funcției de coerență se poate face în mod automat prin rutine implementate în programele dedicate [S11]. În cazul nostru, nu vom utiliza domeniul de frecvențe normate  $\omega$  (măsurat în  $rad/s$ ), reprezentarea fiind făcută pe domeniul de frecvențe lineare  $0 \div F_s/2$  deoarece reprezentarea se face în Hz.

Vom aplica criteriul de selecție automată a intervalelor de filtrare în cazul unor semnale achiziționate la debitul de 0,25 l/min. Debitul ales este redus, semnalele fiind puternic afectate de perturbații. Se încearcă obținerea unor rezultate cât mai bune în condiții defavorabile localizării.

În tabelul 5.9, se prezintă situația pentru calculul funcției de intercorelație pentru semnalele în discuție, singura prelucrare a acestora fiind staționarizarea.

Tabelul 5.9. Parametrii FIC calculate pentru semnale la debitul de 0,25 l/min

Perechea	Segmentul	Valoare Maxim	Deplasament	Calitate
0	Sfertul 1	15,08	18	3,94
	Sfertul 2	16,37	18	3,87
	Sfertul 3	14,69	18	3,91
	Sfertul 4	16,22	18	4,08
	Jumătatea 1	31,92	18	3,90
	Jumătatea 2	31,25	18	4,01
	Lungime Totală	63,49	18	3,97
1	Sfertul 1	16,18	18	3,93
	Sfertul 2	22,02	18	4,22
	Sfertul 3	17,27	18	4,04
	Sfertul 4	16,24	18	4,06
	Jumătatea 1	37,84	18	4,00
	Jumătatea 2	33,56	18	4,04
	Lungime Totală	71,44	18	4,02
2	Sfertul 1	14,30	18	4,08
	Sfertul 2	14,43	18	3,95
	Sfertul 3	14,29	18	4,14
	Sfertul 4	15,31	18	4,07
	Jumătatea 1	29,90	18	4,04
	Jumătatea 2	29,94	18	4,12
	Lungime Totală	60,14	18	4,06

Deplasamentul este unitar, valoarea fiind de 18 eșantioane. Ceea ce deranjează este factorul de calitate al estimărilor.

Dacă facem comparație cu valorile lui Q obținute în cazul semnalelor cu debit la fisură mai mare (tabelele 5.6, 5.7, 5.8) vom vedea că valorile coeficienților de calitate din tabelul următor sunt mai mici.

O dovadă în plus este aspectul funcției de intercorelație calculată pentru *Perechea 2* de semnale (Fig.5.21). Se observă prezența unor vârfuri nedorite în jurul valorii maxime. În continuare, vom urmări strict îmbunătățirea factorului de calitate.

Dacă facem referire la viteza de deplasare a zgomotelor de fisură prin materialul conductei, deplasamentul calculat de 18 eșantioane la dreapta față de origine, acoperă timpul  $t = 66,6\mu s \cdot 18 = 1198\mu s \approx 1,19ms$ . Viteza de deplasare este  $V = d/t \approx 2m / 1,19ms \approx 1680m/s$ .

Valoarea calculată este mai mică decât valoarea vitezei calculate pentru semnalele cu debit mai mare. S-a constatat experimental că semnalele achiziționate pentru debite la fisură mai mari, au viteza de propagare mai mare.

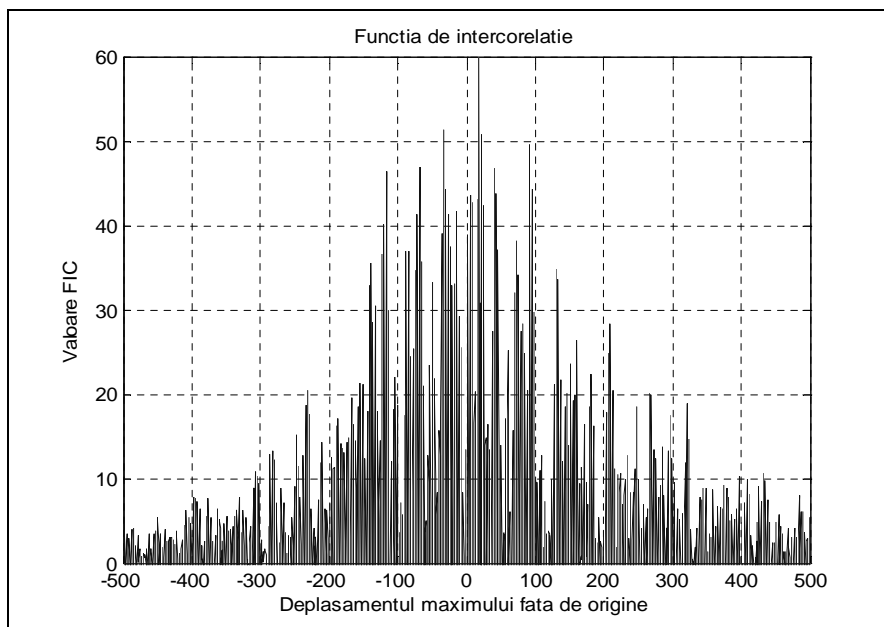


Fig.5.21. FIC calculată pentru semnale achiziționate la debitul de 0,25 l/min

Pentru *Perechea 2* de semnale achiziționate la debitul 0,25 l/min funcția de coerență este prezentată în Fig.5.22.

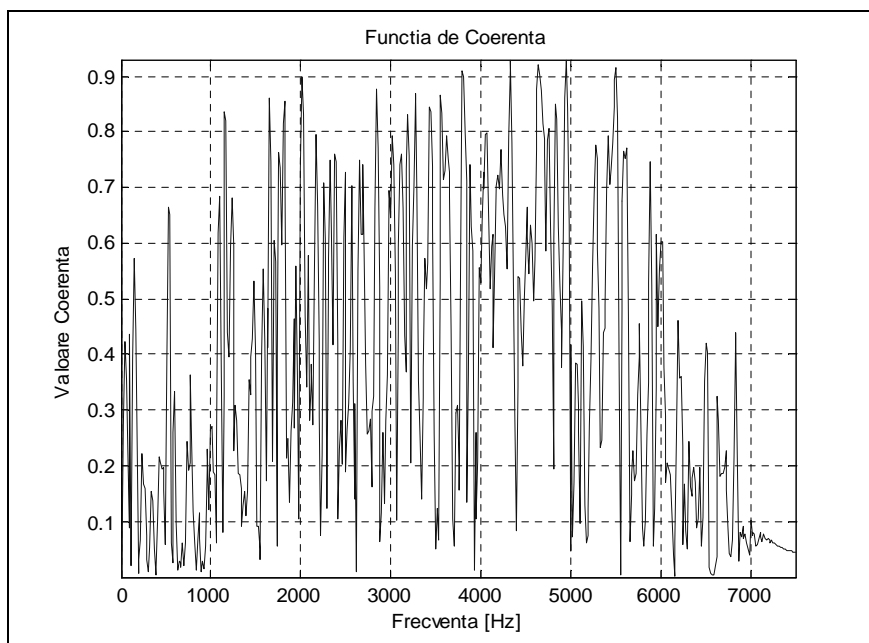


Fig.5.22. Funcția de coerență inițială pentru semnale achiziționate la debitul de 0,25 l/min

După cum se observă, în această formă a funcției de coerență nu putem distinge cu claritate un interval de frecvențe în care să analizăm semnalele. Fluctuațiile funcției ne îngreunează această sarcină.

Reprezentarea funcției se poate ameliora (netezi) prin trecerea acestei funcții prin procesul de filtrare trece-jos [15]. Rezultatul este prezentat în Fig.5.23. Pragul de filtrare este ales astfel încât reprezentarea funcției de coerență să permită distingerea unor zone clare în care putem analiza semnalele

Algoritmul original implementat va alege în mod automat două intervale de frecvențe în care semnalele se pot analiza. Pentru determinarea intervalelor de interes, se folosesc trecerile prin 0 ale derivatei funcției de coerență filtrată, puncte în care funcția de coerență netezită prezintă puncte de extreme.

Aceste puncte reprezintă, în funcție de intervalul de frecvențe, valori minime sau maxime ale funcției de coerență. Intervalele de interes trebuie alese pe baza acestor puncte și algoritmul funcționează pentru funcții de coerență netezite a căror derivată are cel puțin 3 treceri prin 0. Intervalele alese în acest caz sunt prezentate în Fig.5.24.

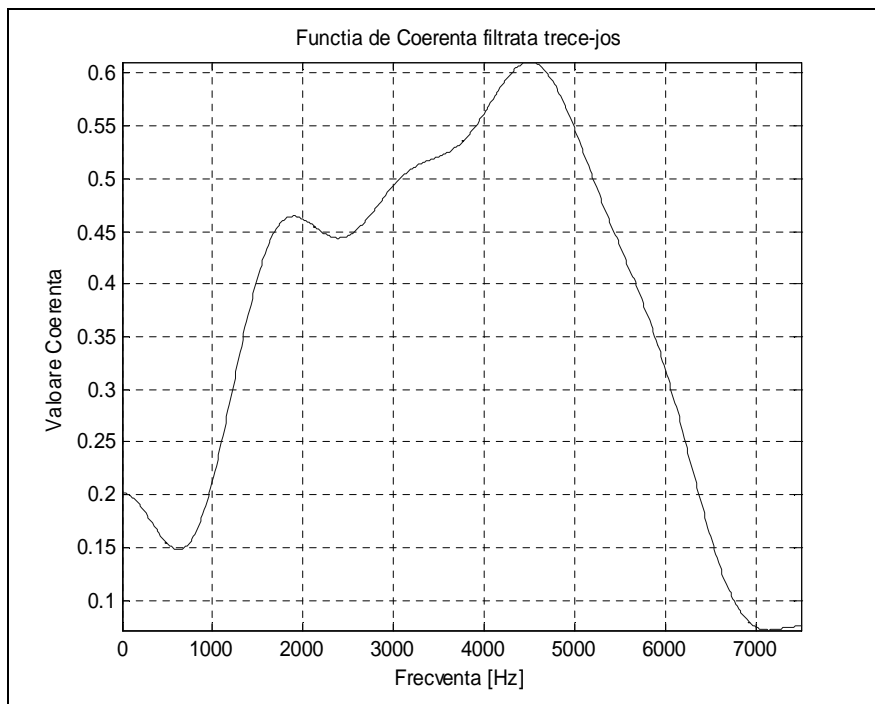


Fig.5.23. Funcția de coerență filtrată pentru semnale achiziționate la debitul de 0,25 l/min

După cum reiese din Fig.5.24, intervalele exprimate în Hz, alese în mod automat pentru filtrarea semnalelor, sunt: cuprins între (2748÷5365) Hz (*Intervalul 1*) și cuprins între (1666÷5467) Hz (*Intervalul 2*).



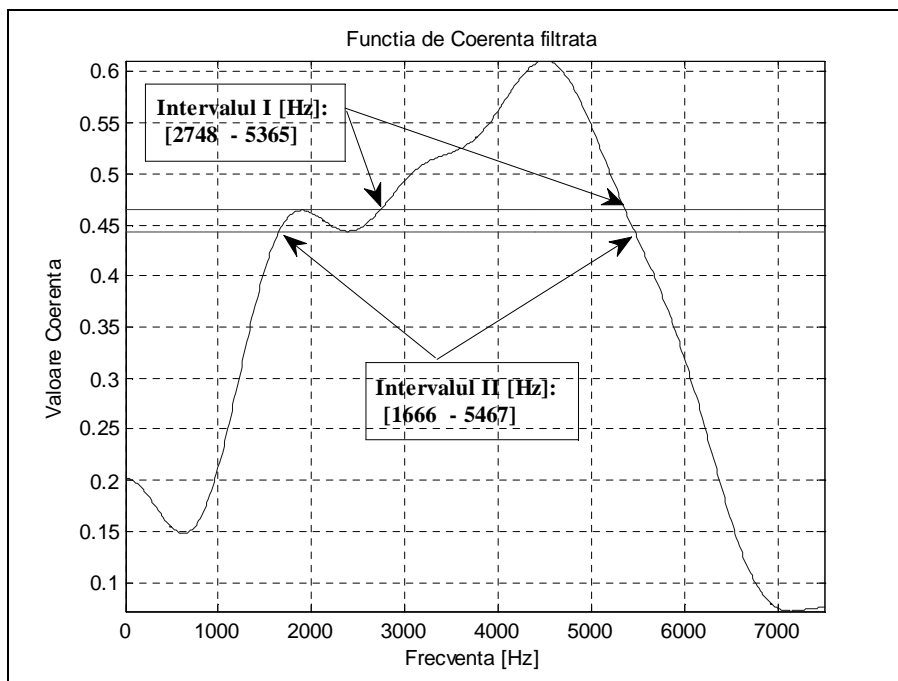


Fig.5.24. Intervaie determinate în mod automat pentru funcția de coerență filtrată

Dacă filtrăm semnalele pe aceste intervale și recalculăm funcția de intercorelație, obținem același deplasament de 18 eșantioane (Fig.5.25).

Factorul de calitate al estimării se îmbunătățește ușor. Acest fapt indică corectitudinea alegerii intervalelor dar și nevoia de prelucrări suplimentare. Valoarea coeficientului de calitate după filtrarea pe Intervalul 1 și recalcularea funcției de intercorelație este 4,08. Creșterea factorului de calitate  $Q$  este minimă. Valoarea coeficientului de calitate după filtrarea pe Intervalul 2 și recalcularea funcției de intercorelație este 4,23. Creșterea factorului de calitate  $Q$  este accentuată. Se constată că filtrarea pe Intervalul 2 este mult mai utilă deoarece intervalul de frecvențe este mai larg.

Dacă pentru aceste semnale aplicăm procedura de albire fără a filtra semnalele pe intervalele determinate, deplasamentul va rămâne la valoarea de 18 eșantioane și factorul de calitate va avea valoarea 4,67. Există posibilitatea de a îmbunătăți estimarea prin combinarea celor două proceduri. Vom aplica pe intervalele de coerență determinate în mod automat procedura de albire prin metoda Burg cu 200 coeficienți.

Pentru filtrarea pe Intervalul 1 obținem un factor de calitate cu valoarea 4,55, iar pentru filtrarea pe Intervalul 2, obținem un factor de calitate cu valoarea 5,53. În acest caz, se remarcă îmbunătățirea considerabilă a calității reprezentării funcției de intercorelație.

O îmbunătățire evidentă se remarcă în cazul semnalelor achiziționate pentru debitul de 4,27 l/min. Fig.5.26 și Fig.5.27 arată această îmbunătățire evidentă oferită de cele două metode (filtrare pe benzi de frecvențe și albirea semnalelor). În

Fig.5.26 se evidențiază un deplasament calculat greșit situat la stânga față de valoarea centrală 0.

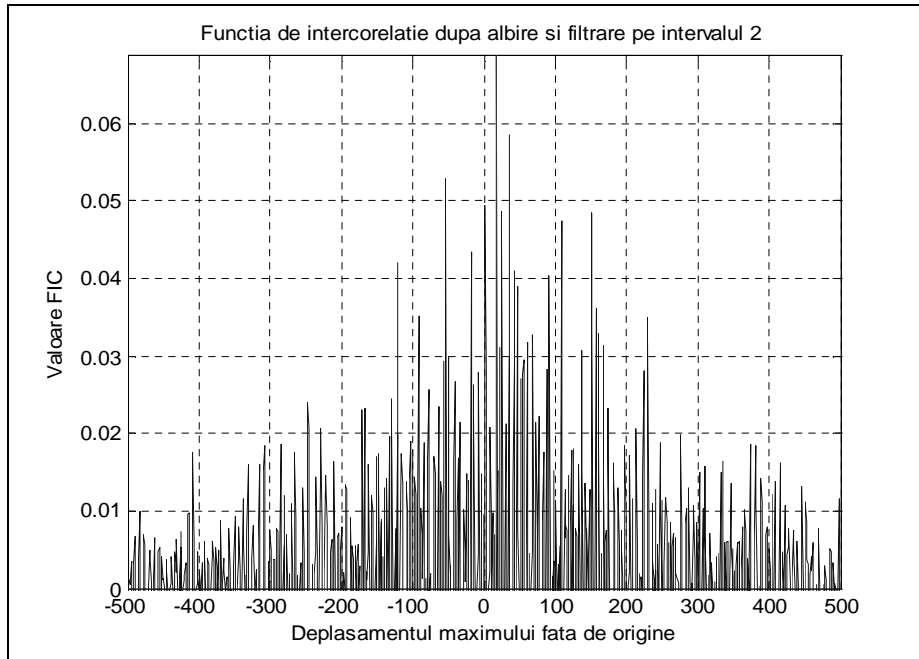


Fig.5.25. FIC îmbunătățită calculată pentru semnale achiziționate la debitul de 0,25 l/min

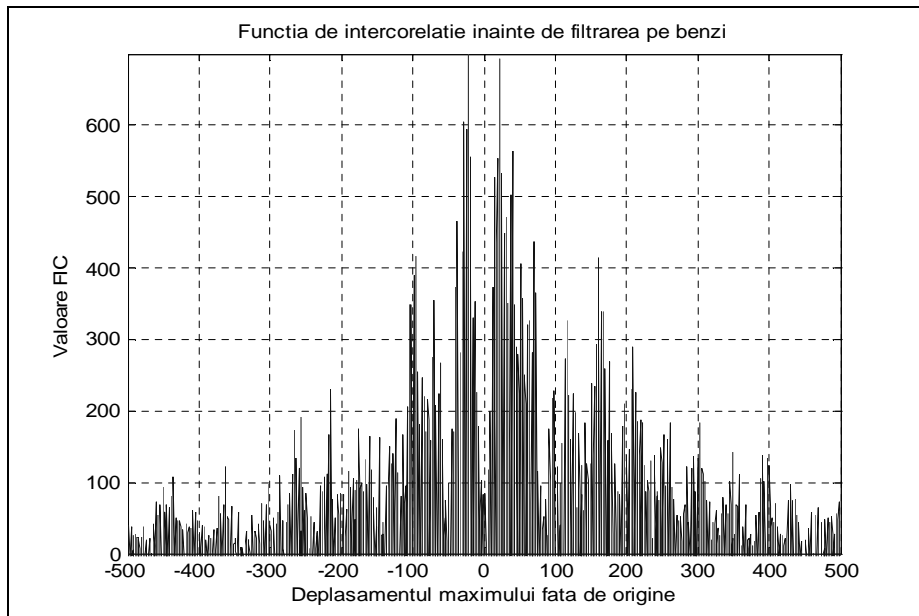


Fig.5.26. FIC calculată pentru semnale achiziționate la debitul de 4,27 l/min

Inițial deplasamentul calculat arată o valoare total greșită (-22 eşantioane). După aplicarea algoritmului de identificare a intervalelor coerenței maxime și apoi a albirii, valoarea calculată este de 18 eşantioane.

Inițial factorul de calitate avea valoarea 4,22. După filtrarea pe Intervalul 2 și albire Burg cu 200 coeficienți obținem un factor de calitate cu valoarea 5,53.

Se observă faptul că filtrarea automată pe intervale de frecvențe asigură obținerea deplasamentului corect. În ceea ce privește factorul de calitate, îmbunătățirea acestuia este mai redusă decât în cazul aplicării exclusive a procedurii de albire.

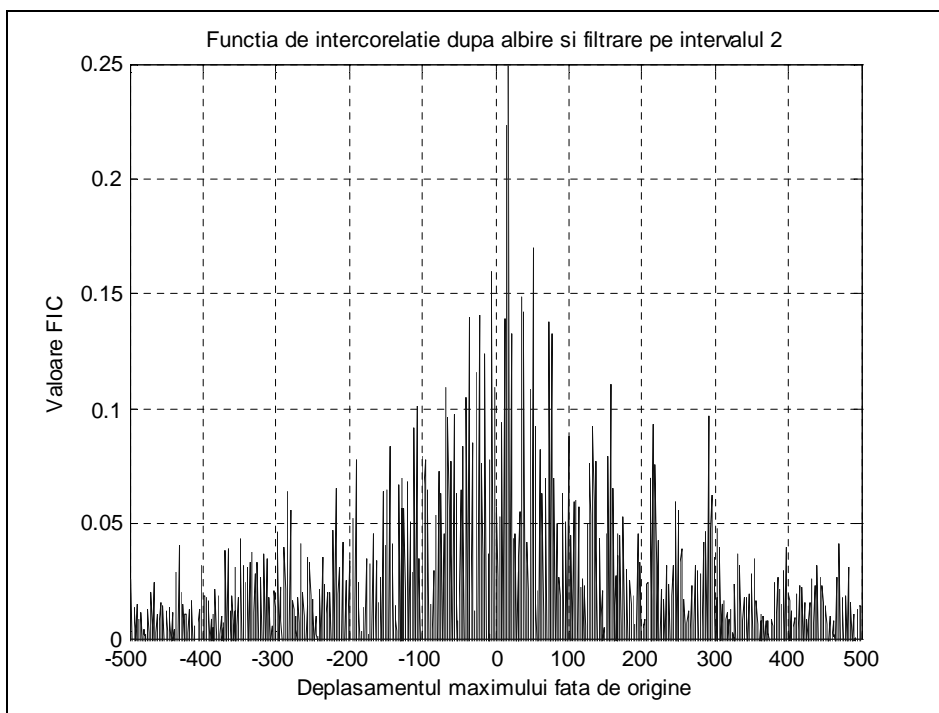


Fig.5.27. FIC îmbunătățită calculată pentru semnale achiziționate la debitul de 4,27 l/min

## 5.4 Principiul majorității deplasamentelor

O modalitate de a determina dacă valoarea unui deplasament este sau nu corectă este aceea de a efectua o serie suficient de mare de măsurări pentru ca apoi, să se calculeze funcțiile de intercorelație aferente. Din totalul deplasamentelor rezultate se va alege ca fiind corectă valoarea care apare predominant.

Pentru exemplificarea utilizării principiului majorității deplasamentelor aducem în discuție tabelul 5.7 care prezintă parametrii FIC calculate pentru semnalele la debitul de 6,09 l/min, după aplicarea procedurii de albire. După cum rezultă din acest tabel, pentru *Perechea 0* și *Perechea 2* valoarea deplasamentului poate fi de 15 sau 17 eşantioane. Prin aplicarea procedurii de albire, iar apoi, a

principiului majorității deplasamentelor, vom determina care este deplasamentul potrivit pentru fiecare pereche.

Vom alege pentru fiecare pereche de semnale o porțiune care prezintă cât mai puține artefacte. De asemenea, se vor evita zonele din semnale unde apar creșteri sau căderi de presiune.

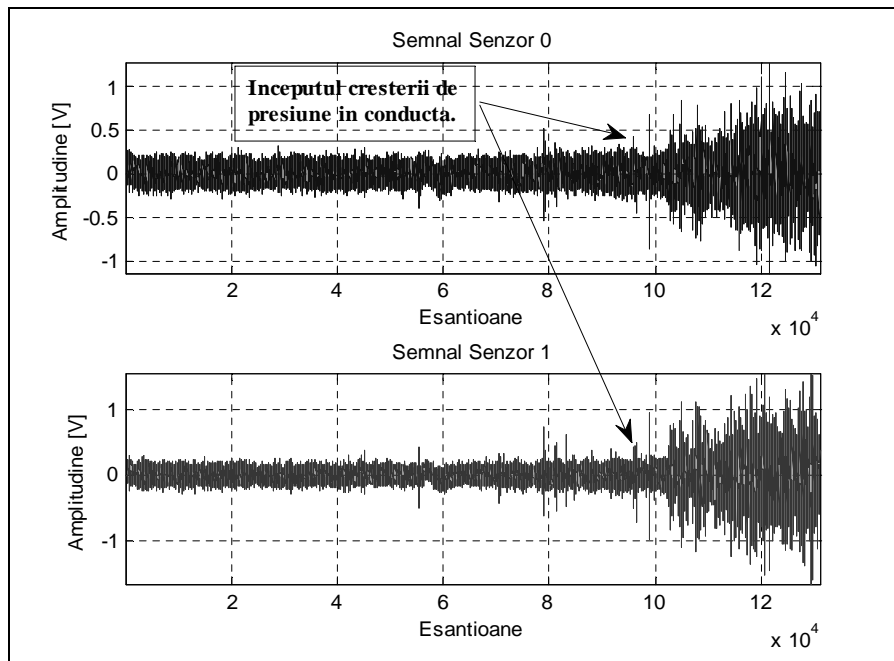


Fig.5.28. Perechea 0 de semnale reale, debitul 6,09 l/min

*Perechea 0*, achiziționată la debitul de 6,09 l/min, este prezentată în Fig.5.28. Se observă creșterea presiunii din conductă în ultima parte a semnalelor. Dat fiind faptul că semnalele achiziționate conțin un număr mare de eşantioane și că deplasamentele de interes se găsesc sub valoarea de 20 de eşantioane, putem considera următorul scenariu: vom împărți semnalele prezentate în perechi de segmente de câte 512 eşantioane, fiecare pereche fiind considerată un vector de măsurare. Rezultă că am efectuat 100 de măsurări. Prin aceste măsurări acoperim un număr de 51200 eşantioane din fișierele achiziționate și pentru aceste măsurări vom aplica principiul majorității deplasamentelor împreună cu procedura de albire. Aplicarea procedurii de albire este necesară pentru îmbunătățirea factorului de calitate al determinărilor.

