

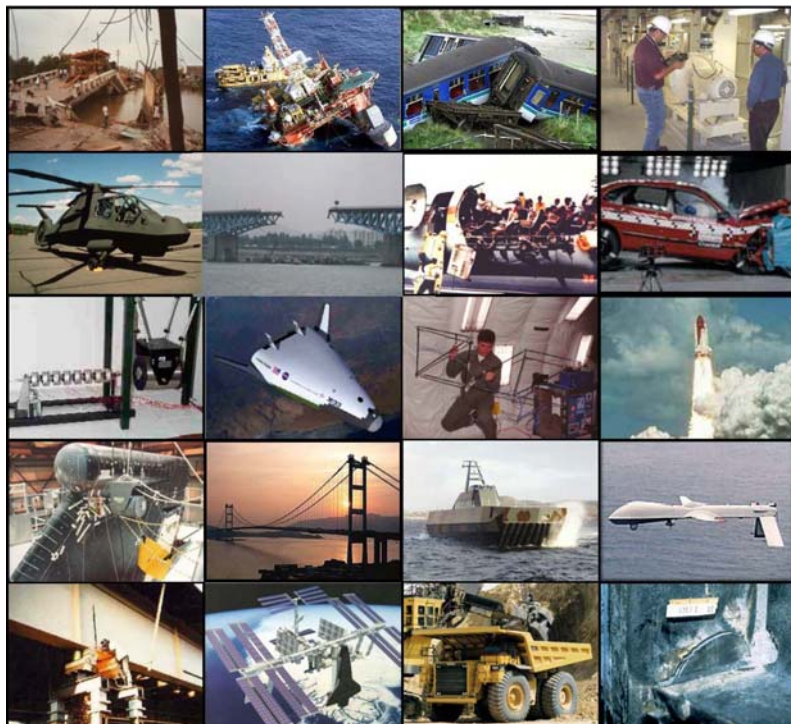


Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου
Εργαστήριο Δυναμικής & Κατασκευών

“Εφαρμογή Νοημόνων Μεθόδων Επεξεργασίας Δυναμικών Σημάτων στη Διάγνωση Βλαβών Μηχανολογικού Εξοπλισμού”

Διδακτορική Διατριβή

Γρύλλιας Χ. Κωνσταντίνος





Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου
Εργαστήριο Δυναμικής & Κατασκευών

**“Εφαρμογή Νοημόνων Μεθόδων Επεξεργασίας Δυναμικών Σημάτων στη
Διάγνωση Βλαβών Μηχανολογικού Εξοπλισμού”**

Διδακτορική Διατριβή

Γρύλλιας Χ. Κωνσταντίνος

Εξεταστική Επιτροπή:

Αναπληρωτής Καθηγητής	Ιωάννης Αντωνιάδης	(Επιβλέπων)
Επίκουρος Καθηγητής	Στέφανος Διπλάρης	
	Καθηγητής Νικόλαος Κρικέλης	
Αναπληρωτής Καθηγητής	Θεόδωρος Κωστόπουλος	
Καθηγητής	Κωνσταντίνος Κυριακόπουλος	(Μέλος Συμβουλευτικής Επιτροπής)
Καθηγητής	Κωνσταντίνος Παπαδημητρίου	
Καθηγητής	Χριστόφορος Προβατίδης	(Μέλος Συμβουλευτικής Επιτροπής)

*“Entia non sunt multiplicanda
praeter necessitatem”*

William of Occam



Αυτορυθμιζόμενος Ένσφαιρος Τριβέας

Sven Wingquist (Swedish, 1876-1953)

1907. Επιχρωμιωμένος Χάλυβας, 1 3/4 x 8 1/2" (4.4 x 21.6cm). Κατασκευασμένος από την S.K.F. Industries, Inc., Hartford, CT.

The Museum of Modern Art, *MoMA*, New York

Τόσο αποτελεσματικός όσο και ευχάριστος στο μάτι, ο ένσφαιρος τριβέας (ball bearing) μπορεί να θεωρηθεί ως έμβλημα της Εποχής της Μηχανής - ένας όρος που χρησιμοποιείται συχνά για τον καθορισμό της δεκαετίας του 1920 και του 1930, όταν οι βιομηχανικοί σχεδιαστές, καθώς και οι καταναλωτές ανέπτυξαν ένα νέο ενδιαφέρον για την εμφάνιση και το στυλ των εμπορικών προϊόντων. Ακόμη και τα μέρη των μηχανών θα μπορούσαν να εκτιμηθούν για την ομορφιά τους, που προέρχεται από την καθαρότητα της αφηρημένης γεωμετρίας. Ο καλός σχεδιασμός κρίθηκε από τους Μοντερνιστές ως απαραίτητος για την ανύψωση της κοινωνίας, και το 1934, αυτός ο ένσφαιρος τριβέας ήταν από τα πρώτα έργα που εισήλθαν στη συλλογή σχεδιασμού του Μουσείου Μοντέρνας Τέχνης της Νέας Υόρκης.

Περίληψη Διδακτορικής Διατριβής

Αρχικά μελετάται η αποδιαμόρφωση δυναμικών σημάτων με χρήση δύο προσεγγίσεων, με στόχο την αυτοματοποιημένη εξαγωγή διαγνωστικής πληροφορίας. Η πρώτη προσέγγιση βασίζεται στον Μη Γραμμικό Διαφορικό Ενεργειακό Τελεστή Teager-Kaiser και χρησιμοποιείται ο Αλγόριθμος Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή (Energy Operator Separation Algorithm - EOSA). Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται στη χρήση μετατοπισμένων μιγαδικών κυματιδίων Morlet. Για την αυτόματη και βέλτιστη επιλογή των δύο κυματιδιακών παραμέτρων έχουν προταθεί μια σειρά από μεθοδολογίες και κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά ελέγχονται συστηματικά και συγκρίνονται μεταξύ τους. Προτείνεται ένα νέο κριτήριο για την ταυτόχρονη βέλτιστη επιλογή των κρίσιμων παραμέτρων προσφέροντας δυνατότητες για αυτοματοποίηση της διαδικασίας υπολογισμού της περιβάλλουσας καθώς και εγκυρότερο και ασφαλέστερο εντοπισμό της ζώνης αποδιαμόρφωσης.

Στη συνέχεια επιχειρείται ο εντοπισμός ρωγμών σε κατασκευές δοκών με συνδυασμό των μεθόδων Αποσύνθεσης Ορθοκανονικών Προβολών και Μορφολογικής Επεξεργασίας. Οι τέσσερις βασικοί μορφολογικοί τελεστές συγκρίνονται, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους δομικών στοιχείων. Ο τελεστής της διάβρωσης (erosion) με ένα καμπύλο (spline) δομικό στοιχείο φαίνεται να παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα. Η απόδοση της μεθόδου εκτιμάται σε διαφορετικές κατασκευές δοκών που παρουσιάζουν μια “αναπνέουσα” ρωγή, αναφορικά με διάφορους παράγοντες, όπως οι οριακές συνθήκες, η θέση της ρωγμής, το βάθος της ρωγμής, η ύπαρξη πολλαπλών ρωγμών, η απόσταση μεταξύ των πολλαπλών ρωγμών, το επίπεδο του θορύβου κατά την μέτρηση και η χωρική ευκρίνεια των μετρούμενων σημείων.

Επιπλέον προτείνεται Αυτόματο Σύστημα Διάγνωσης Βλαβών Ένσφαιρων Τριβέων με χρήση της μεθόδου Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης (Support Vector Machines). Η Αυτόματη Διάγνωση Βλαβών μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικά τμήματα, στην εισαγωγή-προεπεξεργασία των σημάτων και στην μέθοδο ταξινόμησης. Προτείνεται ένας υβριδικός αλγόριθμος που βασίζεται σε ένα Στοχαστικό Μοντέλο Προσομοίωσης Δυναμικής Απόκρισης Ένσφαιρων Τριβέων, στην στρατηγική Ένας-Εναντίον-Όλων (One-Against-All) και στην χρησιμοποίηση της μεθόδου Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης SVM. Τα προσομοιωμένα σήματα παράγονται από ένα καλά καθορισμένο μοντέλο που περιγράφει την δυναμική απόκριση φθαρμένων ένσφαιρων τριβέων. Εξετάζονται χαρακτηριστικά που μπορούν να εξαχθούν από τα φάσματα τόσο των αρχικών σημάτων όσο και της περιβάλλουσάς τους και αποτελούν περιγραφικούς δείκτες της μεταβολής της Κατάστασης Λειτουργίας της Μηχανής. Ως κύριο μέτρο-χαρακτηριστικό λαμβάνεται ο υπολογισμός της ενέργειας που κατανέμεται και αναπτύσσεται σε προσεκτικά, ορθά και αυστηρά καθορισμένες ζώνες συχνότητας, που μπορούν να καθοριστούν με βάση την καλή κατανόηση της φύσης του φαινομένου εμφάνισης της βλάβης από την σκοπιά ενός μηχανικού. Ο πετυχημένος ορισμός των συχνοτικών αυτών ζωνών μπορεί να οδηγήσει σε

ακριβέστερη, πιο αξιόπιστη και αυτοματοποιημένη παρακολούθηση της κατάστασης λειτουργίας περιστρεφόμενου εξοπλισμού και στην έγκυρη και έγκαιρη διάγνωση βλαβών. Παράλληλα για να ξεπεραστεί η αλλοίωση του φάσματος συχνοτήτων λόγω εμφάνισης μεταβατικών φαινομένων προτείνεται η χρήση Ανάλυσης Τάξης (Order Analysis).

Οι προτεινόμενες μέθοδοι αξιολογούνται με εφαρμογή τους σε προσομοιωμένα και πραγματικά σήματα. Τα πραγματικά σήματα προέρχονται από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις και από διεθνείς βάσεις δεδομένων που περιλαμβάνουν μετρήσεις σε πειραματικές διατάξεις.

Ευχαριστίες

Στο τέλος μιας προσπάθειας πολλών ετών νιώθω την ειλικρινή ανάγκη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους εκείνους που με τον ένα ή τον άλλο τρόπο συνεισέφεραν στην προσπάθεια αυτή.

Κατ' αρχήν στον επιβλέποντα μου Αναπληρωτή Καθηγητή Ιωάννη Αντωνιάδη για την αμέριστη και ουσιαστική συμπαράσταση του σε όλη την διάρκεια αυτής της προσπάθειας από το ξεκίνημα της ως και την τελευταία πραγματικά ώρα της. Τον ευχαριστώ ειλικρινά γιατί στάθηκε δίπλα μου ως άριστος επιβλέπων αλλά και ως άνθρωπος και δάσκαλος.