În Fig.5.29 se pot observa valorile deplasamentelor și ale factorilor de calitate pentru cele 100 de măsurări efectuate. În general, calitatea determinărilor este bună, dar se observă fluctuații în valorile deplasamentelor calculate. Din cele 100 de măsurări, în 82 de cazuri valoarea calculată pentru deplasament este 17. Practic, cu o acuratețe de 82%, putem spune că pentru aceste semnale, valoarea de 17 eşantioane este cea corectă pentru deplasament. Dacă am realiza același calcul fără a aplica procedura de albire, rezultatul ar arăta că în numai 29% dintre aceste măsurări, valoarea de 17 eşantioane a fost determinată ca fiind cea corectă.

Revenind la acuratețea cu valoarea de 82%, prin implementarea principiului majorității deplasamentelor ne propunem îmbunătățirea factorului de calitate al determinării deplasamentului corect.

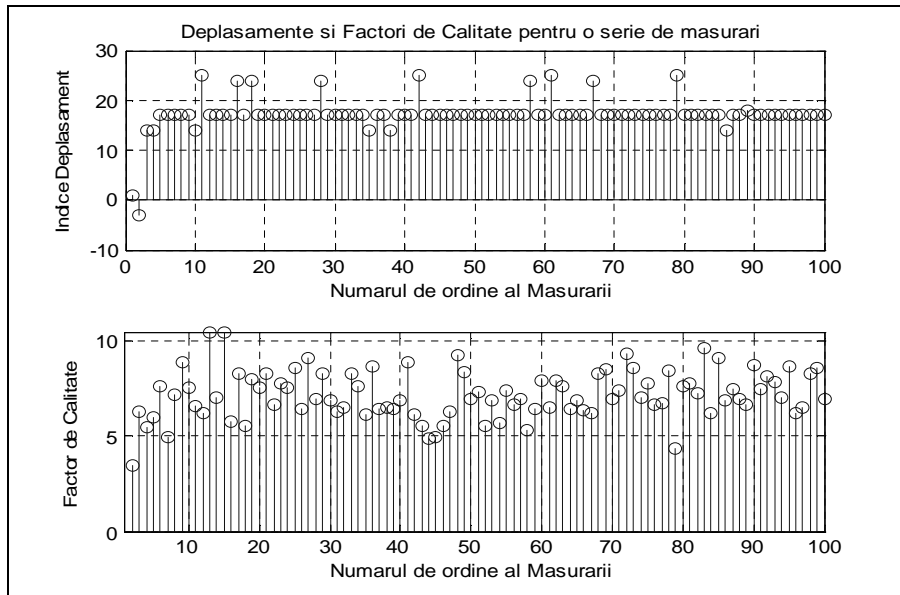


Fig.5.29. Deplasamente și factori de calitate pentru 100 de măsurări, debitul 6,09 l/min

Fig.5.30 arată histogramele pentru deplasamentele și factorii de calitate reprezentați în Fig.5.29.

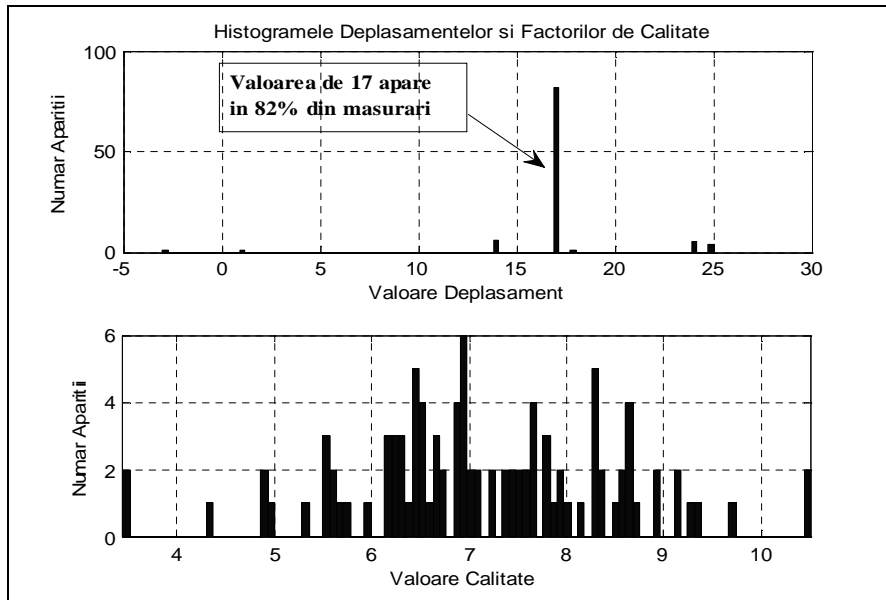


Fig.5.30. Histograme pentru 100 de măsurări, debitul 6,09 l/min

Pentru îmbunătățirea calității determinării deplasamentului, vom utiliza o fereastră pe care o baleem de la stânga la dreapta pe șirul celor 100 de deplasamente obținute. Lățimea ferestrei va fi de 3 valori consecutive ale vectorului deplasamentelor. Considerăm că dacă cel puțin 2 dintre aceste valori sunt egale cu 17 (deplasamentul care este preponderent), atunci toate valorile din fereastră trebuie să devină egale cu 17. Dacă avem numai o singură valoare din fereastră egală cu 17, atunci toate valorile devin egale cu media lor.

Acest mod de calcul al bazat pe principiului majorității deplasamentelor consideră că dacă cel puțin 2 din 3 valori din interiorul ferestrei care balează vectorul deplasamentelor sunt egale, atunci toate valorile din fereastră devin egale.

Dacă aplicăm acest tip de calcul celor 100 de deplasamente obținute, în 93,87% din cazuri vom obține deplasamentul de 17 eşantioane. Datorită lățimii de 3 valori a ferestrei aplicate, numărul de măsurări scade la 98. Ultimele 2 deplasamente nu mai pot alcătui o fereastră și astfel sunt lăsate deoparte. Fig.5.31 arată rezultatul aplicării principiului 2 din 3.

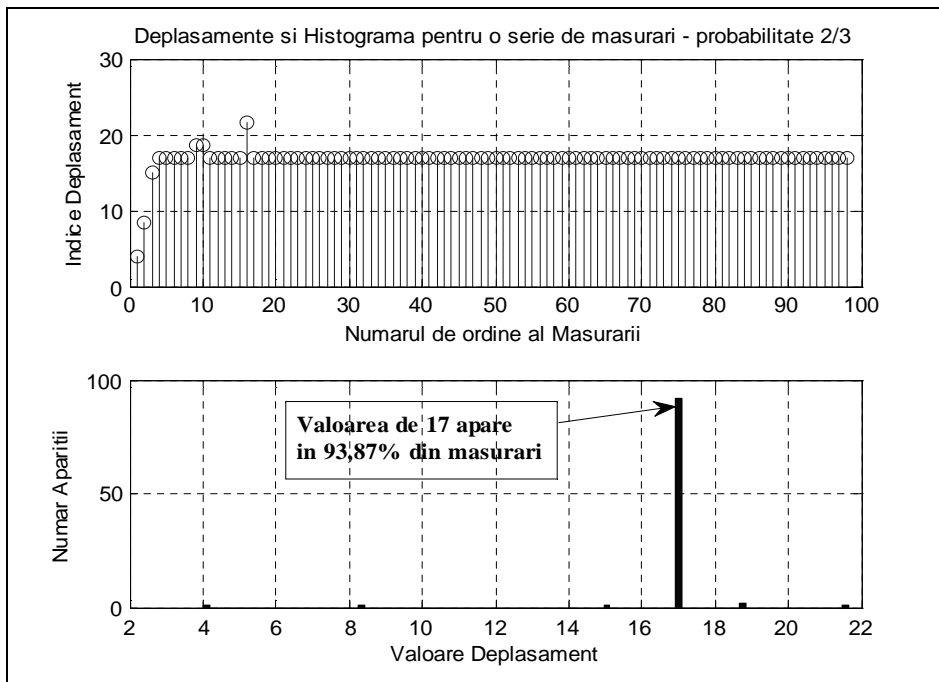


Fig.5.31. Rezultatele aplicării principiului 2 din 3

Putem extinde precizia determinării deplasamentului corect dacă mărim dimensiunea ferestrei la 5 valori. Dacă cel puțin 3 din 5 valori ale ferestrei sunt egale, atunci toate valorile din fereastră devin egale. Deși numărul măsurărilor scade la 96 (ultimele 4 valori nu pot alcătui o fereastră completă), acuratețea cu care valoarea de 17 este considerată ca fiind cea corectă crește la 97,91% (Fig.5.32).

Pentru o fereastră de lungime 7, dacă cel puțin 4 dintre cele 7 valori ale ferestrei sunt egale, atunci toate valorile din fereastră devin egale.

Probabilitatea de apariție a valorii 17 este de 98,93% (Fig.5.33). În acest caz, numărul măsurărilor este de 94, întrucât ultimele 6 valori din cele 100 nu pot forma o fereastră completă. Valoarea de 17 este aleasă ca fiind cea corectă.

În cazul *Perechii 2*, achiziționată la debitul de 6,09 l/min prin aplicarea principiului majorității deplasamentelor și a procedurii de albire, cu o acuratețe de 94,68% s-a determinat că 17 este valoarea corectă a deplasamentului.

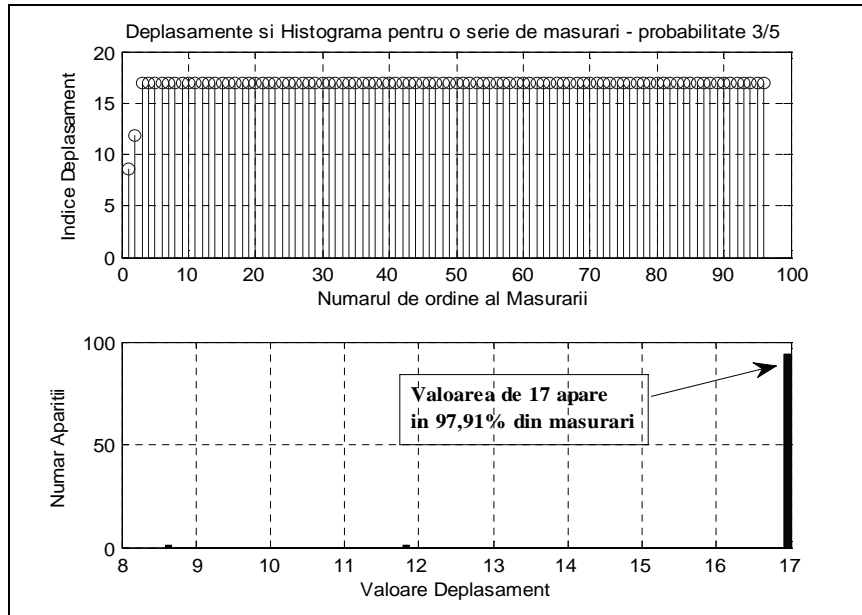


Fig.5.32. Rezultatele aplicării principiului 3 din 5

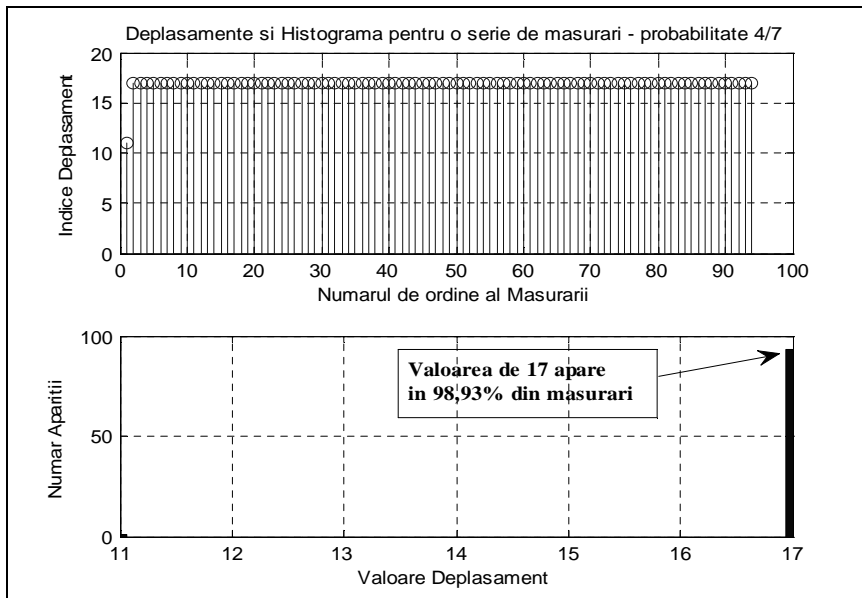


Fig.5.33. Rezultatele aplicării principiului 4 din 7

## 5.5 Concluzii

Prin procedura de staționizare a semnalelor achiziționate de la instalație și apoi, prin calcularea în mod direct, fără îmbunătățiri suplimentare, a funcției de intercorelație, s-au obținut rezultate care indică faptul că fisura este plasată mai aproape de senzorul 1.

Ideea care a fost urmărită se bazează pe necesitatea îmbunătățirii acurateții de localizare a fisurilor, atât din punct de vedere al poziției acestuia între cei doi senzori (poziția maximului FIC față de punctul central), cât și din punctul de vedere al factorului de calitate prin care se reprezintă FIC. Maximul FIC trebuie să fie foarte proeminent în comparație cu restul punctelor și poziția sa trebuie să fie cea corectă. Calculele și factorul de calitate ( $Q$ ) în localizare prezentate la începutul acestui capitol, arată nevoia evidentă de prelucrări suplimentare ale semnalelor.

În unele cazuri, punctele de maxim ale FIC se evidențiază în mod neclar. Apar, în zona maximului FIC, alte vârfuri care pot influența procesul de detecție (vezi Fig.5.7). Mai mult, uneori vârfurile care nu reprezintă punctul corect de detecție, depășesc ca valoare punctul care ar trebui să fie maximul FIC (vezi Fig.5.26). De asemenea, plasamentul punctului care trebuie să indice poziția fisurii este în multe cazuri eronat. Acest fapt nu este permis deoarece dorim o localizare cât mai exactă a fisurii.

Pornind de la tabelele inițiale (tabelele 5.1, 5.2, 5.3), am urmărit prelucrarea semnalelor experimentale astfel încât să se obțină rezultate mult mai exacte pentru procesul de localizare a fisurilor în conducte. Dacă inițial se puteau remarca valori diferite pentru deplasamente și factori de calitate mai scăzuți, prin prelucrări precum: albirea semnalelor, analiza automată pe benzi de frecvențe sau aplicarea principiului majorității, s-au obținut deplasamente unitare și factori de calitate mult îmbunătățiți.

Testarea calității funcțiilor de intercorelație calculate s-a făcut pe baza implementării unui program care arată cât de bine se evidențiază maximul de interes comparativ cu restul valorilor FIC.

Procedura de albire a semnalelor (filtrare inversă), este o metodă de îmbunătățire a acurateții de localizare. Prin utilizarea coeficienților autoregresivi (AR) care modelează semnalul de intrare, se poate realiza o filtrare inversă a acestuia și caracteristicile sale vor deveni apropiate cu cele ale unui zgomot alb. Spectrele și FIC ale semnalelor după procesul de albire, denotă o evidentă îmbunătățire atât sub aspectul evidențierii maximului intercorelației față de restul vârfurilor (indicator al poziției fisurii), cât și sub aspectul exactității cu care acest maxim indică locul fisurii.

În procedeul de albire, metoda de estimare spectrală utilizată este metoda Burg. Pe baza literaturii de specialitate dar și pe baza studiilor efectuate în referatele aferente programului de doctorat, se apreciază că metodele parametrice sunt adecvate pentru implementare în formă automată. Dintre metodele parametrice, algoritmul Burg conduce, în toate cazurile, la modele stabile ale procesului generator. Numărul de coeficienți (ordinul modelului), reprezintă o alegere importantă. Necesitatea unei corelații între lungimea secvențelor analizate și ordinul modelului utilizat este evidentă. Un număr mare de coeficienți și o lungime extinsă a secvențelor analizate înseamnă timp de execuție ridicat. Numărul ridicat de coeficienți nu înseamnă o calitate îmbunătățită a estimărilor. Există o valoare maximă a coeficientului de calitate care poate fi atinsă.



În urma aplicării procedurii de albire, se remarcă o îmbunătățire atât a calității funcțiilor calculate, cât și o exactitate (acuratețe) de localizare mai ridicată în cazurile unde se impune această îmbunătățire.

Prelucrarea automată pe benzi de frecvențe implică analiza semnalelor în domeniul frecvențelor. O idee de actualitate subliniază importanța implementării, pe cât este posibil, în mod automat, a diferiților algoritmi de prelucrare a semnalelor. Acest lucru este impus de necesitatea ca aparatura de localizare a surselor de zgomot (fisuri în conducte, rezervoare de combustibili, procese în curs de degradare), să poată fi utilizată și de personal cu pregătire inferioară. Ideea de prelucrare automată este implementată prin prelucrarea pe benzi de frecvențe.

În acest scop, se utilizează funcția de coerență în formă netezită (filtrată). În mod automat, se identifică două intervale de analiză a semnalelor. Utilizarea în tandem a procedurii de albire și a prelucrării automate pe benzi de frecvențe, ajută la procesul de localizare în special, în cazul semnalelor achiziționate pentru debite reduse.

Aplicarea principiului majorității deplasamentelor are ca scop determinarea unui deplasament care apare cu precădere în cazul în care acesta nu a fost obținut prin metodele anterioare. Dacă presupunem că avem un număr suficient de mare de măsurări, putem considera ca fiind corectă acea valoare a deplasamentului care apare cu precădere. Prin utilizarea unor ferestre de dimensiune fixă (formată din 3,5 sau 7 valori), se analizează pe segmente reduse ca lungime (de 512 eșantioane), acele porțiuni din semnale care nu prezintă artefacte sau modificări bruște de amplitudine. Această analiză, pe segmente reduse, arată în mod statistic valorile deplasamentelor care se repetă și îmbunătățește gradul de probabilitate cu care aceste valori apar.

## **6. INSTRUMENTAȚIA VIRTUALĂ. APLICAȚIE**

### **6.1 Aplicația pentru localizarea surselor de zgomot – aspecte generale**

Aplicația pentru localizarea sursei de zgomot (fisura din conductă) include atât o parte hardware cât și o parte software. Partea de hardware este compusă din doi senzori piezo-electrici, două amplificatoare, un filtru, o placă de achiziție de date și un calculator portabil (laptop). Partea de software include o serie de programe dezvoltate în mediul de programare grafică LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), versiunea 8.5. Toate rezultatele obținute prin intermediul analizei efectuate asupra semnalelor achiziționate au fost verificate suplimentar prin intermediul programului Matlab, versiunea 7.5.

Mediul de programare grafică LabVIEW a fost utilizat datorită ușurinței cu care pot fi implementate programele. Un alt motiv pentru alegerea acestui mediu de programare, a fost utilizarea la nivel de hardware a plăcii de achiziție de date, model NI USB 9215A [N2]. Aceasta are marele avantaj de a putea achiziționa date simultan. Achiziția simultană a datelor se poate face pe toate cele 4 canale (cu limitări asupra ratei de eșantionare și a numărului de eșantioane), însă pentru această aplicație au fost utilizate 2 canale.

Pentru aplicația propusă, aceste programe dezvoltate în LabVIEW, sunt o colecție de instrumente virtuale, marea lor majoritate fiind create pentru a îndeplini cerințele de analiză ale instrumentației. Algoritmii utilizați în cadrul acestei lucrări (de exemplu, albirea semnalelor sau filtrarea automată pe benzi de frecvență), au fost implementați pe baza utilizării mediului de programare grafic. Peste 80 de instrumente virtuale (programe cu extensia \*.vi) au fost construite pentru a testa și perfecționa aplicația propusă. Peste 25 sunt sub-instrumente virtuale au fost construite strict pentru îndeplinirea unor cerințe specifice aplicației (de exemplu, albirea semnalelor). Alături de aceste sub-instrumente, programele conțin o multitudine de instrumente virtuale existente implicit în LabVIEW.

Verificarea corectitudinii rezultatelor obținute prin intermediul instrumentelor virtuale construite în mediul de programare LabVIEW, a fost realizată prin utilizarea programării în Matlab. Peste 350 de programe și funcții au fost scrise pe parcursul studiului doctoral. La acestea se adaugă implementarea a 10 modele Simulink. La nivel de programe, s-a încercat optimizarea funcțiilor astfel încât, dimensiunea codului și timpul de execuție să fie cât mai avantajoase. S-a avut în vedere funcționarea automată a algoritmilor implementați astfel încât intervenția din partea utilizatorului să fie minimă.

### **6.2 Instalarea aplicației pentru localizarea surselor de zgomot**

Funcționare aplicației pentru localizarea surselor de zgomot din sistemele de conducte se face cu ajutorul unui pachet de programe de tip driver. Datorită acestor programe driver, calculatorul gazdă nu trebuie să aibă instalate alte programe

produse de National Instruments (LabVIEW, NIDAQ). Pașii necesari instalării acestor programe driver sunt bine cunoscuți, ei fiind întâlniți la instalarea oricărei aplicații software. Pachetul de instalare al driverelor include toate componentele necesare pentru funcționarea aplicației și a fost dezvoltat în scopul de a putea fi distribuit

După instalarea completă a programelor de tip driver, placa de achiziție NI USB 9215A poate fi conectată la portul USB al PC-ului gazdă. În colțul monitorului din partea dreapta – jos, se va observa indicarea identificării plăcii de achiziție conectată la calculatorul gazdă (Fig.6.1).



Fig.6.1. Identificarea conexiunii cu placa de achiziție

Pe Desktop vom observa icoana (Fig.6.2) pentru pachetul *Measurement and Automation Explorer* (Fig.6.3), care este un mediu grafic de configurare al instrumentelor cu care lucrăm. El se va instala împreună cu restul programelor driver necesare și îl vom utiliza pentru a modifica numele plăcii de achiziție utilizată.

După ce am accesat (prin intermediul icoanei din Fig.6.2), panoul de lucru pentru *Measurement and Automation Explorer* (Fig.6.3), vom expanda meniurile *Devices and Interfaces* → *NI-DAQmx Devices* și vom identifica prezența plăcii de achiziție NI USB 9215A. Efectuăm click-dreapta cu mouse-ul și din meniul de opțiuni al plăcii de achiziție alegem *Rename*. Vom înlocui denumirea existentă cu denumirea *Placa\_Achiziție*. Schimbarea acestei denumiri este necesară deoarece partea de analiză (software) identifică sub acest nume placa de achiziție conectată la portul USB



Fig.6.2. Icoana programului Measurement and Automation Explorer

În acest moment, instalare programelor driver este completă. Rularea aplicației pentru localizarea surselor de zgomot poate fi făcută prin intermediul executabilului *Detectie.exe* din directorul *Detectie*. Pentru utilizarea aplicației la viteză optimă, se recomandă copierea directorului *Detectie* pe harddisk-ul calculatorului gazdă înainte de rularea executabilului.