Επίσης ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άλλα δυο μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, τους Καθηγητές Κωνσταντίνο Κυριακόπουλο και Χριστόφορο Προβατίδη για τις πολύτιμες συμβουλές, την ενθάρρυνση και την καθοδήγηση τους κατά την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Καθηγητές Νικόλαο Κρικέλη και Κωνσταντίνο Παπαδημητρίου, τον Αναπληρωτή Καθηγητή Θεόδωρο Κωστόπουλο και τον Επίκουρο Καθηγητή Στέφανο Διπλάρη για την συμμετοχή τους στην επταμελή εξεταστική επιτροπή.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το προσωπικό της Ελληνικής Βιομηχανίας Αλουμινίου Α.Ε. και ιδιαίτερα τον Στέργιο Γαρουφαλή και τον Μανώλη Αεράκη για τις συμβουλές και την βοήθεια τους.

Ξεχωριστά θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συνάδελφους του εργαστηρίου με τους οποίους συγκατοίκησα για πολύ καιρό, τους διδάκτορες Χρήστο Γιακόπουλο και Γεώργιο Γλωσσιώτη και τον υποψήφιο διδάκτορα Φώτη Παπασπυρίδη. Στην κοινή μας πορεία στάθηκαν πάντα καλοί φίλοι και αρωγοί.

Οφείλω να εκφράσω τις ολόθερμες ευχαριστίες μου και την ευγνωμοσύνη μου για όλα όσα πολύτιμα μου έχουν προσφέρει οι γονείς μου, Χρήστος και Φωτεινή και η αδερφή μου Στέλλα. Το ελάχιστο αυτή τη στιγμή είναι να τους ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τις φίλες και τους φίλους μου, όχι τόσο γιατί αποτέλεσαν και αποτελούν για εμένα ουσιαστική πηγή άντλησης δύναμης και στήριξης, αλλά και μόνο γιατί βρίσκονται στο πλάι μου και ομορφαίνουν την ζωή μου.

Κωνσταντίνος Χ. Γρύλλιας

Γ' ΚΟΙΝΟΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΣΤΗΡΙΞΗΣ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ



ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ



Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματοποιήθηκε υποστηριζόμενη από το “Πρόγραμμα Ενίσχυσης του Ερευνητικού Δυναμικού (ΠΕΝΕΔ) – 2003” με τίτλο “Αυτόματο Σύστημα Παρακολούθησης Ταχέως Εξελισσόμενων Φαινομένων”. Στο έργο αυτό με κωδικό 03ΕΔ_78 Ανάδοχος Φορέας ήταν το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και Φορέας Συγχρηματοδότησης η Ελληνική Βιομηχανία Αλουμινίου.

Το έργο συγχρηματοδοτείται

- 75% της Δημόσιας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
- 25% της Δημόσιας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας
- και από τον Ιδιωτικό Τομέα

στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 ΔΡΑΣΗ 8.3.1 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα – Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή.....	1
1.1 Γνωστική Περιοχή του Αντικειμένου της Διδακτορικής Διατριβής.....	1
1.2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση.....	8
1.2.1 Μέθοδοι Αποδιαμόρφωσης Δυναμικής Απόκρισης Περιστρεφόμενου Μηχανολογικού Εξοπλισμού	8
1.2.2 Μέθοδοι Εντοπισμού Ρωγμών μέσω Επεξεργασίας Δυναμικής Απόκρισης Κατασκευών	13
1.2.3 Μέθοδοι Αυτόματης Διάγνωσης Βλαβών Περιστρεφόμενου Μηχανολογικού Εξοπλισμού	19
1.3 Συνεισφορά της Διδακτορικής Διατριβής.....	25

Κεφάλαιο 2

Μέθοδοι Αποδιαμόρφωσης Δυναμικής Απόκρισης Μηχανολογικού Εξοπλισμού.....	31
2.1 Αποδιαμόρφωση με χρήση του Αλγορίθμου Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή (Energy Operator Separation Algorithm - EOSA).....	31
2.1.1 Εισαγωγή.....	31
2.1.2 Ο Ενεργειακός Τελεστής.....	31
2.1.3 Περιγραφή του Αλγορίθμου Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή (EOSA).....	33
2.1.4 Παραλλαγές του Διακριτού Αλγορίθμου	34
2.1.5 Ανάλυση της δυναμικής απόκρισης του ταλαντωτή Van der Pol.....	35
2.1.6 Ανάλυση της απόκρισης προσομοιωμένων σημάτων ένσφαιρων τριβέων με βλάβη.....	41
2.1.7 Συμπεράσματα.....	51
2.2 Αποδιαμόρφωση με χρήση Μετατοπιζόμενων Μιγαδικών Κυματιδίων Morlet ..	51
2.2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο Κυματιδιακού Μετασχηματισμού	53
2.2.2 Εφαρμογή Μιγαδικών Κυματιδίων Morlet (Complex Morlet Wavelet – CMW).....	60

Κεφάλαιο 3

Μορφολογική Επεξεργασία Δυναμικής Απόκρισης Κατασκευών	115
3.1 Εισαγωγή.....	115
3.2 Αποσύνθεση Ορθοκανονικών Προβολών (Proper Orthogonal Decomposition - POD).....	115

Περιεχόμενα

3.2.1	Μαθηματική Διατύπωση της Αποσύνθεσης Ορθοκανονικών Προβολών	116
3.2.2	Διακριτή Διατύπωση Αποσύνθεσης Ορθοκανονικών Προβολών.....	118
3.2.3	Υπολογισμός της Ορθοκανονικής Αποσύνθεσης (Principal Orthogonal Decomposition) με χρήση της μεθόδου Αποσύνθεσης Μοναδικής Τιμής (Singular Value Decomposition).....	119
3.3	Μορφολογική Επεξεργασία Σήματος.....	119
3.3.1	Εισαγωγή.....	119
3.3.2	Βασικές Αρχές Μορφολογικής Ανάλυσης.....	120
3.4	Διαδικασία Μοντελοποίησης Πεπερασμένων Στοιχείων.....	127
3.5	Επιλογή Μορφολογικών Τελεστών και Δομικών Στοιχείων.....	129
3.6	Αξιολόγηση απόδοσης της προτεινόμενης προσέγγισης σε πρόβλο δοκό με ρωγμή.....	132
3.6.1	Καθορισμός της θέσης και του βάθους της ρωγμής.....	133
3.6.2	Επίδραση ύπαρξης πολλαπλών ρωγμών.....	134
3.6.3	Επίδραση του θορύβου.....	135
3.6.4	Επίδραση της χωρικής ευκρίνειας των σημείων μέτρησης.....	138
3.7	Αξιολόγηση απόδοσης της προτεινόμενης προσέγγισης σε αμφιέριστη δοκό με ρωγμή.....	139
3.7.1	Καθορισμός της θέσης και του βάθους της ρωγμής.....	139
3.7.2	Επίδραση ύπαρξης πολλαπλών ρωγμών.....	140
3.7.3	Επίδραση του θορύβου.....	141
3.7.4	Επίδραση της χωρικής ευκρίνειας των σημείων μέτρησης.....	143
3.8	Συμπεράσματα.....	144

Κεφάλαιο 4

Μέθοδοι Αυτόματης Διάγνωσης Βλαβών.....	145	
4.1	Εισαγωγή.....	145
4.2	Θεωρία Στατιστικής Μάθησης (Statistical Learning Theory).....	148
4.3	Θεωρία Σφαλμάτων.....	151
4.4	Βασικά Στοιχεία Θεωρίας Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης (SVM).....	154
4.4.1	Γραμμικές Μηχανές Διανυσματικής Υποστήριξης.....	154
4.4.2	Μη διαχωρίσιμη περίπτωση.....	158
4.4.3	Ταξινόμηση Δεδομένων.....	161
4.4.4	Μη Γραμμικές Μηχανές Διανυσματικής Υποστήριξης.....	161

4.5	Στρατηγικές Ταξινόμησης Πολλαπλών Κλάσεων	167
4.6	Υβριδική Στρατηγική “Ένός Εναντίον Όλων” για την Σειριακή Ταξινόμηση SVM βάση μοντέλου	168
4.6.1	Προεπεξεργασία Δεδομένων και Εξαγωγή Χαρακτηριστικών	168
4.6.2	Στρατηγική Ταξινόμησης	175
4.7	Πειραματική Εφαρμογή	177
4.7.1	Περιγραφή της Πειραματικής Διάταξης.....	177
4.7.2	Εκτίμηση της Επίδοσης της διαδικασίας Εκπαίδευσης και Ταξινόμησης	182
4.8	Βιομηχανική Εφαρμογή	186
4.8.1	Περιγραφή Βιομηχανικής Εφαρμογής	186
4.8.2	Ανάλυση των Επιδόσεων Βιομηχανικής Ταξινόμησης.....	190
4.8.3	Συμπεράσματα.....	196
4.9	Βιομηχανική Εφαρμογή	196
4.9.1	Περιγραφή της Βιομηχανικής Εφαρμογής	196
4.9.2	Ανάλυση των Επιδόσεων Βιομηχανικής Ταξινόμησης.....	200
4.9.3	Αποτελέσματα	201
Κεφάλαιο 5		
	Συμπεράσματα.....	203
	Βιβλιογραφία.....	207
	Παράρτημα Α.....	225
	Λίστα Πινάκων.....	233
	Λίστα Σχημάτων.....	235

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Γνωστική Περιοχή του Αντικειμένου της Διδακτορικής Διατριβής

Η αξιοπιστία αποτελεί πάντα μια σημαντική διάσταση για την αξιολόγηση βιομηχανικών προϊόντων ή/και εξοπλισμών. Ο καλός σχεδιασμός του προϊόντος είναι προφανώς θεμελιώδης προϋπόθεση για προϊόντα υψηλής αξιοπιστίας. Ωστόσο, όσο καλός και να είναι ο σχεδιασμός τους, τα προϊόντα χάνουν την αρχική τους ποιότητα με την πάροδο του χρόνου καθώς λειτουργούν κάτω από την επίδραση τάσεων και φορτίων σε συνθήκες περιβάλλοντος καθώς επίσης και συχνά τυχαίων συμβάντων που επηρεάζουν την λειτουργία τους. Κατά συνέπεια, η Συντήρηση έχει εισαχθεί ως ένας αποτελεσματικός τρόπος εξασφάλισης ενός ικανοποιητικού επιπέδου αξιοπιστίας κατά την διάρκεια της χρήσιμης διάρκειας ζωής ενός προϊόντος/εξοπλισμού.