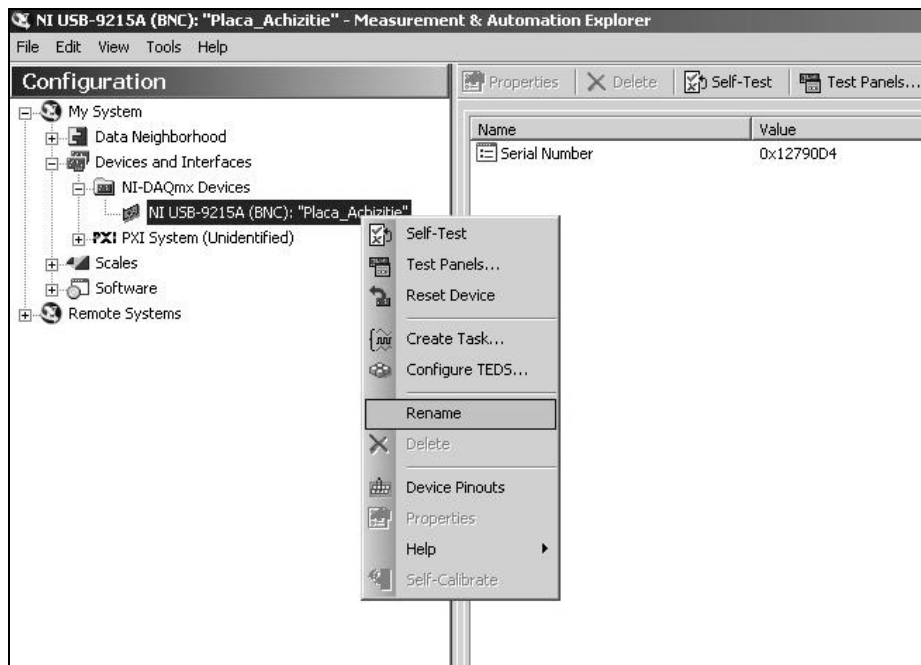


Fig.6.3. Panoul de lucru al programului Measurement and Automation Explorer

### 6.3 Achiziția semnalelor provenite de la sursa de zgomot

Semnalele provenite de la sursa de zgomot sunt transmise aplicației software prin intermediul plăcii cu achiziție simultană NI USB 9215A. După cum reiese din denumirea acestei plăci, interfața de comunicare între ea și calculatorul portabil pe care rulează aplicația este cea USB (Universal Serial Bus). Din punct de vedere software, există două componente care asigură funcționarea instrumentației virtuale:

1. Colecția de programe de tip driver *NI DAQ MX*, asigură posibilitatea configurării funcționării plăcii de achiziție utilizate. Un mod grafic de a seta parametrii de funcționare ai plăcii NI USB 9215A este prin intermediul instrumentului *DAQ Assistant*. În Fig.6.4 se arată setările importante făcute pentru implementarea instrumentației.

Achiziția semnalelor se face în mod simultan, pe cele două canale, cu o limitare de tensiune impusă de caracteristicile NI USB 9215A. Limitarea semnalelor datorită amplificării este semnalizată prin intermediul unor led-uri. În cazul în care semnalele sunt limitate, trebuie micșorată valoarea amplificării acestora. Numărul de eșantioane necesar unei prelucrări este de 16384. Fixarea frecvenței de eșantionare cu care funcționează aplicația rămâne în sarcina utilizatorului. Valorile sale pot fi: 12 kHz, 13 kHz, 14 kHz, 15 kHz și pot fi setate în funcție de viteza de execuție a aplicației pe calculatorul gazdă. Se va alege rata de eșantionare care oferă o viteză de execuție ridicată. Aceste valori sunt suficient de mari pentru a cuprinde banda de frecvențe specifică semnalelor generate de fisuri și deci, pentru a respecta cerințele

teoremei eșantionării. În mod automat, semnalele vor fi filtrate pentru evitarea aliasing-ului.

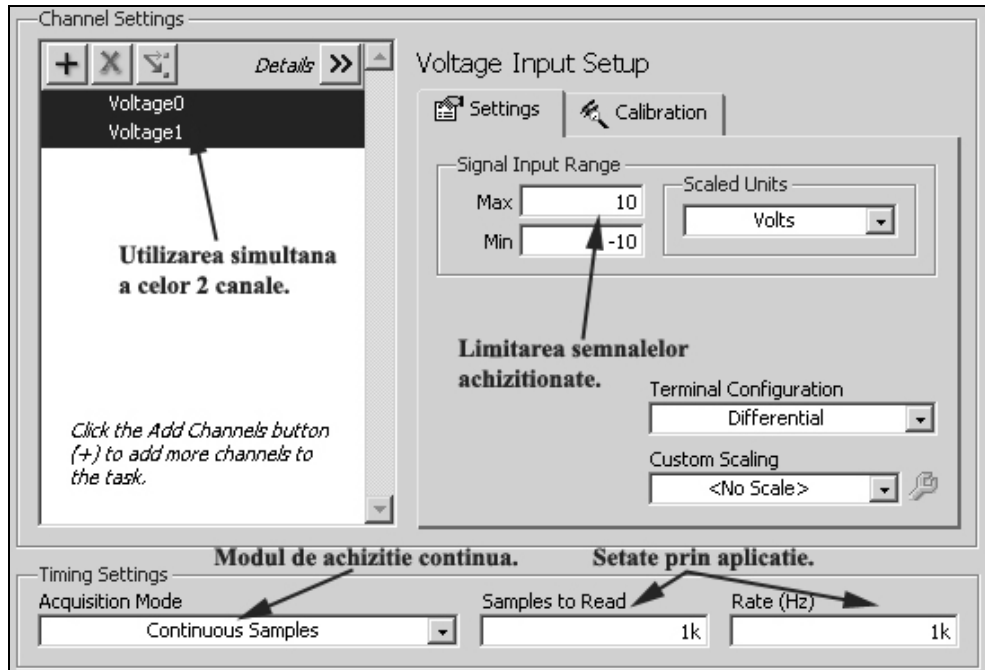


Fig.6.4. Parametrii de funcționare ai plăcii configurați prin DAQ Assistant

Lipsa de comunicare între placa de achiziție și aplicația pentru localizare este semnalată pe panoul programului utilizat prin mesaj de eroare. Fig.6.5 prezintă situația în care conexiunea prin interfața USB este întreruptă datorită conectării incorecte a plăcii.

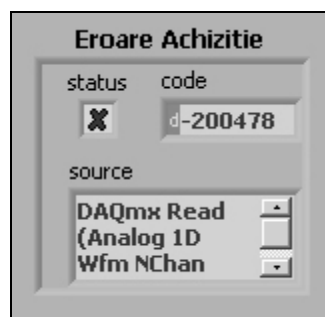


Fig.6.5. Semnalarea erorii de conexiune între placa de achiziție și aplicație

Trebuie făcută distincția între localizarea sursei de zgomot pe baza semnalelor salvate în fișiere de măsurări (measurement files) și utilizarea instrumentației fără salvarea fișierelor.

2. A doua componentă software care asigură funcționalitatea aplicației este reprezentată de colecția de programe implementate în LabVIEW. Aceste programe sunt dedicate analizei semnalelor provenite de la sursa de zgomot. Localizarea surselor de zgomot se poate face cu succes prin intermediul unor instrumente virtuale deja existente, dar și cu ajutorul implementării unor noi proceduri dedicate (incluse în sub-instrumente virtuale LabVIEW).

Fig.6.6 prezintă un exemplu de sub-instrument creat pentru a testa caracterul staționar al semnalelor. Acest sub-instrument virtual apelează la rândul său alte sub-instrumente virtuale. Testarea staționarității semnalelor reprezintă o condiție pentru funcționarea corectă a aplicației. Datorită faptului că modul de funcționare al algoritmului este automat, complexitatea implementării acestuia necesită utilizarea succesivă a mai multor sub-instrumente virtuale. Exemple de utilizare a sub-instrumentelor virtuale, în cadrul unui program LabVIEW sunt prezentate în Anexa 1.

Prin utilizarea unui sub-instrument virtual se asigură filtrarea suplimentară a semnalelor achiziționate. Deși ele trec printr-un filtru hardware care oprește frecvențele mai mari de 6 kHz, s-a asigurat o filtrare și prin software-ul instrumentației. În Fig.6.7 se arată o parte din diagrama bloc a aplicației. Prin săgeți sunt indicate o serie de sub-instrumente virtuale implementate. Ele au fost implementate în același mod ca și instrumentul prezentat în Fig.6.6. Blocurile indicate prin săgeți sunt utilizate exclusiv pentru această aplicație și reprezintă o contribuție a prezentei lucrări. Blocurile indicate reprezintă programe care implementează algoritmi necesari în prelucrarea semnalelor măsurate. Aceste rutine (sub-instrumentele virtuale) nu pot fi găsite în mod implicit în librăria de funcții LabVIEW.

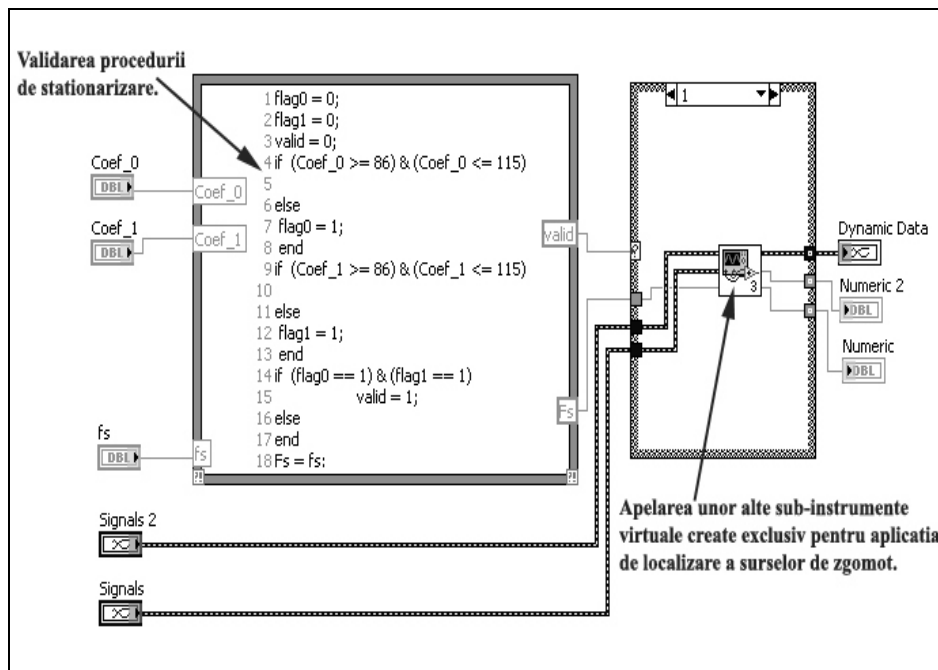


Fig.6.6. Implementarea procedurii de staționizare prin sub-instrumente virtuale

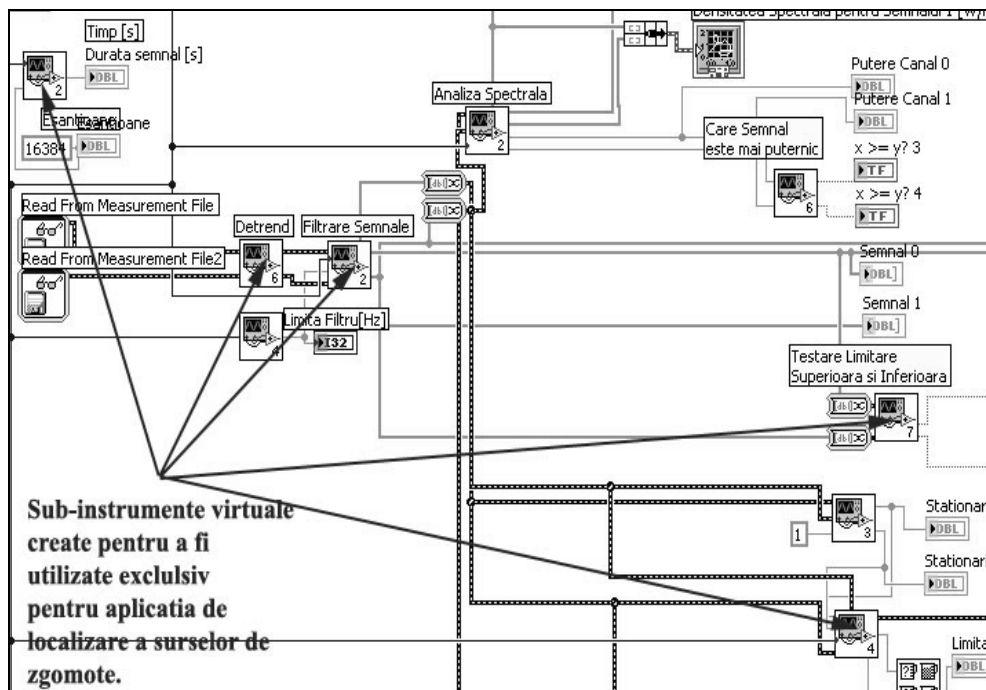


Fig.6.7. Sub-instrumente virtuale utilizate în program

## 6.4 Analiza extinsă a semnalelor provenite de la sursa de zgomot

Pentru lucrarea prezentă, s-a utilizat modul de lucru bazat pe fișierele cu date măsurate și s-a lucrat în două etape. Prima etapă e fost aceea de achiziționare a semnalelor în funcție de diferitele debite din fisură.

Fișierele au fost salvate pe parcursul a mai multor zile de experimente și includ date pentru debite diferite de curgere prin fisură, pentru diferite frecvențe de eșantionare sau pentru funcționarea conductei fără fisură. S-a încercat acoperirea unui număr cât mai mare de situații de funcționare (utilizare) a aplicației pentru localizare. În etapa a doua, datele din fișierele achiziționate au fost analizate prin intermediul unui pachet de programe care sunt incluse în aplicație.

Avantajul acestui mod de lucru este acela de a permite analiza unui număr mai mare de eșantioane. Prin analiza unui număr mai mare de eșantioane se studiază comportamentul semnalelor pe o perioadă mai lungă de timp. Pentru a asigura un timp de execuție redus, numărul de eșantioane care se utilizează este de 16384. Acest număr este suficient pentru a obține rezultatele dorite.

După încărcarea celor 16384 de eșantioane din semnalele achiziționate, după un timp de aproximativ 60 secunde, avem prezentate rezultatele complete ale analizei acestor semnale. Trebuie făcută precizarea că fișierele salvate în timpul experimentelor cuprind câte 131072 eșantioane. Acestea nu sunt utilizate în aplicație pe întreaga lor lungime. Numărul mare de eșantioane a fost utilizat pentru partea de cercetare și dezvoltare a algoritmilor. Pentru rularea aplicației nu este

avantajos să lucrăm cu un număr mare de eșantioane datorită creșterii inutile a timpului de execuție. Este indicat însă, să utilizăm un număr de eșantioane suficient de mare pentru a putea trage concluziile necesare și corecte.

Instrumentația poate fi utilizată și fără salvarea semnalelor achiziționate. Acestea sunt achiziționate, staționarizate (prin eliminarea componentelor modale) și corelate, fără alte prelucrări suplimentare. Acest mod de utilizare implică mai puține prelucrări datorită necesității obținerii unui rezultat imediat (utilizare on-site). Deplasamentul obținut prin calculul FIC împreună cu valoarea vitezei de propagare a semnalelor în țeavă (poate fi preluată din literatură) ajută la determinarea poziționării sursei de zgomot între cei doi senzori.

În continuare, se va prezenta funcționalitatea programelor care analizează semnalele achiziționate și salvate în fișierele de măsurare. Aceste prelucrări includ toți algoritmi dezvoltați în teză.

Pornirea acestui set de programe se face prin selectarea fișierelor pe care utilizatorul dorește să le analizeze. Aceste fișiere sunt selectate și încărcate în mod automat din directorul în care au fost salvate. Directorul de lucru se numește *Fișiere* și el este automat creat pe partiția C a harddisk-ului în momentul în care utilizăm programul de achiziționare a semnalelor (*Detectie.exe*). În mod automat, la fiecare achiziție, se va crea un fișier text cu setările utilizate pentru achiziționarea semnalelor. Valoarea frecvenței de eșantionare salvată în fișierul text va fi utilizată în analiza semnalelor achiziționate. Tot ceea ce trebuie să facă utilizatorul este să selecteze semnalele pe care dorește să le analizeze. Aplicația va lucra în mod automat.

Fig.6.8 reprezintă partea de start a procesului de analiză. Ea poate fi accesată prin butonul *Analiză Extinsă*, de pe panoul frontal pornit prin *Detectie.exe*.

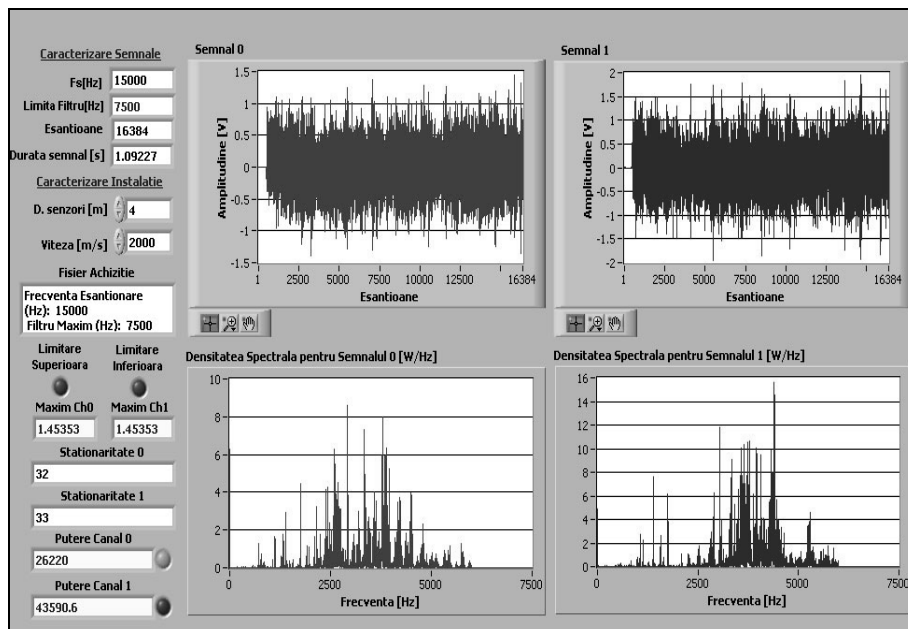


Fig.6.8. Vizualizarea semnalelor și distribuția spectrală (Analiză Extinsă)



La încărcarea fișierelor în aplicație, în mod automat se vor încărca setările achiziției scrise anterior în fișierul text. Utilizatorul poate verifica dacă semnalele salvate sunt limitate sau dacă sunt staționare. De asemenea, puterea totală maximă a celor două semnale, este comparată și afișată. Se va indica în mod vizual care este semnalul cu o putere mai mare, fapt care trebuie luat în considerare pentru a stabili care senzor este mai apropiat de fisură.

Utilizatorul are nevoie să introducă distanța între cei doi senzori (distanță cunoscută după plasarea senzorilor pe conductă) și a vitezei de propagare a zgomotului în material (Fig.6.8 și Fig.6.9). Distanța maximă între senzori poate fi de 100 m. Pentru stabilirea vitezei de propagare în materialul conductelor, sunt necesare studii suplimentare efectuate pe conducte. În cazul acestei instalații (material metalic), viteza de propagare a zgomotului de fisură în materialul conductei se încadrează orientativ în intervalul (500÷2500) m/s.

Semnalele achiziționate pentru debite din fisură mai mari, viteza de propagare este mai mare (fapt constatat experimental). Controlul de introducere al vitezei de propagare este limitat la 3000 m/s, valoare suficient de mare pentru a asigura utilizarea aplicației pentru alte instalații.

Utilizatorul poate vizualiza semnalele achiziționate și repartizarea frecvențelor pe întreaga bandă de frecvențe. După cum se remarcă în Fig.6.8 frecvențele mai mari de 6 kHz au fost eliminate. Se observă repartizarea (cu precădere) frecvențelor în domeniul de peste 2,5 kHz, fapt care este specific conductelor metalice.

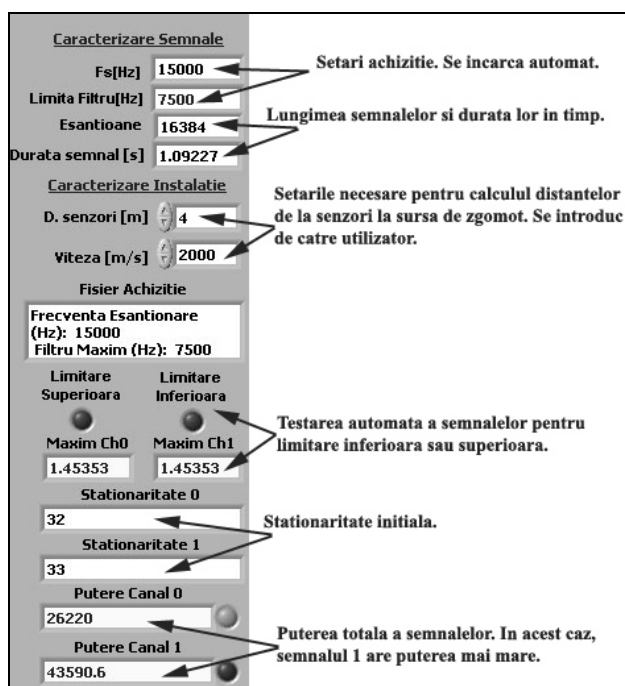


Fig.6.9. Detaliile panoului pentru vizualizarea semnalelor

Problema staționarității semnalelor utilizate este prezentată în același panou cu evoluția pantei fazei densității spectrale de putere mutuală și cu funcția de intercorelație calculată după staționarizare (Fig.6.10). Implementarea acestor algoritmi este automată, utilizatorul nu este nevoit să facă setări suplimentare.

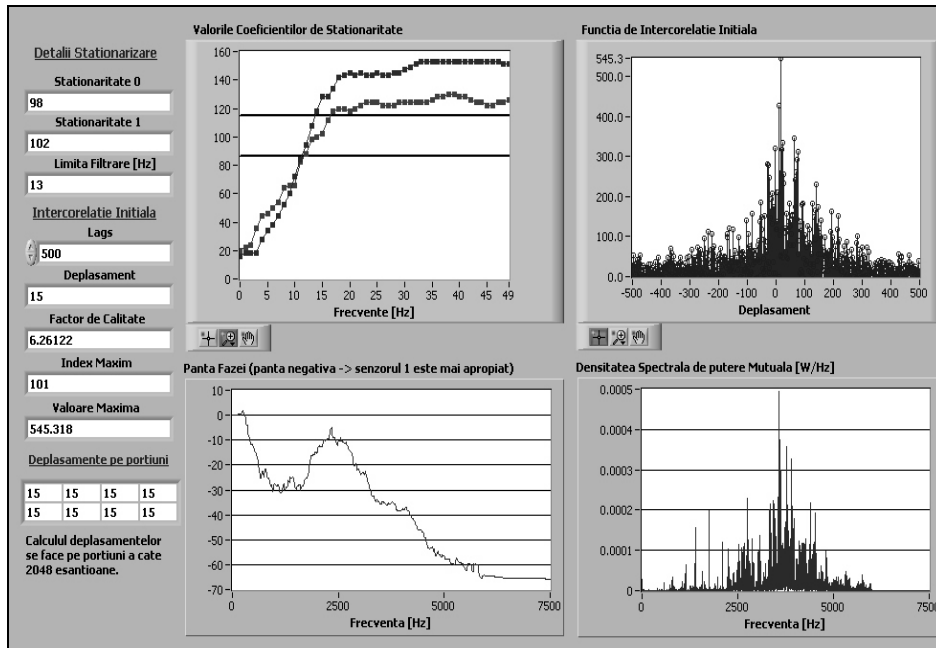


Fig.6.10. Staționarizarea, evoluția pantei și intercorelație clasică pentru semnalele din fișiere

În mod automat se va indica limita de filtrare aleasă pentru staționarizarea semnalelor. Evoluția coeficienților de staționaritate este reprezentată în raport cu intervalul de filtrare trece-sus ( $0 \div 50$ ) Hz. Utilizatorul poate observa încadrarea acestor coeficienți în limitele indicate pe grafic prin linii orizontale. În cazul în care semnalele achiziționate nu au nevoie de staționarizare, filtrarea nu se va efectua. Parametrul *Lags* indică limitele de reprezentare ale FIC. Acest parametru este descris în capitolul 2 al tezei, fiind denumit *m*.

Evoluția pantei fazei este indicația suplimentară care arată care senzor este mai apropiat sau mai depărtat de fisură. Dacă analizăm graficele evoluției acestei pante și a densității spectrale de putere mutuală (rândul de jos în Fig.6.10), observăm că în intervalul ( $2,5 \div 5$ ) kHz, densitatea spectrală de putere mutuală este puternic reprezentată, iar evoluția pantei fazei este una negativă.

Fig.6.11 prezintă detalii despre funcționarea algoritmilor de staționarizare și de reprezentare a evoluției pantei.

O primă afișare a funcției de intercorelație va indica deplasamentul calculat. Această funcție este calculată după staționarizarea semnalelor și nu implică îmbunătățiri suplimentare. Utilizatorul poate urmări factorul de calitate al calculului, valoarea maximă a funcției calculate sau deplasamentul rezultat. Suplimentar, fișierele încărcate se vor analiza automat pe 8 segmente de câte 2048 eșantioane, iar deplasamentele rezultate după calculul intercorelațiilor vor fi afișate. Utilizatorul

poate urmări care deplasament apare cu precădere, acest deplasament fiind considerat ca fiind cel corect.

**Detalii Stationarizare**

Stationaritate 0: 98

Stationaritate 1: 102

Limita Filtrare [Hz]: 13

Intercorelatie Initala

Lags: 500

Deplasament: 15

Factor de Calitate: 6.26122

Index Maxim: 101

Valoare Maxima: 545.318

Deplasamente pe portiuni

15	15	15	15
15	15	15	15

Calculul deplasamentelor se face pe portiuni a cate 2048 esantioane.

Fig.6.11. Detaliile panoului pentru staționizarea semnalelor

Procedura de albire, alături de testele aferente ei, sunt prezentate în Fig.6.12. Implementarea procedurii este automată, utilizatorul nefiind nevoit să facă setări suplimentare sau să intervină asupra modului de execuție al aplicației. Numărul coeficienților utilizați pentru albire este situat în intervalul  $(50 \div 250)$ , iar metoda aleasă este Burg. În funcție de îmbunătățirea coeficientului de calitate, dar și de frecvența cu care apare un anumit deplasament, se va alege pentru albire, numărul minim de coeficienți.

În Fig.6.12 se poate observa că valoarea deplasamentului majoritar este de 15 eşantioane. Pe măsură ce numărul coeficienților utilizați pentru albire crește (graficul din stânga-sus), valoarea deplasamentului calculat se păstrează constantă.

Evoluția factorului de calitate (graficul din dreapta-sus), în raport cu numărul de coeficienți utilizați pentru albirea semnalelor, arată că în cazul utilizării unui număr de 210 coeficienți (în acest caz) calitatea estimării este maximă. Pentru această pereche de semnale, în mod automat, se vor utiliza 210 coeficienți pentru procedura de albire. Factorul de calitate prezintă o creștere a valorii față de valoarea calității prezentată în Fig.6.11.

Dacă utilizatorul aplicației a introdus datele corecte care indică distanța dintre cei doi senzori și viteza de deplasare a zgomotelor în conductă, va putea vizualiza rezultatele localizării fisurii, în urma calculului funcției de intercorelație clasică și calculului funcției de intercorelație după albirea semnalelor. Prin *DO* este

indicată distanța de la fisură (sursa de zgomot) până la senzorul 0, iar prin  $D1$  este indicată distanța de la fisură până la senzorul 0.

Și în acest caz, se efectuează calcule pe porțiuni, însă semnalele utilizate sunt cele albite. Funcția de intercorelație calculată pentru semnalele albite este afișată în graficul de jos (Fig.6.12). Se remarcă faptul că vârful de interes este bine definit, utilizatorul neavând probleme de identificare a maximumului.

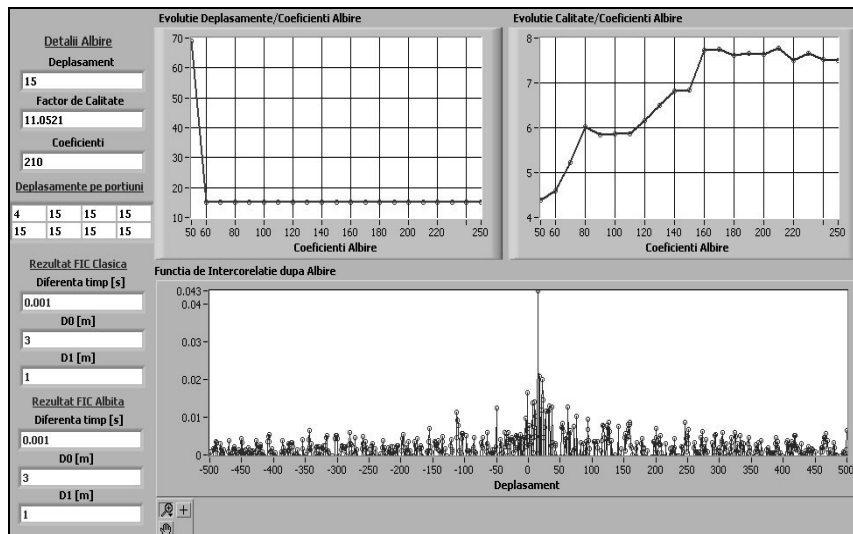


Fig.6.12. Calculul intercorelației în urma procedurii de albire și rezultatele obținute

Fig.6.13 prezintă detaliile despre funcționarea algoritmilor de albire a semnalelor.

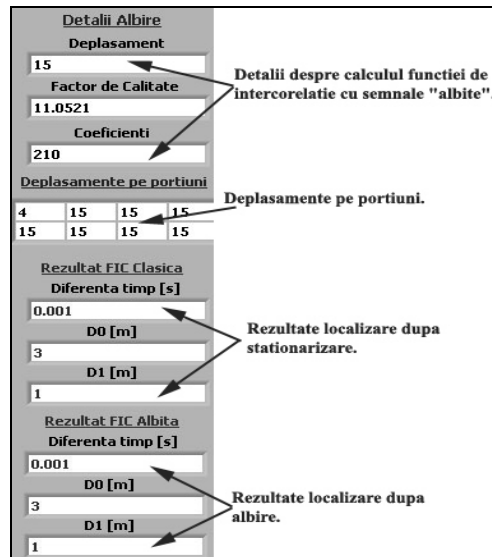


Fig.6.13. Detaliile referitoare la albirea semnalelor

Verificarea valorii corecte obținute pentru deplasament, se face și prin analiza automată a semnalelor pe benzi de frecvențe. Prin calculul funcției de coerență și apoi, prin netezirea aspectului acestei funcții (filtrare trece-jos), se pot determina două intervale de filtrare unde semnalele sunt puternic coerente.

În Fig.6.14 se observă calculul funcției de coerență în variantă clasică (graficul din stânga-sus). Utilizarea funcției în forma aceasta este greoaie. Nu putem defini cu exactitate intervalele de filtrare utile datorită fluctuațiilor funcției. Astfel, se filtrează funcția de coerență calculată în vederea obținerii unei forme netezite (graficul din dreapta-sus). Se vor identifica două intervale de filtrare a semnalelor. Fig.6.15 prezintă detaliile despre funcționarea algoritmilor de albire a semnalelor.

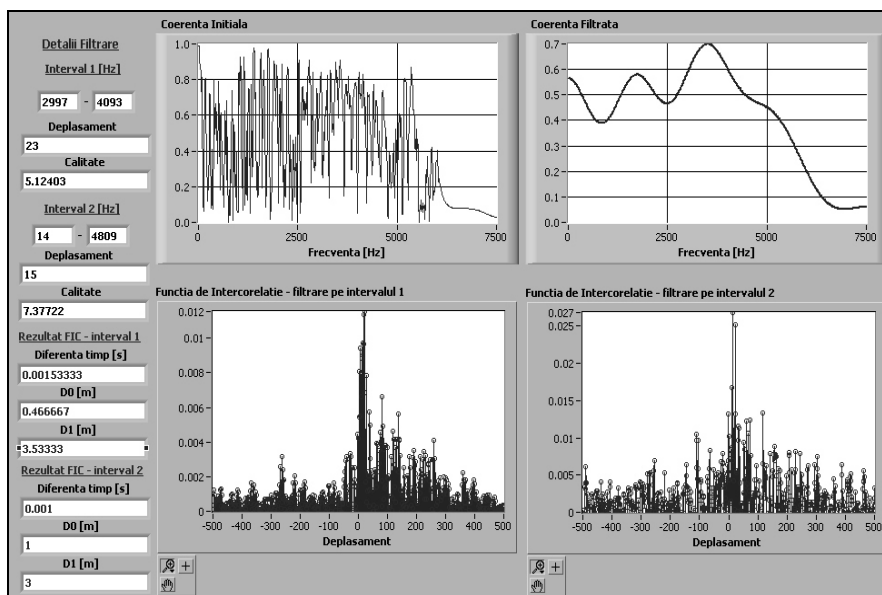


Fig.6.14. Analiza automată pe benzi de frecvență

Calculul funcției de intercorelație între semnale, după filtrarea pe cele două intervale, este utilă, cu precădere, în cazul semnalelor achiziționate pentru debite mici de curgere prin fisură [I5]. Graficele din partea de jos (Fig.6.14) prezintă funcțiile de intercorelație calculate. În cazul din Fig.6.14, filtrarea semnalelor pe un interval mai larg (intervalul 2), este mai avantajoasă. Calitatea și claritatea estimării este mai bună.

Fig.6.16 prezintă implementarea principiului majorității deplasamentelor. Lungimea segmentelor este de 512 eşantioane, fiecare pereche de segmente fiind considerată o măsurare. Numărul de măsurari efectuate este 32. În figură sunt prezentate calculele aferente cazului inițial, cazului 2 din 3 și respectiv, 3 din 5. Probabilitatea apariției unui anumit deplasament este indicată procentual împreună cu valoarea deplasamentului pentru toate cele 3 cazuri de calcul.

Trebuie menționat faptul că, operațiile de determinare a apariției unui anumit deplasament se aplică pe semnalele albite anterior. Perechile de grafice din Fig.6.16 arată evoluția valorilor deplasamentelor la fiecare măsurare (cele din stânga), respectiv, numărul de repetiții ale unei anumite valori (histogramele).

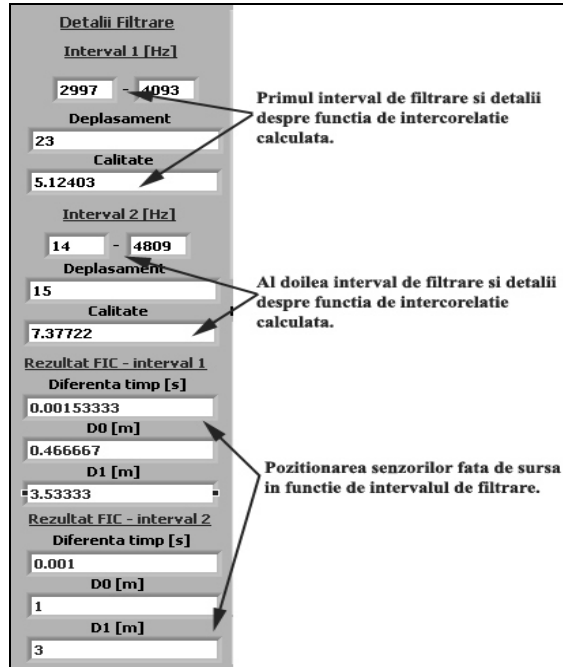


Fig.6.15. Detalii referitoare la analiza automată pe benzi de frecvență

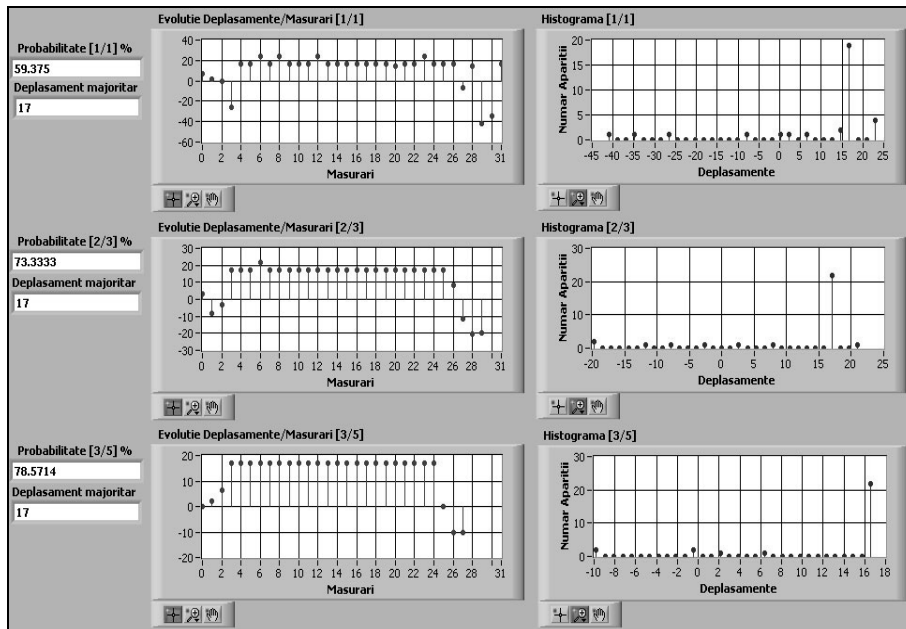


Fig.6.16. Implementarea principiului majorității deplasamentelor

## 6.5 Studiu comparativ între aplicația dezvoltată în cadrul programului de doctorat și o aplicație profesională dedicată localizării fisurilor din conducte

Aplicația dezvoltată în cadrul programului de doctorat a fost comparată din punct de vedere al performanțelor de localizare (acuratețe, factor de calitate al funcției de intercorelație, funcționare automată, etc.) cu o aplicație profesională. Prin sprijinul financiar al Universității Politehnica Timișoara am achiziționat un aparat de diagnosticare profesional denumit Correlux P200 [S4]. Aparatul este unul modern (poate fi definit ca instrument virtual) incluzând o parte software și o parte hardware.

În ceea ce privește componenta hardware a sistemului Correlux P200, aceasta este mai performantă decât cea utilizată în cadrul experimentelor efectuate. Noutatea apare la partea de transmisie a datelor de la senzori către calculatorul gazdă. Această transmisie se efectuează *wireless*, dispărând astfel restricțiile impuse de utilizarea cablurilor (limitarea distanțelor de măsurare).

În ceea ce privește instalația hardware utilizată în cadrul experimentelor, utilizarea transmisiei datelor prin cabluri coaxiale impune o limitare a distanței care există între senzori. Amplificarea semnalelor, filtrarea acestora dar și transferul către calculator implică utilizarea unor aparate dedicate (două amplificatoare M60T, un filtru hardware, o placă de achiziție de date model NI USB 9215A).

Componente care asigură amplificarea și filtrarea semnalelor achiziționate de senzori se regăsesc și în cadrul hardware-ului sistemului Correlux. Diferența este că ele sunt incluse în interiorul unor carcase.

Concluzia referitoare la componenta hardware a celor două instrumente (cel dezvoltat în cadrul doctoratului și cel profesional) este că sistemul Correlux P200 prezintă un avantaj. Limitările instalației utilizată în cadrul programului de doctorat se datorează utilizării legăturilor prin cabluri coaxiale.

Putem sublinia că datorită dimensiunilor reduse ale modelului experimental (conducta cu o lungime totală de 9,83 m) transmisia datelor prin intermediul cablurilor nu a reprezentat o problemă. Totuși, dacă trebuie analizate sisteme de conducte cu lungimi de ordinul sutelor de metri, transmiterea datelor achiziționate de senzori prin cabluri nu este aplicabilă. Un motiv este acela că durează foarte mult până se conectează/aranjează cablurile, placa de achiziție, amplificatoarele și filtrul hardware.

În Fig.6.17 se prezintă panoul frontal al aplicației software Correlux P200. Analiza funcționalității software-ului pe care instrumentul Correlux P200 îl pune la dispoziția utilizatorului arată că acesta trebuie să aibă experiență în domeniul analizei/procesării semnalelor. Manualul de utilizare al instrumentului Correlux P200 oferă detalii despre modul de operare. Referitor la parametri tehnici utilizați nu sunt oferite explicații. Reprezentarea semnalelor achiziționate se face în partea de sus a panoului (*Signal A, Signal B*).

Dacă analizăm funcțiile de prelucrare a semnalelor prezente în cadrul acestui panou vom constata că sunt mai puține decât cele utilizate de aplicația *Detectie.exe*.

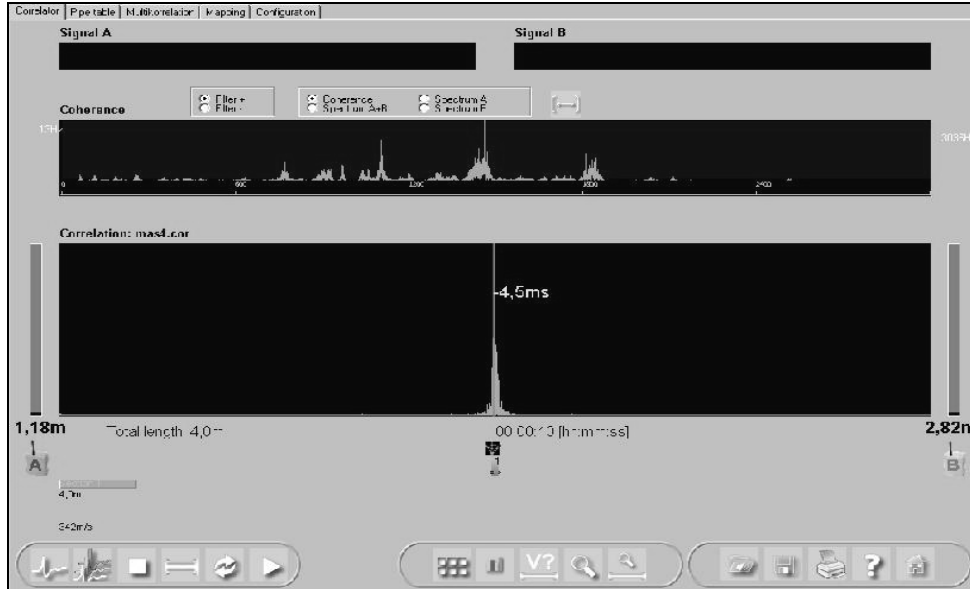


Fig.6.17. Panoul frontal al software-ului Correlux P200

În ceea ce privește caracterizarea în domeniul frecvențe a acestor semnale se observă reprezentarea pe o bandă în intervalul  $(0 \div 3)$  kHz. Frecvența de eșantionare utilizată pentru achiziție nu este specificată, dar putem deduce că o valoare minimă de 6 kHz este plauzibilă. Nu se specifică dacă această frecvență poate fi modificată de către utilizator. În cazul aplicației *Detectie.exe* se oferă posibilitatea alegerii frecvenței de eșantionare.

La nivel de analiză, se afișează funcția de coerență și spectrele celor două semnale. Utilizatorul este cel care trebuie să știe ce reprezintă această funcție de coerență. Dacă se dorește filtrarea semnalelor (lucrul într-o anumită bandă de frecvențe), utilizatorul trebuie să decidă manual care este banda cea mai potrivită. Opțional se oferă zece intervale de frecvențe predefinite pe care sunt analizate semnalele (Fig.6.18). Din nou, alegerea unui interval de filtrare potrivit rămâne în sarcina utilizatorului.

Pe panoul frontal se prezintă puterea totală a semnalelor și funcția de intercorelație calculată. Sunt indicate distanțele de la fisură până la cei doi senzori și detaliile despre măsurare (distanța între senzori, viteza de propagare și tipul materialului din care este fabricată conducta). În mod grafic este ilustrată conducta și plasamentul fisurii identificate între cei doi senzori.

Dacă vom compara aceste facilități de prelucrare (coerență, corelație, putere, spectre) cu cele oferite de aplicația dezvoltată în cadrul programului de doctorat constatăm că ele se regăsesc și în cadrul pachetului *Detectie.exe*. În plus, prin utilizarea aplicației *Detectie.exe* semnalele sunt testate pentru staționaritate, frecvența de eșantionare poate fi modificată (o perioadă de eșantionare mai mică înseamnă o acuratețe mai bună), se prezintă setările utilizate pentru achiziția semnalelor și se arată dacă semnalele sunt sau nu limitate. Referitor la utilizarea intervalelor de frecvențe, aplicația *Detectie.exe* utilizează analiza automată prin filtrarea funcției de coerență și determinarea a două intervale potrivite (Fig.6.14). Utilizatorul nu trebuie decât să citească rezultatele.



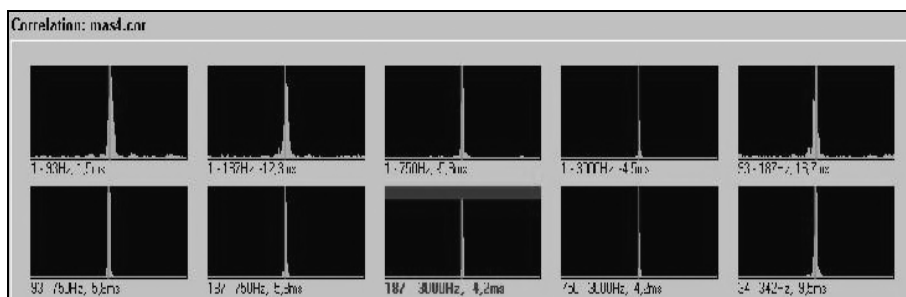


Fig.6.18. Intervații de frecvențe utilizate pentru analiza semnalelor

În Fig.6.19 se prezintă analiza pe segmente specifică programului Correlux P200. Funcțiile de intercorelație calculate sunt afișate în mod tridimensional. Cele 3 axe după care se face reprezentarea nu sunt denumite în aplicația Correlux P200. Trebuie dedus faptul că reprezentarea se face în funcție de numărul eșantioanelor FIC, valorile acestor eșantioane și numărul FIC calculate.

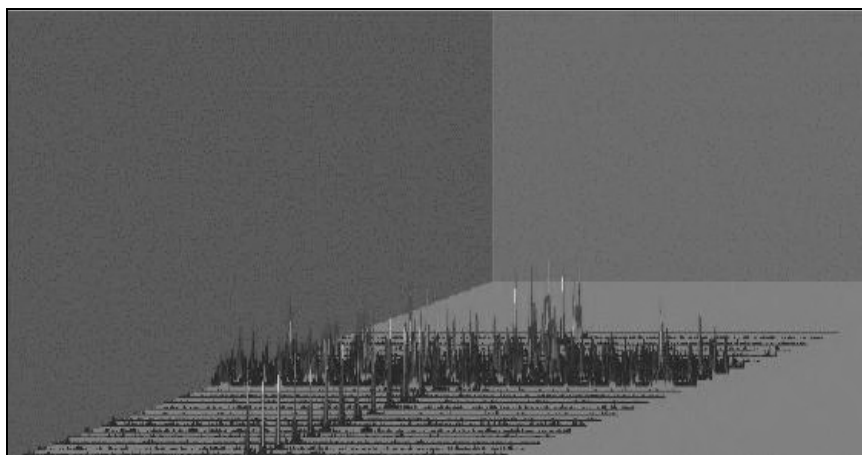


Fig.6.19. Analiza semnalelor pe segmente, reprezentare 3-D

În cazul programului *Detectie.exe*, analiza pe segmente se face pe lungimi de câte 2048 eșantioane (Fig.6.11). Utilizatorul poate citi valorile deplasamentelor și le poate compara cu valoarea deplasamentului obținută pentru calculul pe întreaga lungime. Procedul de albire a semnalelor, analiza evoluției pantei fazei densității spectrale de putere mutuală dar și implementarea principiului deplasamentelor sunt facilități oferite de aplicația *Detectie.exe* care nu se regăsesc în programul de analiză al instrumentului profesional.