Χρονικά η πρώτη προσέγγιση συντήρησης είναι η συντήρηση που λαμβάνει χώρα μόνο μετά από διακοπή λειτουργίας λόγω αστοχίας ή βλάβης (Breakdown Maintenance). Η συντήρηση αυτή αποκαλείται επίσης Λειτουργία ως την Βλάβη (Run-To-Failure) ή απρογραμματίστη συντήρηση (Unplanned Maintenance). Η δεύτερη προσέγγιση συντήρησης ήταν η Προληπτική Συντήρηση (Preventive Maintenance), η οποία θέτει ένα περιοδικό χρονικό διάστημα πραγματοποίησης Προληπτικής Συντήρησης ανεξάρτητα από την κατάσταση του φυσικού αντικειμένου. Με την ταχεία ανάπτυξη της σύγχρονης τεχνολογίας, τα προϊόντα γίνονται ολοένα και πιο σύνθετα ενώ απαιτείται καλύτερη ποιότητα και μεγαλύτερη αξιοπιστία. Το γεγονός αυτό καθιστά το κόστος της Προληπτικής Συντήρησης συνεχώς αυξανόμενο. Τελικά, η Προληπτική Συντήρηση κατέστη μείζων δαπάνη για πολλές βιομηχανίες. Για το λόγο αυτό, προτάθηκαν νέες αποδοτικότερες προσεγγίσεις συντήρησης όπως η Συντήρηση Βάσει Κατάστασης Λειτουργίας (Condition-Based Maintenance - CBM).

Η Συντήρηση Βάσει Κατάστασης Λειτουργίας αποτελεί ένα πρόγραμμα συντήρησης που συνιστά ενέργειες συντήρησης χρησιμοποιώντας ως βάση τις πληροφορίες που συλλέγονται μέσω της παρακολούθησης της κατάστασης λειτουργίας της μηχανής. Η CBM ανήκει στην κατηγορία της Προβλεπτικής Συντήρησης (Predictive Maintenance) και επιχειρεί την αποφυγή μη αναγκαίων έργων συντήρησης, πραγματοποιώντας κατάλληλες ενέργειες συντήρησης μόνο όταν υπάρχει ένδειξη ανώμαλης συμπεριφοράς του υπό παρακολούθηση εξοπλισμού. Ένα πρόγραμμα CBM αν καταρτιστεί ορθά και εκτελεστεί αποτελεσματικά,

μπορεί να οδηγήσει σε αξιοσημείωτη μείωση του κόστους συντήρησης, μειώνοντας τον αριθμό των αχρείαστων (μη αναγκαίων) προγραμματισμένων εργασιών προληπτικής συντήρησης.

Σήμερα οι περισσότερες εργασίες συντήρησης μηχανολογικών και κατασκευαστικών-δομικών συστημάτων πραγματοποιούνται βασιζόμενες στη Προληπτική Συντήρηση, δηλαδή σε σαφώς καθορισμένα χρονικά διαστήματα. Η Παρακολούθηση Κατάστασης Λειτουργίας (Condition Monitoring) αποτελεί την τεχνολογία που θα επιτρέψει την εξέλιξη των φιλοσοφιών Προληπτικής Συντήρησης σε δυνητικά αποτελεσματικότερου κόστους φιλοσοφίες Προβλεπτικής Συντήρησης. Ως Παρακολούθηση Κατάστασης Λειτουργίας (Condition Monitoring - CM) αναφέρεται η διαδικασία πραγματοποίησης μιας στρατηγικής αναγνώρισης βλάβης σε περιστρεφόμενο και παλινδρομικό μηχανολογικό εξοπλισμό. Η αναγνώριση βλάβης-φθοράς πραγματοποιείται σε συνδυασμό με πέντε στενά σχετιζόμενους επιστημονικούς κλάδους που περιλαμβάνουν την Παρακολούθηση Κατάστασης (Condition Monitoring – CM, [Bentley and Hatch 2003]), την Παρακολούθηση Δομικής Υγείας (Structural Health Monitoring, [Farrar and Worden 2007]), την Μη Καταστροφική Εκτίμηση (Non-Destructive Evaluation – NDE, [Shull 2002]), τον Στατιστικό Έλεγχο Διαδικασιών (Statistical Process Control – SPC, [Montgomery 1997]) και την Πρόγνωση Βλάβης (Damage Prognosis – DP, [Farrar and Lieven 2007], [Farrar et al. 2004]). Τυπικά η SHM συνδέεται με την ζωντανή σε πραγματικό χρόνο (online) ολική (global) αναγνώριση βλάβης-φθοράς σε συστήματα κατασκευών όπως τα αεροσκάφη και τα κτήρια. Η CM είναι ανάλογη με την SHM αλλά ασχολείται με την αναγνώριση βλάβης σε περιστρεφόμενο και παλινδρομικό μηχανολογικό εξοπλισμό, όπως αυτός που χρησιμοποιείται στις βιομηχανίες και στην παραγωγή ενέργειας. Η NDE πραγματοποιείται συνήθως χωρίς να συνδέεται με κάποιο ευρύτερο δίκτυο (off-line) με μια τοπική μέθοδο εφόσον όμως και αφού έχει εντοπιστεί η ζημιά. Βέβαια υπάρχουν εξαιρέσεις στον κανόνα αυτό, καθώς η NDE χρησιμοποιείται επίσης ως εργαλείο διάγνωσης με επιτόπιους (in situ) ελέγχους σε μόνιμα εγκατεστημένες κατασκευές όπως δοχεία πίεσης και ράγες. Η NDE συνεπώς χρησιμοποιείται πρωτίστως για τον χαρακτηρισμό της βλάβης και ως έλεγχος σοβαρότητας όταν υπάρχει από πριν (a priori) γνώση της θέσης της βλάβης. Η SPC βασίζεται περισσότερο σε διαδικασίες παρά σε κατασκευές και χρησιμοποιεί μια ποικιλία αισθητήρων για την παρακολούθηση αλλαγών σε μια διαδικασία, που μπορεί να προκύψουν από κατασκευαστική βλάβη. Εφόσον ανιχνευτεί η βλάβη, η DP χρησιμοποιείται για να προβλέψει την εναπομένουσα χρήσιμη διάρκεια ζωής του συστήματος. Στους παραπάνω πέντε κλάδους μπορεί να προστεθεί ως έκτη η Παρακολούθηση Χρήσης (Usage Monitoring – U.M.), η οποία επιχειρεί να μετρήσει τις αποκρίσεις μιας κατασκευής σε γνωστές διεγέρσεις πριν την εμφάνιση βλάβης (αρχική κατάσταση καλής λειτουργίας) έτσι ώστε αναλύοντας την προγενέστερη κατάσταση να μπορεί να προβλεφθεί η εκδήλωση βλάβης και η χειρότερηση της κατάστασης της κατασκευής.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να δοθεί ο ορισμός της βλάβης. Χρησιμοποιώντας τον πιο γενικό ορισμό, ως ζημιά-βλάβη ορίζονται οι αλλαγές που εμφανίζονται στο σύστημα και επηρεάζουν δυσμενώς την παρούσα ή/και την μελλοντική συμπεριφορά του. Στον ορισμό αυτό, υποκρύπτεται η ιδέα ότι η φθορά/βλάβη δεν έχει πραγματική έννοια χωρίς την ύπαρξη

σύγκρισης μεταξύ δύο διαφορετικών καταστάσεων του συστήματος, η μία εκ των οποίων θεωρείται ως η αρχική και συχνά καλή-αβλαβής κατάσταση. Η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώνεται στην μελέτη της αναγνώρισης βλάβης σε μηχανολογικά συστήματα και κατασκευές. Κατά συνέπεια ο ορισμός της βλάβης μπορεί να περιοριστεί στις αλλαγές που επέρχονται στο υλικό ή/και στις γεωμετρικές ιδιότητες των μηχανολογικών συστημάτων, περιλαμβάνοντας τις αλλαγές στις οριακές συνθήκες και στην σύνδεση του συστήματος με το περιβάλλον του, που επηρεάζουν δυσμενώς την παρούσα ή/και την μελλοντική τους απόδοση και λειτουργία. Παρουσιάζοντας ένα παράδειγμα, η εμφάνιση μιας ρωγμής σε ένα εξάρτημα μηχανολογικού εξοπλισμού προκαλεί αλλαγή στην γεωμετρία που με τη σειρά της μεταβάλλει την δυσκαμψία του. Ανάλογα με το μέγεθος και την θέση της ρωγμής και με τα φορτία που εφαρμόζονται στο σύστημα, τα επιζήμια αποτελέσματα αυτής της βλάβης μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση/λειτουργία του συστήματος είτε άμεσα είτε μετά από κάποιο χρονικό διάστημα. Σε όρους ποσοτικής κλίμακας, όλες οι βλάβες ξεκινούν σε επίπεδο υλικού και στη συνέχεια κάτω από κατάλληλα σενάρια φορτίσεων εξελίσσονται σε επίπεδο εξαρτήματος και συστήματος με διάφορους ρυθμούς. Αντίστοιχα σε χρονική κλίμακα, η ζημιά μπορεί να εξελίσσεται αυξητικά για μεγάλο χρονικό διάστημα όπως π.χ. η φθορά λόγω κόπωσης ή διάβρωσης. Η βλάβη μπορεί επίσης να εμφανιστεί από προγραμματισμένα γεγονότα όπως π.χ. προσγειώσεις αεροσκαφών και από απρογραμμάτιστα γεγονότα όπως οι σεισμοί.