Instrumentul Correlux P200 are la nivel de software avantajul că utilizatorul poate selecta detaliile despre conducta pe care efectuează măsurătorile (tip material, diametru interior) iar viteza de deplasare a zgomotelor de fisură este setată în mod automat deoarece viteza depinde de material și diametrul conductei. Această posibilitate este prezentată în Fig.6.20.

The screenshot shows a configuration window for pipe sections. At the top, it displays 'Pipe sections' with a value of 1 and 'Total length' as 100.0m. Below this, a section titled 'Section1' contains several input fields: 'Length [m]' set to 100, 'Material' set to PVC, 'Diameter [mm]' set to 16, and 'Velocity [m/s]' set to 482. There are also up and down arrow buttons next to the length and velocity fields. At the bottom left of the section, there is a 'manual' checkbox.

Fig.6.20. Introducerea datelor despre conductă

Valorile vitezelor de propagare prin diferitele tipuri de materiale se obțin pe cale experimentală și pot fi utilizate în cadrul aplicației *Detectie.exe*.

Ambele aplicații prezintă posibilitatea consultării unui manual de utilizare și a salvării datelor cu care s-a lucrat. Datele salvate cu ajutorul aplicației *Detectie.exe* au avantajul de a putea fi utilizate și în cadrul altor programe (de exemplu Matlab).

Datorită posibilității de salvare a datelor achiziționate s-a încercat analizarea semnalelor achiziționate prin hardware-ul Correlux P200 prin intermediul programelor aplicației *Detectie.exe*. Debitul din fisură nu au fost măsurate. Singurele date cunoscute au fost distanța de patru metri între senzori și viteza de deplasare a sunetelor prin conductă (după efectuarea unui test de viteză cu ajutorul aparatului Correlux P200). În Fig.6.21 se prezintă o pereche de semnale achiziționate cu aparatul Correlux P200 (16384 eșantioane).

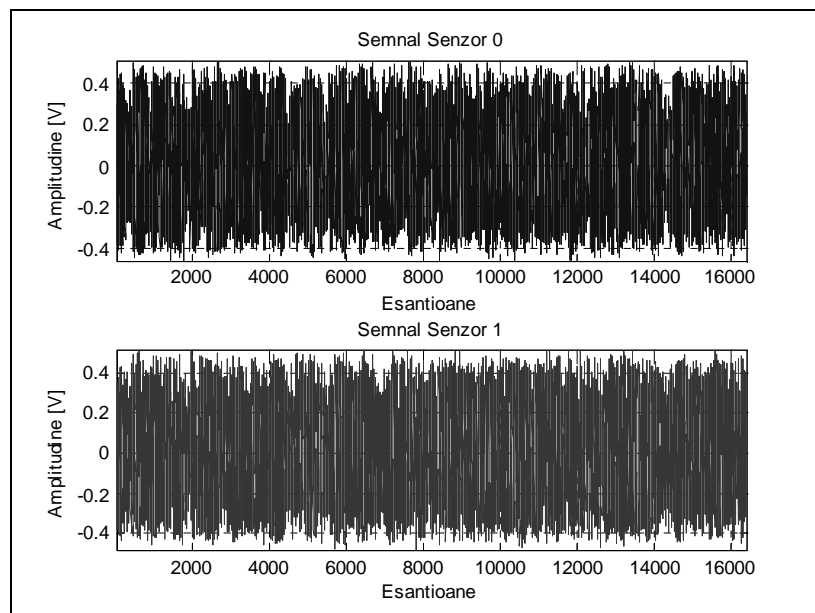


Fig.6.21. Semnale măsurate cu aparatul profesional Correlux P200

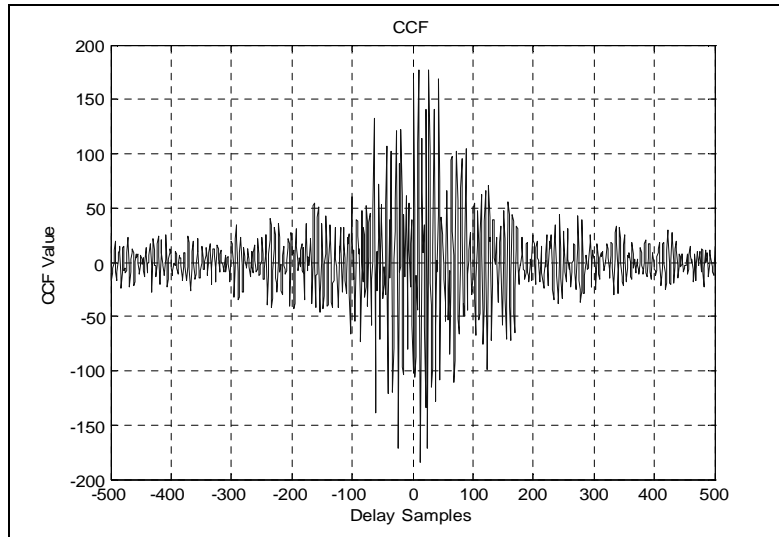


Fig.6.22.FIC pentru semnale măsurate cu aparatul profesional Correlux P200

Fig.6.22 prezintă funcția de intercorelație calculată pentru aceste semnale. Valoarea deplasamentului este de 27 eşantioane. Factorul de calitate pentru FIC calculată este de 4,42. Este important de precizat faptul că pentru diferite măsurări, valoarea de 27 eşantioane a deplasamentului a rămas constantă. Factorii de calitate pentru FIC calculate au fost ca valoare mai mici decât cei obținuți prin prelucrările implementate în aplicația *Detectje.exe*. În ceea ce privește acuratețea de localizare a aparatului Correlux P200, eroarea minimă obținută prin experimente are valoarea de 10 cm. În general, eroarea de localizare se situează în jurul valorii absolute de 20 cm ceea ce reprezintă o eroare relativă de 10% (diferența de drum dintre cele două semnale este de 2 m). Fig.6.17 este un exemplu în acest sens. Aici, distanța de la fisură la senzorul A are valoarea de 1,18 m. În realitate această distanță a fost de 1 m. La scăderea debitului din fisură sub valoarea de 1 l/min se constată o mare fluctuație a rezultatelor localizării, mergând până la imposibilitatea determinării corecte a vitezei de propagare a zgomotelor de fisură. Apare o indicație conform căreia viteza zgomotelor de fisură nu se încadrează în intervalul validat de aparat (*Measured velocity outside valid range from 200-1400 m/s*).

În cazul instrumentului dezvoltat în cadrul programului de doctorat, acuratețea de localizare a urmărit obținerea aceluiași deplasament pentru toate măsurările efectuate la un anumit debit. Acest scop a fost atins. Un alt scop a fost obținerea unui factor de calitate suficient de bun pentru FIC.

## 6.6 Concluzii

Aplicația pentru localizarea surselor de zgomot (fisuri în conducte), a fost dezvoltată prin utilizarea mediului de programare grafică LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), versiunea 8.5.

Pentru testarea suplimentară a funcționării rutinelor implementate s-a utilizat programul Matlab, versiunea 7.5. În cadrul anexelor se prezintă selecții din programele utilizate. Metodele de analiză specifice acestui tip de aplicație au fost implementate sub forma unor sub-instrumente virtuale. O trăsătură importantă a acestei aplicații este implementarea automată a modului de utilizare. Intervenția din partea utilizatorului este minimă. Acesta trebuie să urmeze o procedură simplă de instalare a unor programe de tip driver.

Partea hardware a acestei instrumentații virtuale este reprezentată de senzori piezoelectrice, amplificatoare, un filtru și placa de achiziție NI USB 9215A. Pachetul software pentru localizarea fisurilor include o parte de programe de tip driver și o parte de programe pentru analiza semnalelor. Instalarea programelor driver asigură comunicarea între partea hardware a instrumentației (placa NI USB 9215A) și partea de analiză a semnalelor (executabilul *Detectie.exe*). Instalarea pachetului de drivere se face ușor, modul fiind specific oricărei aplicații care necesită o comunicare cu un element hardware.

Partea de analiză poate fi rulată atât în mod simplificat, cât și în mod complex. Modul simplificat de lucru implică utilizarea directă a semnalelor achiziționate de placă. Procedurile de analiză sunt puține datorită faptului că timpul de execuție trebuie să fie cât mai redus. Dacă se salvează semnalele achiziționate în fișiere de măsurare, acestea pot fi utilizate pentru analiza extinsă.

Procedurile de analiză extinsă presupun existența unor fișiere de măsurare salvate în directorul *Fișiere*, creat automat pe partiția C a harddisk-ului. Tot ceea ce utilizatorul trebuie să facă este să încarce fișierele cu datele măsurate (extensie \*.lvm) și într-un timp de execuție relativ redus (în jurul valorii de 60 de secunde), se va efectua analiza completă a semnalelor.

Panoul frontal al programelor pentru analiza extinsă prezintă semnalele încărcate din fișier, precum și distribuția spectrală a acestora. Alături de aceste grafice, utilizatorul are posibilitatea identificării care din cele două semnale are o putere totală mai mare. Această putere poate fi un indiciu referitor la apropierea senzorilor față de sursa de zgomot.

Analiza staționarității semnalelor se efectuează în mod automat. După staționarizare, funcția de intercorelație este analizată atât pe întreaga lungime a semnalelor, cât și pe porțiuni. Se calculează și se afișează factorul de calitate și deplasamentul valorii maxime pentru funcția de intercorelație rezultată după staționarizarea semnalelor. Panta fazei, împreună cu densitatea spectrală de putere mutuală, indică apropierea mai mare a unui senzor față de fisură. Acest rezultat poate fi verificat cu rezultatul calculului puterii totale a semnaleor.

Algoritmii albirii semnalelor se aplică în mod automat. Coeficienții necesari se aleg în funcție de factorul de calitate și deplasamentul funcției de intercorelație. Analiza funcției de intercorelație calculată cu semnale albite, se efectuează pe întreaga lungime, dar și pe porțiuni. Astfel, utilizatorul poate vizualiza rezultate multiple.

Valoarea deplasamentului obținut este cel mai important rezultat. În cazul în care semnalele sunt achiziționate corect, zgomotele parazite sunt reduse și funcția de intercorelație calculată are un aspect clar (maximul este prominent), valoarea deplasamentului calculată după staționarizarea și albire trebuie să fie aceeași. Dacă valoarea deplasamentului obținut după staționarizare este mult diferită față de cea obținută după aplicarea albirii, analiza prin procedeu de albire trebuie ignorată. Albirea modifică valorile frecvențelor din componența semnalelor și netezește spectrele. Acest procedeu modifică semnalele măsurate și deci vom considera corect

rezultatul obținut atunci când semnalele nu au fost modificate, adică înainte aplicării procedurii de albire. Dacă utilizatorul a intrudus corect distanța între senzori și viteza de propagare a zgomotelor în conductă, se pot vizualiza rezultatele care indică poziția senzorilor față de fisură.

Analiza semnalelor în domeniul de maximă coerență se face prin intermediul unui algoritm automat care selectează două benzi de frecvență. După filtrarea automată a semnalelor pe cele două benzi de frecvențe, se indică deplasamentele pentru funcțiile de intercorelație calculate. Și în acest caz, utilizatorul poate vizualiza distanțele de la senzori la fisură.

Principiul majorității deplasamentelor indică probabilitatea de apariție a unui anumit deplasament. Estimarea corectă are ca rezultat o probabilitate de apariție ridicată pentru o anumită valoare a deplasamentului. Implementarea algoritmilor este automată, utilizatorul trebuie doar să citească rezultatele calculate.

Din comparația unui aparat de localizare profesional (Correlux P200) cu aplicația dezvoltată în cadrul programului de doctorat se deduce faptul că aceasta din urmă este fiabilă, ușor de utilizat și mai performantă. Instrumentația realizată și metoda de lucru sunt valide. Nevoia de cercetare în domeniu, nevoia de a implementa noi algoritmi de analiză, nevoia de noi încercări este justificată și de faptul că aparatul profesional, testat pe instalația experimentală, prezintă erori de localizare mai mari de cât aplicația *Detectie.exe* și prezintă limitări la debite din fisură mici.



Fig.6.23. Funcționarea aplicației pentru localizarea surselor de zgomot

Achiziționarea unui aparat de acest gen nu garantează rezultate foarte bune indiferent de condițiile de lucru. Dezvoltarea aplicației *Detectie.exe* poate fi continuată deoarece rezultatele obținute sunt încurajatoare și corecte. O posibilă direcție de dezvoltare este realizarea unui sistem de transmisie a datelor de la senzori la calculator prin intermediul undelor radio.

Fig.6.23 prezintă funcționarea aplicației prin rularea executabilului *Detectie.exe*. Se observă conectarea plăcii de achiziție la calculatorul portabil.

## 7. CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII

### 7.1 Concluzii generale

Pe parcursul ultimelor trei decenii, în domeniul localizării surselor de zgomot s-a desfășurat o intensă activitate de cercetare concretizată printr-un număr impresionant de publicații științifice. La baza localizării surselor de zgomot stă principiul teoretic al determinării diferenței timpilor de propagare (*time delay estimation - TDE, time difference of arrival - TDOA*). Dintre aplicațiile practice ale acestui domeniu teoretic de cercetare, localizarea fisurilor din conductele pentru transportul lichidelor și gazelor este una de permanentă actualitate. Maturitatea acestui domeniu de cercetare este reflectată și de realizarea de către firme de profil a unor instrumente de măsurare specializate.

Deși soluțiile tehnice concretizate în aparatură specializată pentru localizarea fisurilor din conducte sunt diversificate, acestea nu acoperă toată gama de posibile scenarii relative la materialele de fabricație ale conductelor, la grosimea pereților conductelor, la diametrul interior al conductelor, la natura lichidului transportat sau la ambientul în care este amplasată rețeaua de transport. Această situație justifică atât continuarea investigațiilor teoretice cât și realizarea de aparate care să acopere cât mai multe condiții de exploatare.

Din punct de vedere al implementării principiilor de localizare trebuie evidențiate noile posibilități oferite de instrumentația virtuală. Aceasta permite implementarea flexibilă, modulară și în condiții de preț redus a unor principii noi care să ducă la îmbunătățirea acurateții localizării în condiții de manipulare prietenoasă pentru utilizator (*user friendly*).

Un aparat de localizare a surselor de zgomot (sau de diagnosticare a unui sistem tehnic) care are caracteristicile unei instrumentații virtuale se poate aplica și în procesul didactic. Ideea de a dezvolta instrumentații virtuale, care au performanțe ridicate și sunt reduse ca preț este susținută de conducerea Universității "Politehnica" Timișoara. În baza proiectului intitulat *Dotarea unui laborator pentru dezvoltarea aplicațiilor industriale în domeniul analizei zgomotelor și vibrațiilor*, s-a achiziționat un aparat profesional de localizare a fisurilor din conducte. Aparatul denumit Correlux P200 este un instrument virtual de ultimă generație și a fost utilizat pentru a valida prin comparare performanțele de instrumentației virtuale finalizată în cadrul programului de doctorat. În viitor, atât instrumentația dezvoltată în cadrul tezei cât și aparatul Correlux P200 vor fi utilizate în scopuri de cercetare dar și didactice.

Spre deosebire de majoritatea abordărilor din literatura de specialitate, în care cercetările sunt fundamentate pe ipoteze privitoare la natura semnalelor și se opresc în faza de simulare a algoritmilor propuși, prezenta lucrare are la bază semnale reale măsurate și se concretizează prin realizarea unei instrumentații virtuale care include principii și algoritmi originali. Această instrumentație virtuală prezintă posibilitatea multiplicării în vederea utilizării industriale. Semnalele reale au fost măsurate într-o instalație experimentală de dimensiuni reduse. Contrar opiniei generale după care modelele experimentale (de laborator) oferă condiții avantajoase pentru cercetători, în cazul de față dimensiunea redusă implică

dificultăți suplimentare față de o rețea de conducte uzuală, de dimensiuni mari. Un prim motiv este că zgomotele perturbatoare, suprapuse peste semnalele utile, care se presupun statistic independente, sunt, la scara redusă a modelului, corelate. În plus, erorile de localizare de ordinul centimetrilor, datorate unor turbulențe la nivelul fisurii, reprezintă procentual abateri semnificative în cazul unui modelului redus ca dimensiune (comparativ cu o rețea de conducte reală).

Utilizarea instrumentației dezvoltate este simplă. Un scop al cercetărilor efectuate a fost și acela de a crea o aplicație care să poată fi operată de oricine are o minimă pregătire tehnică.

La nivelul țării noastre, cercetările în ceea ce privește dezvoltarea și implementarea aplicațiilor pentru localizarea fisurilor din conducte este abia la început, în comparație cu situația din țări precum Australia, SUA, Canada, Germania sau Marea Britanie. Există preocupări științifice intense din partea unor companii private dar și la nivel universitar. Nevoia de cercetare și dezvoltare a unor aplicații pentru monitorizare cât mai performante este unanim acceptată. Dotarea companiilor care asigură servicii de întreținere a sistemelor de transport se face prin importul unor aparate dedicate. Prezența lucrare contribuie la partea de cercetare în domeniul analizei zgomotelor și vibrațiilor provenite de la surse de zgomot.

## 7.1 Contribuții

Lucrarea include contribuții originale care au fost elaborate în urma cercetărilor și experimentelor desfășurate în timpul programului de doctorat. În continuare se prezintă aceste contribuții în ordinea apariției lor din teză.

- S-a realizat un studiu bibliografic privitor la stadiul actual în domeniul localizării fisurilor din conducte. Prin informații recente susținute de statistici, tabele și cifre se arată importanța și actualitatea domeniului. În acest studiu se justifică necesitatea continuării preocupărilor de cercetare în domeniul localizării fisurilor din conducte. O direcție de dezvoltarea a aparatelor de localizare este utilizarea instrumentației virtuale. Studiul realizat are la bază 161 titluri bibliografice care includ cărți, articole științifice și informații de pe pagini web. Între aceste titluri 10 aparțin autorului și se împart în 3 referate (prezentate în timpul programului de doctorat) și 7 articole științifice. Dintre cele 7 articole științifice 2 sunt cotate ISI.
- S-a realizat o instalație experimentală care a permis achiziționarea și prelucrarea unor semnale reale, măsurate. Prin intermediul instalației s-au putut testa algoritmi implementați pentru prelucrarea semnalelor măsurate.
- S-a aplicat o procedură originală de identificare a instalației experimentale. Au fost determinate funcțiile de transfer ale porțiunilor de conductă de la fisură la punctele de amplasare a senzorilor și s-a studiat comportarea instalației experimentale în domeniul frecvențelor relativ joase și relativ înalte. Procedura de identificare a fost unul neconvențional și a constat constă în testarea multor zgomote posibile de intrare și care trecute prin funcțiile de transfer determinate pentru sistemul de conducte, determină semnalele măsurate de senzori. Selectarea zgomotelor de intrare se face pe baza minimizării resturilor de deconvoluție cu semnalele măsurate. S-a evidențiat importanța domeniului frecvențelor joase din spectrul semnalelor provenind de la fisură.

- Se propune un model sistemic original care caracterizează instalația experimentală (Fig.3.10, relațiile 3.15). Față de modelul clasic, sistemul propus are avantajul că zgomotele perturbatoare sunt implicit corelate. Această ipoteză este cu atât mai realistă cu cât distanța între senzori este mai mică. Față de modelul clasic, în noul model atenuările semnalelor sunt dependente de frecvență.
- Se evidențiază că relația 3.13 bazată pe modelul cunoscut din literatură și care presupune o dependență liniară a defazajului de diferența timpilor de propagare este valabilă doar în domeniul frecvențelor joase. Se propune o formulă generalizată originală (3.14) pentru relația dintre defazajul funcțiilor de transfer calculate pentru instalație și diferența timpilor de propagare.
- Procedura de „identificare” propusă în lucrare permite determinarea diferenței timpilor de propagare din diferența de fază a funcțiilor de transfer. În cadrul unui test preliminar operațiunii de localizare a fisurii, plasând senzorii la distanță cunoscută unul față de celălalt, determinarea diferenței timpilor de propagare prin procedura propusă, permite stabilirea vitezei de propagare a zgomotelor prin conductă.
- S-a studiat staționaritatea semnalelor măsurate în instalația experimentală și s-a implementat un algoritm pentru staționarizarea acestora. Criteriul care atestă dacă un semnal este sau nu staționar este preluat din literatură însă algoritmul de staționarizare bazat pe „filtrarea ideală” trece-sus este original. De asemenea implementarea software a acestui algoritm este originală.
- S-a studiat dependența puterii totale a semnalelor măsurate în funcție de debitul din fisură. Evidențierea pe semnale reale și simulate a posibilității de determinare a sensorului mai apropiat de fisură pe baza pantei fazei densității spectrale de putere mutuală s-a concretizat prin implementarea unui program de calcul original.
- Se utilizează noțiunea de timp de stabilire generalizat (*Settling time*) pentru studiul comportării dinamice a senzorilor utilizați. Ilustrarea grafică a timpului de stabilire în cazuri particulare pur deterministe, pur aleatoare și mixte este o contribuție originală.
- S-a studiat efectul componentei continue din semnale asupra timpului de stabilire. Se subliniază faptul că prezența componentei aleatoare micșorează timpul de stabilire comparativ cu timpul de stabilire determinist. Studiul original este aplicat senzorilor de ordinul unu cu comportare de tipul filtru trece-jos.
- S-a introdus o relație originală (4.28) pentru stabilirea perioadei de eșantionare în funcție de timpul de stabilire determinist. Relația se aplică în cazul măsurării unor semnale cu componentă continuă nulă și are ca efect creșterea rezoluției funcțiilor de intercorelație și implicit a preciziei de localizare a surselor de zgomot.
- Se deduce o formulă originală (4.36) pentru timpul de stabilire în funcție de raportul ( $\eta$ ) dintre banda zgomotului aplicat la intrare și pulsația de tăiere a sensorului. Formula (4.36), combinată cu relația (4.28), permite stabilirea perioadei de eșantionare optimă în funcție de lărgimea de bandă a zgomotului de intrare și a pulsației de tăiere a sensorului. Ca o altă posibilă utilizare, relația permite alegerea sensorului mai potrivit (în sensul reducerii timpului de stabilire) pentru semnalul de măsurat. Această utilizare



- presupune că există informații apriorice despre banda de frecvențe a zgomotului de intrare precum și posibilitatea alegerii între mai mulți senzori.
- S-a implementat un algoritm care calculează factorul de calitate a funcției de intercorelație, respectiv evidențierea valorii maxime a funcției în raport cu vârfurile adiacente maximului. Modul de funcționare al algoritmului este inspirat din literatura de specialitate dar îmbunătățirile aduse sunt originale. Acestea se referă la eliminarea comparației între valoarea maximă a FIC și valorile negative ale acestei funcții.
  - Procedeele de filtrare al semnalelor este cunoscut în literatura de specialitate. Implementarea acestui algoritm sub formă de sub-instrument virtual (utilizare LabVIEW) care poate fi utilizat și în alte aplicații este o realizare originală.
  - S-a implementat un algoritm original care determină în mod automat numărul de coeficienți (ordinul modelului autoregresiv) necesari pentru a aplica semnalelor procedura de albire astfel încât factorul de calitate al funcției de intercorelație să fie maxim. Algoritmul este disponibil atât sub formă de sub-instrument virtual cât și sub formă de program text (utilizare MATLAB).
  - S-a implementat un algoritm original care afișează în mod automat evoluția deplasamentelor funcțiilor de intercorelație calculate pentru un anumit semnal în funcție de numărul de coeficienți (ordinul modelului autoregresiv). Programul este implementat în formă de sub-instrument virtual și este utilizat în acord cu algoritmul descris anterior.
  - S-a realizat un studiu original care utilizează semnalele măsurate în instalația experimentală pentru a arăta gradul de creștere al factorului de calitate a funcțiilor de intercorelație în urma aplicării procedurii de albire. Studiul este ilustrat prin tabele și grafice.
  - Algoritmul de prelucrare a semnalelor pe cele mai potrivite două benzi de frecvențe este original. Acest algoritm utilizează funcția de coerență în formă filtrată. Beneficiile utilizării algoritmului sunt evidențiate prin grafice și tabele. Implementarea acestui algoritm sub formă de sub-instrument virtual este originală.
  - Principiul majorității deplasamentelor reprezintă o contribuție originală. Utilizarea acestuia presupune existența unui număr suficient de mare de experimente (măsurări). Prin calcularea funcțiilor de intercorelație și a deplasamentelor pentru toate aceste măsurări se asigură determinarea unei valori a deplasamentului care apare cu precădere. Principiul determină probabilitatea de apariție a unui anumit deplasament în cadrul măsurărilor efectuate atunci când studiem secvențe de câte 3, 5 și 7 valori din vectorul deplasamentelor calculate. Implementarea principiului în forma de sub-instrument virtual este originală.