Η βασική αρχή των περισσότερων διαγνωστικών μεθόδων είναι ότι η βλάβη θα επηρεάσει την δυσκαμψία, την μάζα ή τις ιδιότητες έκλυσης/μεταφοράς ενέργειας του συστήματος, που με την σειρά τους θα μεταβάλλουν την μετρούμενη δυναμική απόκριση του συστήματος. Αν και η βάση της διάγνωσης βλαβών φαίνεται διαισθητική, οι πραγματικές εφαρμογές θέτουν μερικές σημαντικές τεχνικές προκλήσεις. Η πιο θεμελιώδης πρόκληση είναι το γεγονός ότι η βλάβη είναι τυπικά ένα τοπικό φαινόμενο και κατά συνέπεια μπορεί να μην επηρεάζει σημαντικά την χαμηλόσυχνη ολική απόκριση της κατασκευής που συνήθως μετριέται κατά τις μετρήσεις κραδασμών. Θέτοντας το ζήτημα υπό άλλο πρίσμα, η πρόκληση αυτή συναντάται σε πολλά άλλα ερευνητικά πεδία του μηχανικού όπου υπάρχει η ανάγκη για να μετρηθεί – προσδιοριστεί η απόκριση του συστήματος, ενώ αυτή μεταβάλλεται ταχύτατα και σε μεγάλο εύρος και όπου η μοντελοποίηση του συστήματος έχει αποδειχθεί δύσκολη. Μια άλλη θεμελιώδης πρόκληση είναι ότι σε πολλές περιπτώσεις η διάγνωση της βλάβης πρέπει να πραγματοποιηθεί σε ένα περιβάλλον μη επιβλεπόμενης εκμάθησης. Ο όρος μη επιβλεπόμενη εκμάθηση υποδηλώνει ότι δεν υπάρχουν δεδομένα από άλλα συστήματα υπό βλάβη. Οι προκλήσεις αυτές συμπληρώνονται από διάφορα θέματα σχετικά με την δυνατότητα πραγματοποίησης επαναλήψιμων και με ακρίβεια μετρήσεων της δυναμικής απόκρισης συστημάτων σε περιορισμένο αριθμό θέσεων σε σύνθετες κατασκευές και συχνά υπό δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι μεταβολές των περιβαλλοντικών και λειτουργικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και το φορτίο, που επηρεάζουν την δυναμική απόκριση του συστήματος δεν μπορούν να αγνοούνται. Μάλιστα οι αλλαγές αυτές μπορεί συχνά να καλύπτουν τις αλλαγές που έχουν προκληθεί λόγω της βλάβης.

Η διαδικασία της Παρακολούθησης Κατάστασης Λειτουργίας - Υγείας περιστρεφόμενων μηχανών [Jardine et al. 2006] και κατασκευών [Farrar et al. 2004] μπορεί

να αντιμετωπιστεί ως πρόβλημα Στατιστικής Αναγνώρισης Προτύπων (Statistical Pattern Recognition). Κατά την οπτική αυτή, η διαδικασία μπορεί να χωριστεί σε 4 τμήματα: α) Αξιολόγηση Λειτουργίας (Operational Evaluation), β) Συλλογή, Ανάμειξη και Ξεκαθάρισμα Δεδομένων (Data Acquisition, Fusion and Cleansing), γ) Εξαγωγή Χαρακτηριστικών και Συμπύκνωση Πληροφοριών (Feature Extraction and Information Condensation) και δ) Ανάπτυξη Στατιστικών Μοντέλων για την Επιλογή των Χαρακτηριστικών (Statistical Model Development for Feature Discrimination).

Αξιολόγηση Λειτουργίας (Operational Evaluation)

Η Αξιολόγηση Λειτουργίας απαντά σε τέσσερις ερωτήσεις σχετικές με την εφαρμογή ενός Συστήματος Παρακολούθησης:

- 1) Ποια είναι τα κίνητρα, οικονομικά και υγιεινής και ασφάλειας εργαζομένων, που συνηγορούν στην πραγματοποίηση της παρακολούθησης;
- 2) Πως ορίζεται η φθορά – βλάβη για το υπό παρακολούθηση σύστημα;
- 3) Ποιες είναι οι λειτουργικές και περιβαλλοντικές συνθήκες υπό τις οποίες λειτουργεί το σύστημα;
- 4) Ποιοι περιορισμοί τίθενται στην συλλογή δεδομένων υπό τις υπάρχουσες συνθήκες λειτουργίας;

Η αξιολόγηση της Λειτουργίας ξεκινάει με την επεξήγηση γιατί να πραγματοποιηθεί η Παρακολούθηση και συνεχίζει προσαρμόζοντας την Παρακολούθηση στις συγκεκριμένες “διαστάσεις” του συστήματος και στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της βλάβης που πρέπει να εντοπιστεί.

Συλλογή, Ανάμειξη και Ξεκαθάρισμα Δεδομένων (Data Acquisition, Fusion and Cleansing)

Το τμήμα της συλλογής δεδομένων στην Παρακολούθηση Λειτουργίας εμπεριέχει την επιλογή: (i) των ποσοτήτων που θα μετρηθούν, (ii) των τύπων, των θέσεων τοποθέτησης, του αριθμού, της ανάλυσης – ευκρίνειας, του εύρους μέτρησης και των λοιπών χαρακτηριστικών των αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν, (iv) του είδους και των προδιαγραφών των συσκευών Συλλογής/Αποθήκευσης/Μετάδοσης δεδομένων. Η διαδικασία αυτή εξαρτάται κυρίως από το είδος της εκάστοτε εφαρμογής. Το κόστος παίζει επίσης έναν σημαντικό ρόλο στις αποφάσεις αυτές. Ένας άλλος ενδιαφέρον παράγοντας είναι η συχνότητα λήψης δεδομένων. Σε μερικές περιπτώσεις χρειάζεται να συλλέγονται δεδομένα ακριβώς πριν και σε περιοδικά χρονικά διαστήματα μετά από ένα έντονο συμβάν. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως π.χ. αν το είδος της αστοχίας που παρακολουθείται είναι η διάδοση ρωγμής λόγω κόπωσης, είναι απαραίτητη η συλλογή δεδομένων σχεδόν συνεχώς σε σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα. Επίσης τα δεδομένα μπορεί να μετρούνται κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες. Για τον λόγο αυτό η εξομάλυνση/κανονικοποίηση των δεδομένων είναι πολύ σημαντική στην διαδικασία παρακολούθησης. Κανονικοποίηση των δεδομένων είναι η διαδικασία κατά την οποία τα δεδομένα κανονικοποιούνται έτσι ώστε οι αλλαγές των σημάτων που προκαλούνται από λειτουργικές και περιβαλλοντικές μεταβολές του συστήματος να μπορούν να διαχωριστούν από ενδιαφέρουσες από πλευρά διάγνωσης αλλαγές της απόκρισης της κατασκευής.