### 7.3 Direcții de dezvoltare

Baza oferită de această lucrare poate fi dezvoltată și valorificată în viitor. Contribuțiile concretizate prin formule de calcul, studii sau programe software pot fi dezvoltate în viitor. Câteva probleme care vor fi urmărite în cercetările viitoare sunt:

- Determinarea funcției de pulsație  $F(\omega)$  din cadrul relației 3.14, în general neliniară (pentru diferite situații experimentale).
- Studiul pe semnale reale și simulate a posibilității de îmbunătățire a acurateții de localizare pe baza prelucrării fazei densității spectrale de putere mutuală.
- Aplicarea studiului despre comportamentul dinamic unor senzori de ordinul 2 utilizând noțiunea de timp de stabilire generalizat.
- Studiul dependenței timpului de stabilire pentru senzori de ordinele unu și doi, în funcție de pulsația de tăiere a senzorilor atunci când banda zgomotului de intrare este cunoscută aprioric.
- Dezvoltarea unei componente hardware care să permită transmiterea semnalelor de la senzori către placa de achiziție prin mijloace wireless.
- Îmbunătățirea implementării software a algoritmilor de analiză prin eficientizarea modului de structurare al aplicației.
- Testarea instrumentației dezvoltate în cadrul unei instalații de transport a gazului.
- Determinarea dimensiunilor fisurii (a cantității de lichid care se pierde) pe baza studiului puterii și spectrului zgomotelor de fisură.
- Dezvoltarea unei implementări software a unui algoritm care determină viteza de propagare a zgomotelor prin materialul conductei, pentru diferite debite din fisură pe baza procedurii originale de identificare a instalației.
- Realizarea unui studiu statistic prin simularea erorilor de localizare pe baza procedurii neconvenționale de identificare a instalației.

## BIBLIOGRAFIE

- [A1] K. E. Abhulimen, Alfred A. Susu, *Liquid Pipeline Leak Detection System: Model Development and Numerical Simulation*, Chemical Engineering Journal, Volume 97, Issue 1, Pp.47-67, January, 2004.
- [A2] S. Ahmed, B. Huang, S.L. Shah, *Parameter and delay estimation of continuous-time models using a linear filter*, Journal of Process Control, Volume 16, Issue 4, Pp. 323-331, April, 2006.
- [A3] \*\*\*Alaska Department of Environmental Conservation, *Technical Review of Leak Detection Technologies. Volume I. Crude Oil Transmission Pipelines*, <http://dec.state.ak.us/spar/ipp/docs/ldetect1.pdf>.
- [A4] \*\*\*Alaska Department of Environmental Conservation, *Technical Review of Leak Detection Technologies. Volume II. Aboveground Bulk Fuel Storage Tanks.*, <http://www.dec.state.ak.us/spar/ipp/docs/ldetect2.pdf>.
- [A5] D. Alsaialy, M. Tawy, M. Susan, *Introduction to LabView Two-Part Exercise*, ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, USA, November, 2003.
- [A6] \*\*\*AQUATIM, *Raport anual 2006*, <http://www.aquatim.ro/ro/87/rapoarte.htm>.
- [B1] \*\*\* [http://www.bdew.de/bdew.nsf/ID/DE\\_Home](http://www.bdew.de/bdew.nsf/ID/DE_Home)
- [B2] S.B.M. Beck, M.D. Curren, D. Sims, R. Stanway, *Pipeline network features and leak detection by cross-correlation analysis of reflected waves*, Journal of Hydraulic Engineering, Volume 131, Issue 8, Pp. 715-723, August, 2005.
- [B3] S.B.M. Beck, I. Al-Shidhani, W.J. Staszewsky, *Leak monitoring in pipeline networks using wavelet analysis*, Key Engineering Materials, Volume 245-346, Pp. 51-58, August, 2003.
- [B4] Z. Belhachmi, A. Karageorghis, K. Taous, *Identification and Reconstruction of a Small Leak Zone in a Pipe by a Spectral Element Method*, Journal of Scientific Computing, Volume 27, NUM. 1-3, June, 2006.
- [B5] I. Bell, *Is Virtual Instrumentation an option or a need?*, <http://www.eetasia.com/ARTICLES/>, July, 2005.
- [B6] J.S. Bendat, A.G. Pirsol, *Measurement and Analysis of Random data*, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1966.
- [B7] J.S. Bendat, A.G. Pirsol, *Engineering applications of correlation and spectral analysis*, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 1980.
- [B8] L. L. Beranek, I. L. Vér, *Noise and Vibration Control Engineering – Principles and Applications*, Wiley-Interscience Publication, 1992.
- [B9] J.F. Böhme, *Time Delay Estimation by Cross-covariance Maximization of Quadrature Sampled Narrowband Signals*, AEU - International Journal of Electronics and Communications, Volume 58, Issue 1, Pp. 13-20, 2004.
- [B10] A. Boyd, *The leak detectors [water supply]*, Process Engineering, Pp.17-18, January, 2006.
- [B11] A. Bratek, M. Słowikowski, M. Turkowski, *The improvement of pipeline mathematical model for the purposes of leak detection*, Recent Advances in Mechatronics, Springer Berlin Heidelberg, September, 2007.
- [B12] M.J. Brennan, Y. Gao, P.F. Joseph, *On the relationship between time and frequency domain methods in time delay estimation for leak detection in water distribution pipes*, Journal of Sound and Vibration, Volume 304, Issue 1-2, Pp.213-223, July, 2007.
- [B13] J. Brewer, J. Seckel, *PCI Express Technology- Dell Technology White Paper*, © Dell Inc, February, 2004.

- [B14] P. M. T. Broersen, H.E. Wensink, *Autoregressive Model Order Selection By a Finite Sample Estimator for the Kullback-Leibler Discrepancy*, IEEE Transactions on Signal Processing, Volume46, Num. 7, July, 1998.
- [B15] P. M. T. Broersen, H.E. Wensink, *Order Selection for Vector Autoregressive Models*, IEEE Transactions on Signal Processing, Volume51, Num. 2, February, 2003.
- [B16] P. M. T. Broersen, *Automatic Spectral Analysis With Time Series Models*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Volume51, Num. 2, April, 2002.
- [C1] F.M. Cady, *Microcontrollers and Microcomputers – Principles of software and hardware engineering*, Oxford University Press Inc., 1997.
- [C2] J. Carr, *Instrumentation-Tessella Support*, <http://www.tessella.com>, Issue V1.R1.M1, April, 2003.
- [C3] A. Carrillo, E. Gonzalez, A. Rosas, A. Marquez, *New distributed optical sensor for detection and localization of liquid leaks: Part I. Experimental studies*, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 99, Issue 3, Pp. 229-235, June, 2002.
- [C4] F. Casella, L. Bascetta, C. Maffezzoni, G. Bodini, *Leak location in water distribution networks based on dynamic tests and parametric identification*, European Control Conference ECC 2003, Pp. 228-233, Cambridge, UK, September, 2003.
- [C5] F. Cau, A. Fanni, A. Montisci, P. Testoni, M. Usai, *A signal-processing tool for non-destructive testing of inaccessible pipes*, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 19, Issue 7, Pp. 753-760, October, 2006.
- [C6] Y. Wook Choo, T. H. Abdoun, M.J. O'Rourke, D. Ha, *Remediation for buried pipeline systems under permanent ground deformation*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 27, Issue 12, Pp. 1043-1055, December, 2007.
- [C7] C.L. Clark, *Labview. Digital Signal Processing and Digital Communications*, McGraw-Hill, July, 2005.
- [C8] G.Crouch, *Virtual Instrumentation – PC Based Test*, April, 1995.
- [D1] P. Davis, S. Burn, M. Moglia, S. Gould, *A physical probabilistic model to predict failure rates in buried PVC pipelines*, Reliability Engineering & System Safety, Volume 92, Issue 9, Pp. 1258-1266, September, 2007.
- [D2] R. Diversi, R. Guidorzi, *Fast filtering of noisy autoregressive signals*, Signal Processing, Volume 87, Issue 11, Pp. 2843-2849, November, 2007.
- [D3] G. Drăgănescu, *Vibrații și zgomote*, Editura "Politehnica", Timișoara, 2000.
- [E1] N. Elkmann, B. Reimann, E. Schulenburg, H. Althoff, *Automated Inspection System for Large Underground Concrete Pipes Under Operating Conditions*, Springer Tracts in Advanced Robotics, Volume 25, 2006.
- [E2] C. Elliott, V. Vijayakumar, W. Zink, R. Hansen, *National Instruments LabVIEW: A Programming Environment for Laboratory Automation and Measurement*, Journal of the Association for Laboratory Automation, Volume 12, Issue 1, Pp. 17-24, February, 2007.
- [F1] G. Faraco, L. Gabriele, *Using LabVIEW for applying mathematical models in representing phenomena*, Computers & Education, Volume 49, Issue 3, Pp. 856-872, November, 2000.
- [F2] J. Feng, H. Zhang, *Algorithm of Pipeline Leak Detection Based on Discrete Incremental Clustering Method*, Computational Intelligence, Springer Berlin Heidelberg, September, 2006.

- [F3] M. Ferrante, B. Brunone, *Pipe System Diagnosis and leak detection by unsteady-state tests.1.Harmonic analysis*, Advances in Water Resources, Volume 26, Issue 1, Pp.95-105, January, 2003.
- [F4] T. Fountain, *History of instrumentation*, Instrumentation Reference Book (Third Edition), Pp. 802-860, 2003.
- [G1] Y.Gao, M.J. Brennan, P.F. Joseph, *A Comparison of Time Delay Estimators for the Detection of leak noise signals in plastic water distribution pipes*, Journal of Sound and Vibration, Volume 292, Issues 3-5, Pp.552-570, May, 2006.
- [G2] Y.Gao, M.J. Brennan, P.F. Joseph, *Detecting leaks in buried plastic pipes using correlation techniques: Part 1. A model of the correlation function of leak noise*, 8th International Congress on Acoustics, Pp.4, Kyoto, Japan, April, 2004.
- [G3] Y. Gao, M.J. Brennan, P.F. Joseph, Hunaidi O., *A model of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes*, Journal of Sound and Vibration, Volume 277, Pp.133-148, October, 2004.
- [G4] G. Geiger, T. Werner, D. Matko, *Leak Detection and Locating – A Survey*, University of Applied Sciences Gelsenkirchen, Faculty of Electrical Engineering
- [G5] G. Geiger, W. Gregoritzka, D. Matko, *Leak detection and localisation in pipes and pipelines*, Computer Aided Chemical Engineering, Volume 8, Pp. 781-786, 2000.
- [G6] S. Gokhale , J.A. Graham, *A new development in locating leaks in sanitary sewers*, Tunnelling and Underground Space Technology, August, 2003.
- [G7] R.B. Govindan, J. Raethjen, F. Kopper, J.C. Claussen, G. Deuschl, *Estimation of time delay by coherence analysis*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Volume 350, Issues 2-4, Pp. 277-295, May, 2005.
- [G8] \*\*\*Gutermann , *Introduction to Correlation*, <http://www.gutermann-uk.com/index.php>
- [H1] D. Hartley, *Managing Water Resources*, Acoustic Technology for the Water Industry, Gutermann, May, 2007.
- [H2] T. Heinbokel, R. H. Kluwe, *Attributes of the interface affect fault detection and fault diagnosis in supervisory control*, Human error and system design and management, Springer Berlin Heidelberg, Volume253, 2000.
- [H3] G. Hessel, W. Schmitt, F.P. Weiss, *A Neural-Network Approach For Acoustic Leak Monitoring in Pressurized Plants with Complicated Topologies*, Control Eng. Practice, Volume 4, Num. 9, Pp. 1271-1276, 1996.
- [H4] Shih-Chu Huang, Wu-Wen Lin, Meng-Tsan Tsai, Mao-Hsiung Chen, *Fiber Optic in-line distributed Sensors for Detection and Localization of the Pipeline Leaks*, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 135, Issue 2, Pp.570-579, April, 2007.
- [H5] S.C. Huang, W.W. Lin, M.T. Tsai, M.H. Chen, *Fiber optic in-line distributed sensor for detection and localization of the pipeline leaks*, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 135, Issue 2, Pp. 570-579, April, 2007.
- [H6] O. Hunaidi, *Detecting Leaks in Water Distribution Pipes* , Published By The Institute for Research in Constructions, Construction Technology Update, Num. 40, 2000.
- [H7] O. Hunaidi, W. Chu, A. Wang, W. Guan, *Detecting Leaks in Plastic Pipes* , AWWA Journal, Volume 92., Num. 2, Pp. 82-94, February, 2000.

- [H8] O. Hunaidi, Wing T. Chu, *Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes*, Applied Acoustics, Volume 58, Issue 3, Pp.235-254, November, 1999.
- [I1] A. Ignea, D. Stoiciu, *Măsurări electronice, senzori și traductoare*, Editura Politehnica, Timișoara, 2003.
- [I2] **R. Ionel**, M. Popa, *Internet and LAN Connected Embedded Virtual Instrumentation*, The 7<sup>th</sup> International Conference on Technical Informatics, CONTI 2006, Timișoara, 2006.
- [I3] **R. Ionel**, *Parametric Spectral Analysis of Signals generated by leaks in water pipes*, Doctor ETC 2007 Conference, Timișoara, 2007.
- [I4] **R. Ionel**, V. Tiponuț, S. Ionel, I. Lie, *On Settling Time in Electrical Circuits with Deterministic and Random Inputs*, WSEAS Crete Conference, Greece, 2008.
- [I5] **R. Ionel**, A. Ignea, *Automatic Selection of a Suitable Coherence Frequency Domain*, Doctor ETC Conference, Timișoara, 2008.
- [I6] **R. Ionel**, *Analiza Spectrală Automată a Semnalelor Generate de Surse de Zgomot, Referat în cadrul programului de doctorat, Universitatea "Politehnica" Timișoara, Iulie 2006.*
- [I7] **R. Ionel**, *Îmbunătățirea preciziei de localizare a surselor de zgomot folosind filtre de albire, Referat în cadrul programului de doctorat, Universitatea "Politehnica" Timișoara, Februarie 2007.*
- [I8] **R. Ionel**, *Instrumentația Virtuală. Stadiul actual și perspective., Referat în cadrul programului de doctorat, Universitatea "Politehnica" Timișoara, Februarie 2006.*
- [I9] S. Ionel, C. Gavrilăscu, *Cercetări experimentale privind localizarea surselor de zgomot cu aplicații în monitorizarea și diagnosticul tehnic al sistemelor*, Raport de cercetare la tema CNCUSU 1270 din contractul 7004/1997.
- [I10] S. Ionel, *Estimare Spectrală cu Experimente în MATLAB*, Editura "Politehnica", Timișoara, 2005.
- [I11] S. Ionel, J. Hoffman, *Ermittlung von Laufzeitdifferenzen – Problemlösung durch Simulation*, Horizonte 20, Iulie, 2002.
- [I12] S. Ionel, *Contribuții la analiza de corelație a proceselor electrice nestacionare*, I.P. Timișoara, 1987.
- [I13] S. Ionel, V. Tiponut, C. Căleanu, I. Lie, *A Unified Treatment of Deterministic and Random Transients in Electrical Circuits*, WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Issue 3, Volume 7, March 2008, pp.87-95.
- [I14] J. Izquierdo, P.A. López, F.J. Martínez, R. Pérez, *Fault detection in water supply systems using hybrid (theory and data-driven) modeling*, Mathematical and Computer Modelling, Volume 46, Issues 3-4, Pp. 341-350, August, 2007.
- [I15] **R. Ionel**, S. Ionel, *Pipeline identification in a TDOA experiment*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" Timișoara, Seria Electronică și Telecomunicații, Tom 53(67), Fascicola 1-2, Timișoara, 2008.
- [I16] I. Ionel, **R. Ionel**, D. Nicolae, C. Goleșteanu, S. Ionel, *Statistical tools in the analysis of pollutant concentrations measured with optoelectronic instruments*, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, JOAM, Brașov, 2008, în curs de publicare.
- [J1] K. Jackson, *C programming for Electronic engineers*, Macmillan Press, London, 1995.
- [J2] J. Jayapandian, Usharani Ravi, R. Mallika, O.K. Sheela, B. Purniah, *Virtual instrument based PC parallel LPT port compatible port compatible*

- temperature controller*, National Symposium on Instrumentation, India, 2003.
- [J3] J. Jiao, R. Fei, C. He, B. Wu, *Modal analysis of acoustic leak signal in pipelines using time-frequency analysis*, *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, Volume 1, NUM. 2, June, 2006.
- [J4] F.J. Jiménez, J. De Frutos, *Virtual instrument for measurement, processing data, and visualization of vibration patterns of piezoelectric devices*, *Computer Standards & Interfaces*, Volume 27, Issue 6, Pp. 653-663, June, 2005.
- [J5] Y. Jin, Li Ping, Wen Yu-mei, Zheng Min, *Adaptive leak detection and location instrument system for distribution water pipelines*, *Instrument Techniques and Sensor*, Editorial Board of the Instrument Technique and Sensor, Pp. 14-22, 2005.
- [J6] T. Jurcă, *Componente structurale ale instrumentației de precizie*, Editura Politehnica, Timișoara, 1998.
- [K1] J. Karki, *Signal Conditioning Piezoelectric Sensors*, Texas Instruments, Application Report, September, 2000.
- [K2] N. Kehtarnavaz, N. Kim, *LabVIEW Programming Environment*, *Digital Signal Processing System-Level Design Using LabVIEW*, Pp. 5-14, 2005.
- [K3] B.C. Kirkwood, *Acoustic Source Localization Using Time-Delay Estimation*, M.Sc. Thesis, Technical University of Denmark, 2003.
- [K4] M. Krauss, E. G. Woschni, *Messinformationssysteme. Kennfunktionen – Guetekriterien - Optimierung*, VEB Verlag Technik, Berlin, 1972.
- [L1] S. G. Lambrakos, N. E. Tran, N. Lagakos, P. P. Trzaskoma-Paulette, *Inverse analysis of surface degradation using optical fibers*, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 15, Num. 4, August, 2006.
- [L2] B. M. Lapshin, A. L. Ovchinnikov, *A Cospectral Method for Leak Detection in One-Way Access Pipelines*, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Volume 40, NUM. 9, September, 2004
- [L3] R. Long, M. Lowe, P. Cawley, *Attenuation characteristics of the fundamental modes that propagate in buried iron water pipes*, *Ultrasonics*, Volume 41, Issue 7, Pp. 509-519, September, 2003.
- [L4] R. Lyons, *Understanding Digital Signal Processing, Second Edition*, Prentice Hall, <http://safari.oreilly.com/0131089897>, March, 2004.
- [M1] R. Mamlook, O. Al-Jayyousi, *Fuzzy sets analysis for leak detection in infrastructure systems: a proposed methodology*, *Clean Technologies and Environmental Policy*, Volume 6, NUM. 1, December, 2003.
- [M2] P. Marino, J. Nogueira, H. Hernandez, *Electronics Laboratory Practices Based on Virtual Instrumentation*, <http://fie.engmg.pitt.edu/fie99/papers/1080.pdf>, ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, Puerto Rico, 1999.
- [M3] J. Márkus, I. Kollár, *Standard Environment for the Sine Wave Test of ADC's*, Special Issue on ADC Modeling and Testing of Measurement Journal, January, 2001.
- [M4] \*\*\* MathWorks Inc®, *Thames Water Aims to Reduce Leaks By More Than 25% Using A MATLAB-Based Leak-Location System*.
- [M5] \*\*\* MathWorks Inc®, *MATLAB The Language of Technical Computing*, Copyright The MathWorks Inc., 1999.
- [M6] D. Matko, Geiger G., Atanasijevic-Kunc M., *State-space representation of pipelines*, *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*, Volume1, NUM.6, Pp. 663-670, June, 2006.

- [M7] E.W. McAllister, *Pipeline Rules of Thumb Handbook*, Elsevier Inc., U.S.A., 2005.
- [M8] E. McConnell, *The Future of Virtual Instrumentation*, Sensors Magazine OnLine – National Instruments, July, 1997.
- [M9] R. C. McMaster, "Nondestructive Testing Handbook – Volume I, Leak Testing", 2<sup>nd</sup> Edition, American Society for Nondestructive Testing, American Society for Metals, 1982.
- [M10] D.B. McNeil, Morrison T., *Facility integrity - A management perspective*, Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, IPC, Volume 2, Proceedings of the ASME International Pipeline Conference 2006, IPC 2006, Pp. 351-358, 2006.
- [M11] R. K. Miller, A. A. Pollock, D. J. Watts, J. M. Carlyle, A. NUM. Tafuri, J. J. Yezzi Jr, *A Reference Standard for the Development of acoustic emission pipeline Leak Detection Techniques*, NDT & E. International, Volume 32, Issue 1, Pp.1-8, January, 1999.
- [M12] R. C. Mobley, *An Introduction to Preventive Maintenance*, Materials & Mechanical, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2002.
- [M13] J.M. Muggleton, M. J. Brennan, *Leak Noise Propagation and Attenuation in Submerged Plastic Water Pipes*, Journal of Sound and Vibration, Volume 278, Issues 3, Pp.527-537, December, 2004.
- [M14] J.M. Muggleton, M.J. Brennan, *The design and instrumentation of an experimental rig to investigate acoustic methods for the detection and location of underground piping systems*, Applied Acoustics, In Press Corrected Proof, November, 2007.
- [M15] J.M. Muggleton, M.J. Brennan, R.J. Pinnington, Y. Gao, *A novel sensor for measuring the acoustic pressure in buried plastic water pipes*, Journal of Sound and Vibration, Volume 295, Issues 3-5, Pp. 1085-1098, August, 2006.
- [M16] J.M. Muggleton, M.J. Brennan, *Axisymmetric wave propagation in buried, fluid-filled pipes: effects of wall discontinuities*, Journal of Sound and Vibration, Volume 281, Issues 3-5, Pp. 849-867, March, 2005.
- [M17] J. M. Muggleton, M. J. Brennan, P. W. Linford, *Axisymmetric wave propagation in fluid-filled pipes: wavenumber measurements in in vacuo and buried pipes*, Journal of Sound and Vibration, Volume 270, Issues 1-2, Pp. 171-190, February, 2004.
- [M18] J. M. Muggleton, M. J. Brennan, R. J. Pinnington, *Wavenumber prediction of waves in buried pipes for water leak detection*, Journal of Sound and Vibration, Volume 249, Issue 5, Pp. 939-954, January, 2002.
- [M19] W.K. Muhlebauer, *Pipeline Risk Management. Ideas, Techniques and Resources*, Elsevier, USA, 2004.
- [M20] G.R. Murtagian, D.H. Johnson, H.A. Ernst, *Dynamic crack propagation in steel line pipes. Part I: Experimental investigation*, Engineering Fracture Mechanics, Volume 72, Issue 16, Pp. 2519-2534, November, 2005.
- [M21] G.R. Murtagian, D.H. Johnson, H.A. Ernst, *Dynamic crack propagation in steel line pipes. Part II: Theoretical developments*, Engineering Fracture Mechanics, Volume 72, Issue 16, Pp. 2535-2548, November, 2005.
- [N1] \*\*\* <http://www.nusinc.com/downloads/2006WaterSurvey.pdf>
- [N2] \*\*\* <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/201880>
- [N3] \*\*\* <http://www.sebakmt.com/Correlux-P-200.344+M5ab988697c2.0.html>



- [O1] Ž. Obrenovic, D. Starcevic, E. Jovanov, *Virtual Instrumentation*, Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering, <http://homepages.cwi.nl/~obrenovi/>, 2004.
- [O2] I.V. Orynyak, *Leak and break models of ductile fracture of pressurized pipe with axial defects*, Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, IPC, v 3 PART A, Proceedings of the ASME International Pipeline Conference 2006, IPC 2006, Pp. 41-56, 2007.
- [P1] A. Papoulis, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, McGraw-Hill, Inc., New York, 1991.
- [P2] G. D. Parman, K. McCoy, *High sensitivity external leak detection for liquid fuel pipelines*, Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, IPC, Volume 3, Pp. 2225-2231, 2004.
- [P3] R. Pecen, D. Salim, A. Zora, *A LabView Based Instrumentation System for a Wind-Solar Hybrid Power Station*, Journal of Industrial Technology, Volume 20, Number 3, June – August, 2004.
- [P4] R. Pilcher, S. Hamilton, H. Chapman, D. Field, B. Ristovski, S. Stapely, *Leak Location & Repair Guidance Notes*, International Water Association, Version 1, March, 2007.
- [P5] M. Popa, **R. Ionel**, V. Groza, M. Marcu, *Educational Virtual Instrumentation Application for System Identification*, IMTC 2006 Instrumentation and Measurement Technology Conference, Pp. 842-846, Sorrento, Italy, 2006.
- [P6] J. Pretorius, M.C. Van Schoor, G.J. Muller, A.W. Jessiman, *Piezoelectric structural acoustic leak detection for pressurized pipelines*, Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, Volume 5762, Number 1, 2005.
- [P7] J. G. Proakis, D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing. Principles, Algorithms and Applications*, 4<sup>th</sup> Edition, Pearson Education Inc., Prentice Hall, USA, New Jersey, 2007.
- [P8] T. Proietti, *Signal extraction and filtering by linear semiparametric methods*, Computational Statistics & Data Analysis, Volume 52, Issue 2, Pp. 935-958, October, 2007.
- [R1] G. Raether, *Virtual Instrumentation-Keeping up with technology*, <http://www.scientific-computing.com/scwnovdec02virtualinstrumentatioNum.html>, 2002.
- [R2] G. Rizzoni, *Principles and Applications of Electrical Engineering*, McGraw-Hill Companies, Inc., Boston, 2004.
- [R3] T.M. Romberg, J.L.Black, T.J.Ledwidge, *Signal Processing for Industrial Diagnostic*, John Wiley & Sons, England, 1996.
- [R4] A.Y. Rozinov, O.V. Yarygin, *Detection of Microscopic Penetrating Flaws in Structures by Localization of Acoustic Fields Generated by Air Flows*, Russian Journal of Nondestructive Testing, Volume 40, NUM. 6, June, 2004.
- [S1] R. Sadiq, B. Rajani, Y. Kleiner, *Probabilistic risk analysis of corrosion associated failures in cast iron water mains*, Reliability Engineering & System Safety, Volume 86, Issue 1, Pp .1-10, October, 2004.
- [S2] C. Scheffer, P. Girdhar, *Practical Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance*, Elsevier, UK, 2004.
- [S3] A. Schlögl, *A comparison of multivariate autoregressive estimators*, Signal Processing, Volume 86, Issue 9, Pp. 2426-2429, September, 2006.
- [S4] \*\*\* <http://www.sebakmt.com/Unternehmen.6+M5ab988697c2.0.html>
- [S5] S. Shaltaf, *Neuro-fuzzy based time-delay estimation using DCT coefficients*, ISA Transactions, Volume 46, Issue 1, Pp. 21-30, February, 2007.

- [S6] K. Kumar Sharma, S.D. Joshi, *Time delay estimation using fractional Fourier transform*, Signal Processing, Volume 87, Issue 5, Pp. 853-865, May, 2007.
- [S7] R. Shiavi, *Random signals, linear systems, and power spectra*, Introduction to Applied Statistical Signal Analysis (Third Edition), Pp.201-228, 2007.
- [S8] S. B. Shimanskii, B. P. Strelkov, A. NUM. Anan'ev, A. M. Lyubishkin, T. Iijima, H. Mochizuki, Y. Kasai, K. Yokota, J. Kanazawa, *Acoustic method of leak detection using high-temperature microphones*, Atomic Energy, Volume 98, NUM. 2, February, 2005.
- [S9] A. Skullestad, *Improved instrument accuracy using active vibration damping*, Mechatronics, Volume 13, Issue 5, Pp. 451-464, June, 2003.
- [S10] V. Smiesko, K. Kovac, *Virtual Instrumentation and distributed measurement systems*, Journal of Electrical Engineering, Vol. 55, Num. 1-2, Pp. 50-56, 2004.
- [S11] J.O. Smith III, *Mathematics of the Discrete Fourier Transform with Music and Audio Applications*, W3K Publishing, USA, 2003.
- [S12] S. Sokhanvar, J. Dargahi, M. Packirisamy, *Influence of friction on piezoelectric sensors*, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 141, Issue 1, Pp. 120-128, January, 2008.
- [S13] S.D. Stearns, R.A. David, *Signal Processing Algorithms in Matlab*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1996.
- [S14] M. Stettler, L. Day, J. Power, *PC Based Instrumentation. Current Efforts and future technology*, <http://icalepcs2003.postech.ac.kr/Proceedings/PAPERS/ICALEPCS2003>, Gyeongju, Korea, 2003.
- [S15] \*\*\* <http://www.sydneywater.com.au/>
- [S16] S. W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing, San Diego, 1999.
- [T1] M. Taghvaei, Beck, S.B.M., Staszewski, W.J., *Leak detection in pipelines using cepstrum analysis*, Measurement Science and Technology, Volume 17, NUM. 2, Pp. 367-372, February, 2006.
- [T2] Y. Takahashi, *Evaluation of leak-before-break assessment methodology for pipes with a circumferential through-wall crack. Part I: stress intensity factor and limit load solutions*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 79, Issue 6, Pp. 385-392, June, 2002.
- [T3] Y. Takahashi, *Evaluation of leak-before-break assessment methodology for pipes with a circumferential through-wall crack. Part II: J-integral estimation*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 79, Issue 6, Pp. 393-402, June, 2002.
- [T4] Y. Takahashi, *Evaluation of leak-before-break assessment methodology for pipes with a circumferential through-wall crack. Part III: estimation of crack opening area*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 79, Issue 6, Pp. 525-536, June, 2002.
- [T5] A. H. Taner, J. E. Brignell, *Virtual instrumentation and intelligent sensors*, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 61, Issues 1-3, Pp. 427-430, June, 1997.
- [T6] R. Tezner, *Model-based Pipeline Leak Detection and Localization*, 3<sup>rd</sup> International Heft, July, 2003.
- [T7] M. Thompson, D. J. Allwright, *Noise Generation by Water Pipe Leaks*, Mecon Ltd., <http://www.smithinst.ac.uk/Projects/ESGI40/ESGI40-Mecon/Report>, 2003.
- [T8] L. Toma, *Metode și Algoritmi de Estimare Spectrală*, Editura "Politehnica", Timișoara, 2000.

- [T9] M. Tooley, *PC-based Instrumentation and control*, Newnes, Oxford, 1993.
- [T10] F. Torán, D. Ramirez, A. E. Navarro, S. Casans, J. Pelegri, J. M. Espi, *Design of a virtual instrument for water quality monitoring across the Internet*, Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 76, Issues 1-3, Pp. 281-285, June, 2001.
- [T11] J. Truchard, *The future of virtual instrumentation*, <http://www.scientific-computing.com/>, August, 2005.
- [T12] O. A. Tumshis, L. V. Yakyavichyus, *System for detection of the location of leaks in gas pipelines of low pressure*, Measurement Techniques, Volume 41, Num. 5, May, 1998.
- [T13] A.L. Turk, S.T. Probst, G.J. Powers, *Verification of a chemical process leak test procedure*, Computer Aided Verification, Springer Berlin Heidelberg, April, 2006.
- [T14] A.C. Twort, D.D. Ratnayaka, M.J. Brandt, *Pipeline and distribution system design and analysis*, Water Supply (Fifth Edition), Pp. 613-637, 2000.
- [V1] C. Verde, *Accommodation of Multi-Leak Location in Pipeline*, Controls Engineering Practice, Volume 13, Issues 8, Pp.1071-1078, August, 2005.
- [W1] J. G. Webster, R. Pallas-Areny, *Sensors and Signal Conditioning*, 2<sup>nd</sup> Edition, Wiley-Interscience Publication, 2000.
- [W2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Water\\_supply\\_and\\_sanitation\\_in\\_the\\_United\\_Kingdom](http://en.wikipedia.org/wiki/Water_supply_and_sanitation_in_the_United_Kingdom)
- [W3] L. Wei, W. Yumei, *Time delay estimation based on cross-power spectrum for water pipeline leakage locating*, Journal of Scientific Instrument, Pp. 504-509, March, 2007.
- [W4] G. Wilkowski, S. Rahman, D. Paul, T. Ghadiali, *Pipe fracture evaluations for leak-rate detection: Deterministic models*, American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division, Volume 266, Pp. 243-254, 1993.
- [Y1] H. Yang, H.Ye, G. Wang, G. Hu, *Application of correlation dimension in leak identification of transport pipelines*, Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes 2006, Pp. 998-1002, 2007.
- [Z1] Y.M. Zhan, A.K.S. Jardine, *Adaptive autoregressive modeling of non-stationary vibration signals under distinct gear states. Part 1: modeling*, Journal of Sound and Vibration, Volume 286, Issue 3, Pp. 429-450, September, 2005.
- [Z2] Y.M. Zhan, A.K.S. Jardine, *Adaptive autoregressive modeling of non-stationary vibration signals under distinct gear states. Part 2: experimental analysis*, Journal of Sound and Vibration, Volume 286, Issue 3, Pp. 451-476, September, 2005
- [Z3] L. Zhang, Xiaolin Wu, *On the application of cross correlation function to subsample discrete time delay estimation*, Digital Signal Processing, Volume 16, Issue 6, Pp. 682-694, November, 2006.

## ANEXE

### Programe reprezentative implementate în LabVIEW 8.5

**Stationarizeaza.vi** – este un sub-instrument care implementează problema staționarității. În cadrul acestui sub-instrument se apelează sub-sub-instrumentul **Coefficienti\_Stationaritate.vi**, acesta făcând parte din algoritmul de staționarizare.

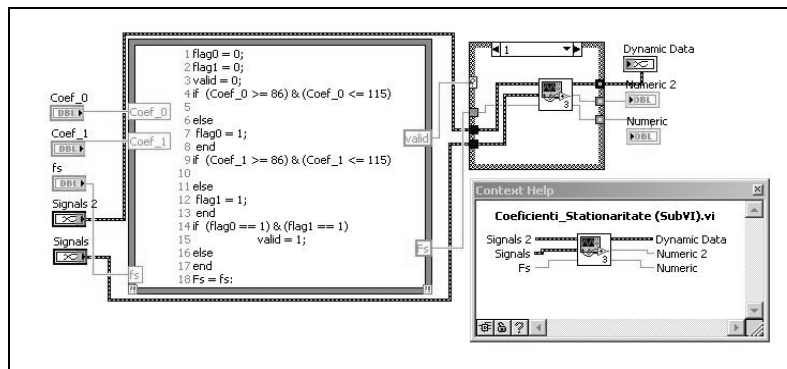


Fig.A1.1. Stationarizeaza.vi – diagrama bloc

**Albirea.vi** – este un sub-instrument care implementează algoritmul albirii. În implementare se folosește cod scris în nodul *Mathscript* dar și parametri numerici care sunt furnizați automat de alte programe care rulează în cadrul aplicației pentru localizare.

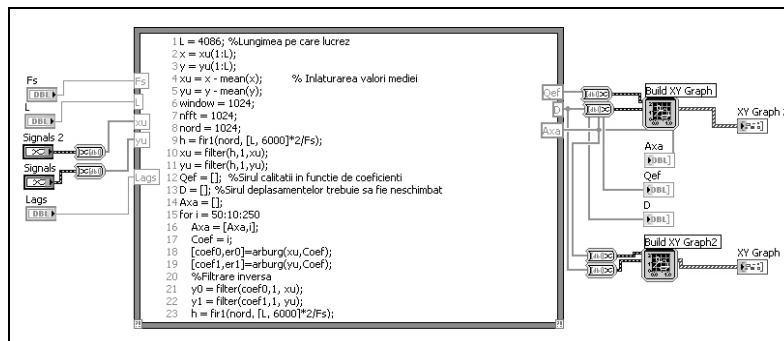


Fig.A1.2. Albirea.vi – diagrama bloc

**Calcul\_FIC.vi** – este un sub-instrument care implementează calculul funcției de intercorelație respectând parametrul *Lags* setat pentru această aplicație la 500.

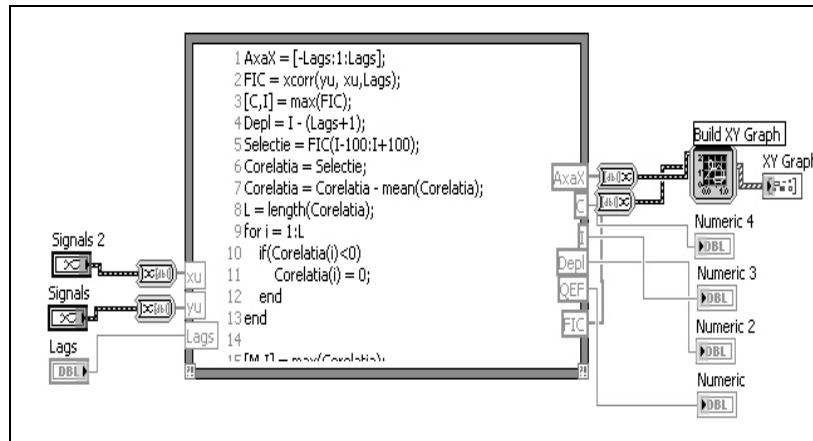


Fig.A1.3. Calcul\_FIC.vi – diagrama bloc

**Filtreaza\_Coerenta.vi** – este un sub-instrument care implementează analiza automată pe două intervale de frecvențe (cele mai potrivite).

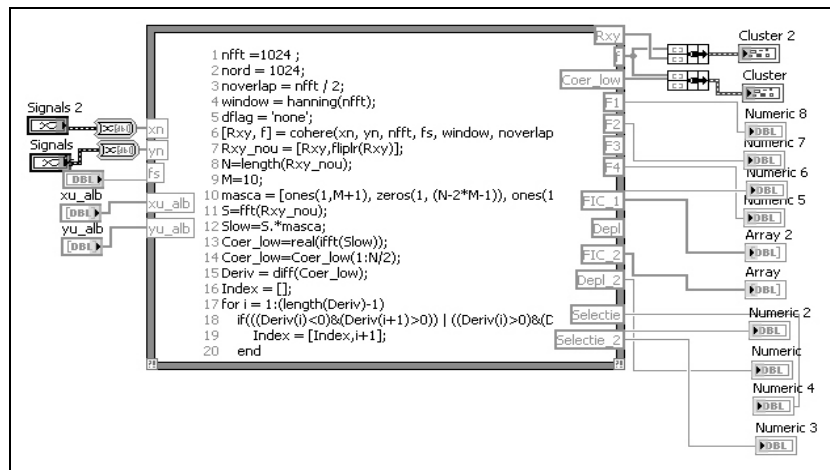


Fig.A1.4. Filtreaza\_Coerenta.vi – diagrama bloc

**Analiza\_Spectrala.vi** – este un sub-instrument care implementează analiza semnalelor în domeniul frecvențe, determinând repartizarea frecvențelor în banda indicată.

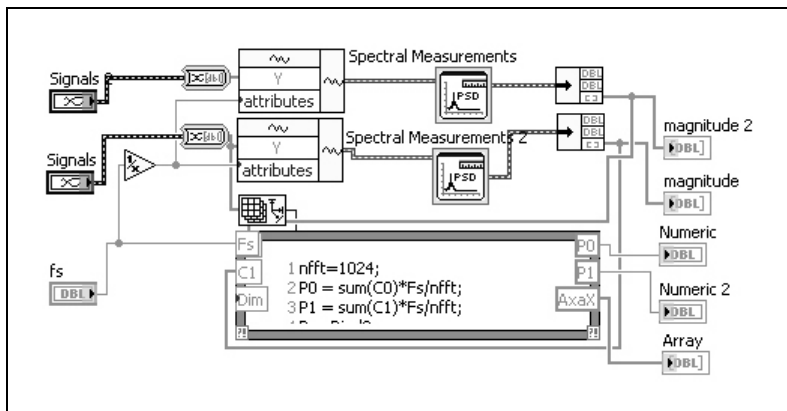


Fig.A1.5. Analiza\_Spectrala.vi – diagrama bloc

**CSD\_Faza.vi** – este un sub-instrument care implementează analiza evoluției pantei fazei densității spectrale de putere mutuală.

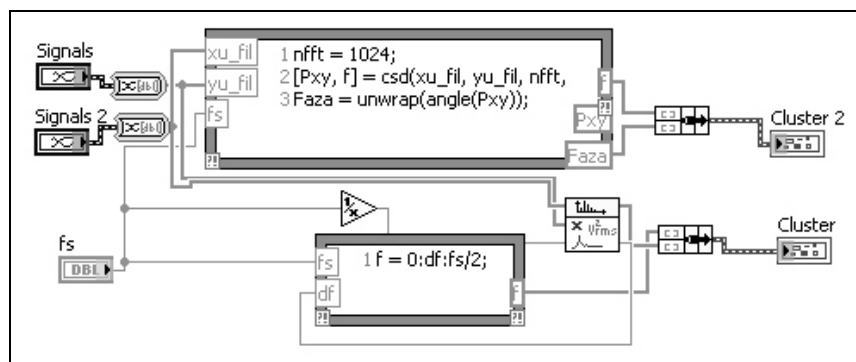


Fig.A1.6. CSD\_Faza.vi – diagrama bloc

Alte instrumente virtuale reprezentative implementate sunt:

**Filtrare\_Semnale.vi, Calcul\_Coerenta.vi, Achizitie.vi, Limitare\_Semnale.vi, Prelucrare\_Semnale.vi, Vizualizare\_Continua.vi, Test\_Achizitie.vi, Testare\_Albire.vi, Test\_Putere.vi, FIR.vi, Detectie\_Surse.vi, Analiza\_Extinsa.vi, Alege\_Coeficienti.vi.**

### Programe reprezentative implementate în MATLAB 7.5

```

Plot_Filter.m – problema stationaritatii
%Stabilirea limitei de filtrare inferioara,
%astfel incat coeficientul de stationaritate
%sa se incadreze in intervalul [86-115]
%se lucreaza pe 16384 esantioane
clear %incarcare semnale
L = 16384; %Lungimea pe care lucrez este cea totala
%-----Utilizare semnale achizitionate cu placa
x = load('sem0_.lvm');
y = load('sem1_.lvm');
%x = semnal_0; y = semnal_1;
x = x(1:L);
y = y(1:L);
nx = length(x);
xu = x - mean(x);      % Inlaturarea valori mediei
yu = y - mean(y);
fs = 15000;           % Frecventa de esantionare
Ts = 1/fs;
%Afisez semnalele intregi
figure(1); clf; set(gcf,'Color',[1,1,1]);
subplot(211);
plot(xu,'-b');grid on;
title('Semnal Senzor 0');
xlabel('Esantioane'); ylabel('Amplitudine [V]');
axis tight
subplot(212);
plot(yu,'-r');grid on;
title('Semnal Senzor 1');
xlabel('Esantioane'); ylabel('Amplitudine [V]');
axis tight
% ----- Spectrul PSD al semnalelor initiale, nefiltrate
window = 1024;
nfft = 1024;
[Pxx0, f] = pwelch(xu, window, [], nfft, fs);
[Pxx1, f] = pwelch(yu, window, [], nfft, fs);
figure(2); clf;set(gcf,'Color',[1,1,1]);
subplot(211), plot(f, Pxx0);
title('Spectrul semnalului pentru Senzorul 0');
xlabel('Frecventa [Hz]'); ylabel('Watt/Hz');grid on;
axis tight;
subplot(212), plot(f, Pxx1, '-r');
title('Spectrul semnalului pentru Senzorul 1');
xlabel('Frecventa [Hz]'); ylabel('Watt/Hz');grid on;
axis tight;
%Calculul Inainte de a aplica Filtrarea pentru eliminarea componentelor modale
%Acestea vor fi primele valori din tabel
%Aplic testul pentru semnalele initiale
nord = 1024;
h = fir1(nord, [1, 6000]*2/fs);
xu = filter(h,1,xu);

```

```

yu = filter(h,1,yu);
[Coef_0, Coef_1] = Coeficient_Stationaritate(xu,yu);
Coeficient_0=['Coeficientul de stationaritate 0 brut: ',...
    num2str(Coef_0),'.']
Coeficient_1=['Coeficientul de stationaritate 1 brut: ',...
    num2str(Coef_1),'.']
%Filtrarea succesiva
Limite = [];
Coeficienti_0 = [];
Coeficienti_1 = [];
Maxim = 100; %[Hz]
for Limita = 1:1:Maxim %Pana la Maxim [Hz]
    h = fir1(nord, [Limita, 6000]*2/fs);
    xu_fil = filter(h,1,xu);
    yu_fil = filter(h,1,yu);
    [Coef_0_fil, Coef_1_fil] = Coeficient_Stationaritate(xu_fil,yu_fil);
    % Coeficient_0_fil=['Coeficientul de stationaritate 0 dupa filtrare: ',...
    %num2str(Coef_0_fil),'.']
    % Coeficient_1_fil=['Coeficientul de stationaritate 1 dupa filtrare: ',...
    %num2str(Coef_1_fil),'.']
    % Limita_filtrare = ['Limita inferioara de filtrare: ',...
    %num2str(Limita),'.Hz.'];
    Coeficienti_0 = [Coeficienti_0,Coef_0_fil];
    Coeficienti_1 = [Coeficienti_1,Coef_1_fil];
    Limite = [Limite,Limita];
end
[Lim0, Lim1] = Detecteaza_Limita(Coeficienti_0,Coeficienti_1,Limite, Maxim);
Lim_0=['Limita inferioara de filtrare 0: ',...
    num2str(Lim0),' [Hz].']
Lim_1=['Limita inferioara de filtrare 1: : ',...
    num2str(Lim1),' [Hz].']
%---Filtrez semnalele initiale in functie de cele 2 limite gasite
%---Aleg limita minima intre cele doua, pentru a prinde cat mai multe
%---frecvente care sa se coreleze
Inf = min(Lim0,Lim1);
h = fir1(nord, [Inf, 6000]*2/fs);
xu_fil_final = filter(h,1,xu);
yu_fil_final = filter(h,1,yu);
[Coef_0_fil_final, Coef_1_fil_final] = Coeficient_Stationaritate(xu_fil_final,yu_fil_final);
Coeficient_0_filtrat=['Coeficientul de stationaritate 0 dupa filtrare: ',...
    num2str(Coef_0_fil_final),'.']
Coeficient_1_filtrat=['Coeficientul de stationaritate 1 dupa filtrare: ',...
    num2str(Coef_1_fil_final),'.']
%-----
%Studiul Stationaritatii de medie pentru semnale.
%Se vor imparti semnalele in 255 de segmente, fiecare cu 64 esantioane
%Axa mediilor
Med0=[]; Med1=[];
Med0_dupa=[]; Med1_dupa=[];
Secvente = 255;
Esantioane = 64;
AxaX = [1:1:Secvente]; AxaX = AxaX';

```



```

%Secventele de Medii simple pentru Fiecare canal
for i = 1:Esantioane:Secvente*Esantioane
    Secv0 = xu(i:i+Esantioane);%Se iau secvente de cate 64 esantioane din semnal
    Secv1 = yu(i:i+Esantioane);
    media0 = mean(Secv0);%Se calculeaza mean pentru secventa formata
    media1 = mean(Secv1);
    Med0 = [Med0,media0];%Valoarea mean, se adauga in sirul de medii
    Med1 = [Med1,media1];
    Secv0_dupa = xu_fil_final(i:i+Esantioane);%Se iau secvente de cate 64 esantioane din semnal
    Secv1_dupa = yu_fil_final(i:i+Esantioane);
    media0_d = mean(Secv0_dupa);%Se calculeaza mean pentru secventa formata
    media1_d = mean(Secv1_dupa);
    Med0_dupa = [Med0_dupa,media0_d];%Valoarea mean, se adauga in sirul de medii
    Med1_dupa = [Med1_dupa,media1_d];
end
X = [ones(size(AxaX)) AxaX AxaX.^2];
T = (0:1:Secvente)';
Med0 = Med0'; Med0_dupa = Med0_dupa';
a1 = X\Med0; a2 = X\Med0_dupa;
Y1 = [ones(size(T)) T T.^2]*a1; Y2 = [ones(size(T)) T T.^2]*a2;
Med1 = Med1'; Med1_dupa = Med1_dupa';
a3 = X\Med1; a4 = X\Med1_dupa;
Y3 = [ones(size(T)) T T.^2]*a3; Y4 = [ones(size(T)) T T.^2]*a4;
figure(3);clf;
set(gcf,'Color',[1,1,1]);
plot(T,Y1,'b--',AxaX,Med0,'bo'); hold on;grid on;
plot(T,Y2,'r--',AxaX,Med0_dupa,'ro'); hold on;grid on;
title('Stationaritatea de medie pentru Canalul 0');
xlabel('Numar Segment'); ylabel('Valoarea medie pentru segment');
legend('Curba de regresie pentru mediile semnalului initial','Valori medii initiale',...
'Curba de regresie pentru mediile semnalului stationar','Valori medii stationare',4);
axis tight
figure(4);clf;
set(gcf,'Color',[1,1,1]);
plot(T,Y3,'b--',AxaX,Med1,'bo'); hold on;grid on;
plot(T,Y4,'r--',AxaX,Med1_dupa,'ro'); hold on;grid on;
title('Stationaritatea de medie pentru Canalul 1');
xlabel('Numar Segment'); ylabel('Valoarea medie pentru segment');
legend('Curba de regresie pentru mediile semnalului initial','Valori medii initiale',...
'Curba de regresie pentru mediile semnalului stationar','Valori medii stationare',4);
axis tight
axaYminConstanta = zeros(1,Maxim+1);axaYminConstanta = axaYminConstanta + 86;
axaYmaxConstanta = zeros(1,Maxim+1);axaYmaxConstanta = axaYmaxConstanta + 115;
AxaX = [1:1:Maxim]; AxaX = AxaX';
X = [ones(size(AxaX)) AxaX AxaX.^2];
T = (0:1:Maxim)';
Coeficienti_0 = Coeficienti_0'; Coeficienti_1 = Coeficienti_1';
a1 = X\Coeficienti_0; a3 = X\Coeficienti_1;
Y1 = [ones(size(T)) T T.^2]*a1; Y3 = [ones(size(T)) T T.^2]*a3;
figure(5);clf;
set(gcf,'Color',[1,1,1]);
hline1 = line(T,axaYminConstanta,'LineWidth',2,'Color',[0 0 0], 'LineStyle','--');

```

```

hline2 = line(T,axaYmaxConstanta,'LineWidth',2,'Color',[0 0 0], 'LineStyle','--');
hline3 = line(T,Y1,'LineWidth',1,'Color',[0 0 1], 'LineStyle','-');
hline4 = line(AxaX,Coeficienti_0,'LineWidth',1,'Color',[0 0 1], 'LineStyle','o');
hline5 = line(T,Y3,'LineWidth',1,'Color',[1 0 0], 'LineStyle','-');
hline6 = line(AxaX,Coeficienti_1,'LineWidth',1,'Color',[1 0 0], 'LineStyle','o');
grid on;axis tight
title('Evolutia coeficientilor de Stationaritate');
xlabel('Limita de filtrare [Hz]'); ylabel('Valoare Coeficient');
legend('Limita inferioara stationaritate','Limita superioara stationaritate',...
'Curba de regresie pentru Coeficientul 0','Valori Coeficient 0',...
'Curba de regresie pentru Coeficientul 1','Valori Coeficient 1',4);
set(gca,'Children',[hline1 hline2 hline3 hline4 hline5 hline6]);

```

**Test\_Delay.m** – lucreaza cu semnale simulate sau reale. Arata corelatie, albire, faza.

```

%-----SEMNALE SIMULATE-----
%Lungimea semnalului 16384
%Fs = 1000;
%Ts = 1/Fs;
%t = 0:Ts:16.383;
%R = randn(1,16300); %Generez un sir aleator din care lipsesc 16 esantioane.
%xu = [zeros(1,74),R,zeros(1,10)]; %La senzorul 0 ajunge mai greu
%yu = [zeros(1,10),R,zeros(1,74)]; %Senzorul 1 este mai apropiat de fisura
%Afisez semnalele
figure(1); clf; set(gcf,'Color',[1,1,1]);
subplot(211);
plot(t,xu,'-b');grid on;
title('Semnal Senzor 0');
xlabel('Esantioane'); ylabel('Amplitudine [V]');
axis tight
subplot(212);
plot(t,yu,'-r');grid on;
title('Semnal Senzor 1');
xlabel('Esantioane'); ylabel('Amplitudine [V]');
axis tight
set(gcf,'Color',[1,1,1]);
Lags = 500;
AxaX = [-Lags:1:Lags];
FIC = xcorr(xu, yu,Lags);
[C,I] = max(FIC);
Depl = I - (Lags+1);
%Calcul al coeficientului de calitate
Selectie = FIC(I-100:I+100);
Q = Calcul_Calitate_FIC(Selectie);
Calitatea_FIC=['Coeficientul de calitate al FIC: ',...
num2str(Q),'.']
Deplasament_FIC=['Deplasamentul FIC: ',...
num2str(Depl),' esantioane.'];
Sir1 = [zeros(1,I-1),ones(1,1),zeros(1,(2*Lags-I+1))];
Sir2 = 1.-Sir1;
FIC1 = FIC.*Sir1;
FIC2 = FIC.*Sir2;
figure(2); clf;

```

```

set(gcf,'Color',[1,1,1]);
plot(AxaX,FIC1,'r');grid on; hold on;
plot(AxaX,FIC2);
axis([-Lags Lags 0 C]);
title ('Functia de intercorelatie');
xlabel('Deplasamentul maximului fata de origine');
ylabel('Valoare FIC');
window = 1024;
nfft = 1024;
[Pxx0, f] = pwelch(xu, window, [], nfft, Fs);
[Pxx1, f] = pwelch(yu, window, [], nfft, Fs);
figure(3);clf;set(gcf,'Color',[1,1,1]);
subplot(211), plot(f, Pxx0);
title('Spectrul semnalului pentru Senzorul 0');
xlabel('Frecventa [Hz]'); ylabel('Watt/Hz');grid on;
axis tight;
subplot(212), plot(f, Pxx1,'-r');
title('Spectrul semnalului pentru Senzorul 1');
xlabel('Frecventa [Hz]'); ylabel('Watt/Hz');grid on;
axis tight;
%----- Cross Spectral Density
[Pxy, f] = cpsd(xu,yu,window,[],nfft,Fs);
%----- Auto Spectral Density
%Pxx = Pxx0 ;
%Pyy = Pxx1;
figure(4);clf;set(gcf,'Color',[1,1,1]);
plot(f, abs(Pxy));
title('CSD');
xlabel('Frecventa [Hz]'); ylabel('Watt/Hz');grid on;
axis tight;
Faza = unwrap(angle(Pxy));
figure(5);clf;set(gcf,'Color',[1,1,1]);
plot(f,Faza);
title('CSD - Faza (Panta negativa inseamna o intarziere pozitiva)');
xlabel('Frecventa [Hz]'); ylabel('Faza [Rad]');grid on;
axis tight;
Test_Delay_Albire(xu,yu);

%Functie apelata de Test_Delay.m
function Test_Delay_Albire(x0,x1,Fs)
t = cputime;
Coef = 150; %coeficienti de albire
%[coef0,er0]=aryule(x0,Coef);
%[coef1,er1]=aryule(x1,Coef);
[coef0,er0]=arburg(x0,Coef);
[coef1,er1]=arburg(x1,Coef);
%[coef0,er0]=armcov(x0,Coef);
%[coef1,er1]=armcov(x1,Coef);
%Filtrare inversa
y0 = filter(coef0,1, x0);
y1 = filter(coef1,1, x1);
%Dupa albire semnalele trebuie filtrate pentru a elimina

```

```
%partile albite dar care initial erau filtrate
nord = 1024;
h = fir1(nord, [20, 6000]*2/Fs);
y0 = filter(h,1,y0);
y1 = filter(h,1,y1);
e = cputime-t
% ----- Caracteristica de frecventa a filtrului AR si a celui invers
% pentru Canalul 0
[H0d, w] = freqz(1,y0);      % AR-Proces
[H0i, w] = freqz(y0,1);     % Filtrul invers
set(gcf,'Color',[1,1,1]);
figure(5), clf;
set(gcf,'Color',[1,1,1]);
subplot(221), plot(w/(2*pi), 20*log10(abs(H0d)));
title('Caracteristica de frecventa a procesului AR0');
grid on, xlabel('Frecventa relativa');
La = axis; axis([0, 0.5, La(3:4)]);
set(gcf,'Color',[1,1,1]);
subplot(222), plot(w/(2*pi), 20*log10(abs(H0i)));
title('Caracteristica de frecventa a filtrului AR0 invers ');
grid on, xlabel('Frecventa relativa');
La = axis; axis([0, 0.5, La(3:4)]);
subplot(212), stem(0:Coef, coef0);
title('Raspunsul la impuls al filtrului invers');
grid;
% pentru Canalul 1
[H1d, w] = freqz(1,y1);      % AR-Proces
[H1i, w] = freqz(y1,1);     % Filtrul invers
set(gcf,'Color',[1,1,1]);
figure(6), clf;
set(gcf,'Color',[1,1,1]);
subplot(221), plot(w/(2*pi), 20*log10(abs(H1d)));
title('Caracteristica de frecventa a procesului AR1');
grid on, xlabel('Frecventa relativa');
La = axis; axis([0, 0.5, La(3:4)]);
set(gcf,'Color',[1,1,1]);
subplot(222), plot(w/(2*pi), 20*log10(abs(H1i)));
title('Caracteristica de frecventa a filtrului AR1 invers ');
grid on, xlabel('Frecventa relativa');
La = axis; axis([0, 0.5, La(3:4)]);
subplot(212), stem(0:Coef, coef1);
title('Raspunsul la impuls al filtrului invers');
grid;
set(gcf,'Color',[1,1,1]);
Lags = 500;
AxaX = [-Lags:1:Lags];
FIC = xcorr(y0, y1,Lags);
[C,I] = max(FIC);
Depl = I - (Lags+1);
%Calcul al coeficientului de calitate
Selectie = FIC(I-100:I+100);
Q = Calcul_Calitate_FIC(Selectie);
```

```

Calitatea_FIC=['Coeficientul de calitate al FIC albata: ',...
    num2str(Q),'.' ]
Deplasament_FIC=['Deplasamentul FIC albata: ',...
    num2str(Depl),' esantioane. ']
Sir1 = [zeros(1,I-1),ones(1,1),zeros(1,(2*Lags-I+1))];
Sir2 = 1.-Sir1;
FIC1 = FIC.*Sir1;
FIC2 = FIC.*Sir2;
figure(7); clf;
set(gcf,'Color',[1,1,1]);
plot(AxaX,FIC1,'r');grid on; hold on;
plot(AxaX,FIC2);
axis([-Lags Lags 0 C]);
title ('Functia de intercorelatie albata');
xlabel('Deplasamentul maximului fata de origine');
ylabel('Valoare FIC');
window = 1024;
nfft = 1024;
[Pxx0_a, f] = pwelch(y0, window, [], nfft, Fs);
[Pxx1_a, f] = pwelch(y1, window, [], nfft, Fs);
figure(8);clf;set(gcf,'Color',[1,1,1]);
subplot(211), plot(f, Pxx0_a);
title('Densitatea Spectrala Welch pentru Semnalul 0 [W/Hz]');
xlabel('Frecventa [Hz]'); ylabel('Putere [W]');grid on;
axis tight;
subplot(212), plot(f, Pxx1_a,'-r');
title('Densitatea Spectrala Welch pentru Semnalul 1 [W/Hz]');
xlabel('Frecventa [Hz]'); ylabel('Putere [W]');grid on;
axis tight;
CorrCoef_Clasic = corrcoef(x0,x1)
CorrCoef_Albit = corrcoef(y0,y1)
e = cputime-t;
Timp_Executie=['--->',...
    num2str(e),' secunde. ']
Final=['-----']

```

**Afiseaza\_CSD\_Faza.m** - Calculeaza panta fazei, pentru a vedea care este semnalul mai apropiat de fisura.

%Calculul Fazei rezultate din Cross Spectral Density ne poate spune daca intarzierea semnalelor %este pozitiva sau negativa.

%Practic ne poate spune care este semnalul mai apropiat de fisura.

clear %incarcare semnale

L = 131072; %Lungimea pe care lucrez

%-----Utilizare semnale achizitionate cu placa

x = load('sem0\_\_1.lvm');

y = load('sem1\_\_1.lvm');

x = x(1:L);

y = y(1:L);

nx = length(x);

xu = detrend(x); % Inlaturarea valori mediei

yu = detrend(y);

fs = 15000; % Frecventa de esantionare

```
Ts = 1/fs;
% Afisez semnalele
figure(1); clf; set(gcf,'Color',[1,1,1]);
subplot(211);
plot(xu,'-b');grid on;
title('Semnal Senzor 0');
xlabel('Esantioane'); ylabel('Amplitudine [V]');
axis tight
subplot(212);
plot(yu,'-r');grid on;
title('Semnal Senzor 1');
xlabel('Esantioane'); ylabel('Amplitudine [V]');
axis tight
% ----- Filtrarea Semnalelor pentru eliminarea
componentelor modale
nord = 1024;
window = 1024;
nfft = 1024;
h = fir1(nord, [20, 6000]*2/fs);
xu_fil = filter(h,1,xu);
yu_fil = filter(h,1,yu);
[Pxx0_fil, f] = pwelch(xu_fil, window, [], nfft, fs);
[Pxx1_fil, f] = pwelch(yu_fil, window, [], nfft, fs);
figure(2);clf;set(gcf,'Color',[1,1,1]);
subplot(211), plot(f, Pxx0_fil);
title('Spectrul semnalului filtrat pentru Senzorul 0');
xlabel('Frecventa [Hz]'); ylabel('Watt/Hz');grid on;
axis tight;
subplot(212), plot(f, Pxx1_fil,'-r');
title('Spectrul semnalului filtrat pentru Senzorul 1');
xlabel('Frecventa [Hz]'); ylabel('Watt/Hz');grid on;
axis tight;
%----- Cross Spectral Density
[Pxy, f] = cpsd(xu_fil,yu_fil>window,[],nfft,fs);
figure(3);clf;set(gcf,'Color',[1,1,1]);
plot(f, abs(Pxy));
title('CSD');
xlabel('Frecventa [Hz]'); ylabel('Watt/Hz');grid on;
axis tight;
Faza = unwrap(angle(Pxy));
figure(4);clf;set(gcf,'Color',[1,1,1]);
plot(f,Faza);
title('CSD - Faza (Panta negativa inseamna o intarziere pozitiva)');
xlabel('Frecventa [Hz]'); ylabel('Faza [Rad]');grid on;
axis tight;

Principiul_Majoritatii.m – problema stationaritatii
% Se incarca cele doua semnale masurate
clear
L = 51200; %Lungimea pe care lucrez
%-----Utilizare semnale achizitionate cu placa
x = load('sem0_.lvm');
```

```

y = load('sem1_.lvm'); semnal_0 = x(1:L); semnal_1 = y(1:L);
%-----Albirea
Coef = 200; %coeficienti de albire
%[coef0,er0]=aryule(x0,Coef); %[coef1,er1]=aryule(x1,Coef);
[coef0,er0]=arburg(semnal_0,Coef);[coef1,er1]=arburg(semnal_1,Coef);
%[coef0,er0]=armcov(x0,Coef); %[coef1,er1]=armcov(x1,Coef);
%Filtrare inversa
y0 = filter(coef0,1, x0);
y1 = filter(coef1,1, x1);
%Dupa albire semnalele trebuie filtrate pentru a elimina
%partile albite dar care initial erau filtrate
nord = 1024;
h = fir1(nord, [10, 6000]*2/Fs);
y0 = filter(h,1,y0);
y1 = filter(h,1,y1);
semnal_0 = y0;
semnal_1 = y1;
% Functia se calculeaza pe acest interval, Del (intarziere)
Lags = 500;
AxaX = [-Lags:1:Lags];
Q = []; I = [];
Segment = 512;
Nr_Segm = fix(length(semnal_0)/Segment);
for k=1:Nr_Segm
    semn_0=semnal_0((k-1)*Segment+1:k*Segment);
    semn_1=semnal_1((k-1)*Segment+1:k*Segment);
    FIC = xcov(semn_0,semn_1,Lags);
    [C,Imax] = max(FIC);
    Depl = Imax - (Lags+1);
%Calcul al coeficientului de calitate
    Selectie = FIC(Imax-100:Imax+100);
    Qmax = Calcul_Calitate_FIC(Selectie);
    Q = [Q,Qmax];
    I = [I,Depl];
end
figure(1);clf;set(gcf,'Color',[1,1,1]);
subplot(211);
stem(I);
title('Deplasamente si Factori de Calitate pentru o serie de masurari');
ylabel('Indice Deplasament'); grid;
xlabel('Numarul de ordine al Masurarii');
subplot(212)
stem(Q); ylabel('Factor de Calitate'); grid;
xlabel('Numarul de ordine al Masurarii');
axis tight;
figure(2);clf;set(gcf,'Color',[1,1,1]);
subplot(211);
hist(I,100);grid;
title('Histogramele Deplasamentelor si Factorilor de Calitate');
xlabel('Valoare Deplasament');
ylabel('Numar Aparitii');
subplot(212)

```

```
hist(Q,100);grid;
xlabel('Valoare Calitate');
ylabel('Numar Aparitii');
axis tight;
[n,xout] = hist(I,100);
[Val_Ref,Depl_Ref] = max(n);
Depl_Ref = round(xout(Depl_Ref));
Numar_Repetari=['Numarul maxim de repetari pentru acelasi Deplasament: ',...
    num2str(Val_Ref),'.']
Deplasament_Majoritar=['Deplasamentul care apare cu precadere: ',...
    num2str(Depl_Ref),'.']
Procent = (Val_Ref/100)*100;
Probabilitate = ['Probabilitatea determinarii corecte [1/1]: ',...
    num2str(Procent),'%.']
%2/3
Inou = [];
for m=1:98
    Segment = I(m:m+2);
    Valoare = Calculeaza_Valoare(Segment,Depl_Ref,2);
    Inou(m) = Valoare;
end
figure(3);clf;set(gcf,'Color',[1,1,1]);
subplot(211);
stem(Inou);
title('Deplasamente si Histograma pentru o serie de masurari - probabilitate 2/3');
ylabel('Indice Deplasament'); grid;
xlabel('Numarul de ordine al Masurarii');
subplot(212)
hist(Inou,100);grid;
xlabel('Valoare Deplasament');
ylabel('Numar Aparitii');
[n,xout] = hist(Inou,100);
[Val_Ref,Depl_Ref] = max(n);
Depl_Ref = round(xout(Depl_Ref));
Numar_Repetari=['Numarul maxim de repetari pentru acelasi Deplasament: ',...
    num2str(Val_Ref),'.']
Deplasament_Majoritar=['Deplasamentul care apare cu precadere: ',...
    num2str(Depl_Ref),'.']
Procent = (Val_Ref/98)*100;
Probabilitate = ['Probabilitatea determinarii corecte [2/3]: ',...
    num2str(Procent),'%.']
%3/5
Inou = [];
for m=1:96
    Segment = I(m:m+4);
    Valoare = Calculeaza_Valoare(Segment,Depl_Ref,3);
    Inou(m) = Valoare;
end
figure(4);clf;set(gcf,'Color',[1,1,1]);
subplot(211);
stem(Inou);
title('Deplasamente si Histograma pentru o serie de masurari - probabilitate 3/5');
```



```

ylabel('Indice Deplasament'); grid;
xlabel('Numarul de ordine al Masurarii');
subplot(212)
hist(Inou,100);grid;
xlabel('Valoare Deplasament');
ylabel('Numar Aparitii');
[n,xout] = hist(Inou,100);
[Val_Ref,Depl_Ref] = max(n);
Depl_Ref = round(xout(Depl_Ref));
Numar_Repetari=['Numarul maxim de repetari pentru acelasi Deplasament: ',...
    num2str(Val_Ref),'.']
Deplasament_Majoritar=['Deplasamentul care apare cu precadere: ',...
    num2str(Depl_Ref),'.']
Procent = (Val_Ref/96)*100;
Probabilitate = ['Probabilitatea determinarii corecte [3/5]: ',...
    num2str(Procent),'%.']
%4/7
Inou = [];
for m=1:94
    Segment = I(m:m+6);
    Valoare = Calculeaza_Valoare(Segment,Depl_Ref,4);
    Inou(m) = Valoare;
end
figure(5);clf;set(gcf,'Color',[1,1,1]); subplot(211);
stem(Inou); title('Deplasamente si Histograma pentru o serie de masurari - probabilitate 4/7');
ylabel('Indice Deplasament'); grid; xlabel('Numarul de ordine al Masurarii');
subplot(212) hist(Inou,100);grid;
xlabel('Valoare Deplasament');
ylabel('Numar Aparitii');
[n,xout] = hist(Inou,100);
[Val_Ref,Depl_Ref] = max(n);
Depl_Ref = round(xout(Depl_Ref));
Numar_Repetari=['Numarul maxim de repetari pentru acelasi Deplasament: ',...
    num2str(Val_Ref),'.']
Deplasament_Majoritar=['Deplasamentul care apare cu precadere: ',...
    num2str(Depl_Ref),'.']
Procent = (Val_Ref/94)*100; Probabilitate = ['Probabilitatea determinarii corecte [4/7]: ',...
    num2str(Procent),'%.']
%5/9
Inou = [];
for m=1:92
    Segment = I(m:m+8);
    Valoare = Calculeaza_Valoare(Segment,Depl_Ref,5);
    Inou(m) = Valoare;
end
figure(6);clf;set(gcf,'Color',[1,1,1]);subplot(211);
stem(Inou);
title('Deplasamente si Histograma pentru o serie de masurari - probabilitate 5/9');
ylabel('Indice Deplasament'); grid;
xlabel('Numarul de ordine al Masurarii');
subplot(212)
hist(Inou,100);grid;

```

```
xlabel('Valoare Deplasament');
ylabel('Numar Aparitii');
[n,xout] = hist(Inou,100);
[Val_Ref,Depl_Ref] = max(n);
Depl_Ref = round(xout(Depl_Ref));
Numar_Repetari=['Numarul maxim de repetari pentru acelasi Deplasament: ',...
    num2str(Val_Ref),'.']
Deplasament_Majoritar=['Deplasamentul care apare cu precadere: ',...
    num2str(Depl_Ref),'.']
Procent = (Val_Ref/92)*100;
Probabilitate = ['Probabilitatea determinarii corecte [5/9]: ',...
    num2str(Procent),'%.']
['-----FINAL-----']
```

Alte programe și funcții reprezentative implementate sunt:

**Afisare\_Semnale** – afisare semnale, brute, asa cum au fost ele preluate

**Afisare\_PSD** – afiseaza continutul de frecvente si calculeaza puterea medie totala.

**Afiseaza\_FIC** – afiseaza FIC fara modificari, in forma bruta.

**Afiseaza\_Deplasamente** – calculeaza deplasamente ale FIC pe segmente de 512 esantioane, apoi calculeaza deplasamentul pentru FIC pentru intreg semnalul.

**Calcul\_Putere** - Calcul putere totala, dupa ajustarea amplificarii.

**Afiseaza\_Intervale** - Calculeaza Functia de coerenta si stabileste intervalele pe care semnalele ar trebui filtrate.

### Imagini reprezentative din timpul experimentelor



Fig.A3.1. Conectarea instalației la rețeaua de alimentare cu apă



Fig.A3.2. Conexiune din instalație care poate fi considerată o sursă nedorită de zgomote



Fig.A3.3. Obturarea unui capăt al instalației experimentale



Fig.A3.4. Vedere de ansamblu a conductei utilizate