Η ανάμειξη δεδομένων (data fusion) ως ερευνητικός κλάδος αναδείχτηκε ως αποτέλεσμα της προσπάθειας οργανισμών άμυνας να διατυπώσουν – τυποποιήσουν διαδικασίες για την ολοκλήρωση πληροφοριών που συλλέγονται από ποικίλες και εντελώς ανόμοιες πηγές [Klein 1999]. Αντικειμενικός στόχος αποτέλεσε αρχικά ο καθορισμός καταστάσεων στο πεδίο της μάχης σε εμπόλεμες ζώνες και η αξιολόγηση απειλών με βάση τις πληροφορίες που συλλέγονται από πολυάριθμες διαφορετικές πηγές. Η φιλοσοφία της ανάμειξης δεδομένων γρήγορα αναγνωρίστηκε ότι παρουσιάζει ευρύτερες εφαρμογές. Σκοπός της ανάμειξης δεδομένων είναι η ολοκλήρωση δεδομένων από ένα μεγάλο αριθμό αισθητήρων με σκοπό την λήψη μιας πιο εύρωστης και αξιόπιστης απόφασης σε σχέση με την αντίστοιχη με έναν μόνο αισθητήρα.

Το Ξεκαθάρισμα δεδομένων (Data cleansing) είναι η διαδικασία της επιλογής αν τα δεδομένα που προέκυψαν από την διαδικασία επιλογής χαρακτηριστικών γίνονται αποδεκτά ή απορρίπτονται. Η διαδικασία αυτή βασίζεται συνήθως στην γνώση που έχει αποκτηθεί από άτομα - τεχνικούς που σχετίζονται άμεσα με την συλλογή δεδομένων. Για παράδειγμα, η επιθεώρηση ενός εγκατεστημένου εξοπλισμού διενέργειας μετρήσεων μπορεί να αποκαλύψει ότι ένας αισθητήρας είναι χαλαρά τοποθετημένος και κατά συνέπεια με βάση την κρίση των ατόμων που πραγματοποιούν την μέτρηση, αυτό το σύνολο των δεδομένων ή τα δεδομένα που προέρχονται από τον συγκεκριμένο αισθητήρα μπορούν επιλεκτικά να αφαιρεθούν από την διαδικασία επιλογής χαρακτηριστικών. Τεχνικές επεξεργασίας σήματος, όπως το φιλτράρισμα (filtering) και η αλλαγή δειγματοληψίας (resampling) μπορούν να θεωρηθούν διαδικασίες ξεκαθαρίσματος δεδομένων.

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι η συλλογή δεδομένων, η κανονικοποίηση, η ανάμειξη δεδομένων και το ξεκαθάρισμα δεδομένων δεν πρέπει να είναι στατικές διαδικασίες. Η διορατικότητα που αποκτάται από την διαδικασία επιλογής χαρακτηριστικών και ανάπτυξης στατιστικών δεδομένων, μπορεί να προσφέρει πληροφορίες σχετικά με αλλαγές που μπορεί να βελτιώσουν την διαδικασία συλλογής δεδομένων.

Εξαγωγή Χαρακτηριστικών και Συμπύκνωση Πληροφοριών (Feature Extraction and Information Condensation)

Η περιοχή που λαμβάνει την περισσότερη προσοχή στην Παρακολούθηση Κατάστασης στην διεθνή τεχνική βιβλιογραφία είναι η εξαγωγή χαρακτηριστικών. Η εξαγωγή χαρακτηριστικών είναι η διαδικασία αναγνώρισης ιδιοτήτων, που είναι ευαίσθητες όσον αφορά βλάβες και εξάγονται από την μετρούμενη δυναμική απόκριση, η οποία επιτρέπει την διάκριση μεταξύ υγιούς κατασκευής και κατασκευής υπό βλάβη. Τα βέλτιστα χαρακτηριστικά για τον εντοπισμό της βλάβης σχετίζονται τυπικά με το είδος της εφαρμογής.

Μια από τις πιο γνωστές μεθόδους εξαγωγής χαρακτηριστικών βασίζεται στον συσχετισμό μεγεθών της μετρούμενης δυναμικής απόκρισης του συστήματος, όπως το πλάτος ταλάντωσης ή η συχνότητα, με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν, όταν ο εξοπλισμός ήταν ολοκαίνουργιος ή είχε εμφανίσει βλάβες. Μια άλλη μέθοδος ανάπτυξης χαρακτηριστικών για αναγνώριση βλαβών είναι η εφαρμογή μηχανικών σφαλμάτων, παρόμοια με αυτά που αναμένονται σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, σε συστήματα και η ανάπτυξη μιας αρχικής κατανόησης των παραμέτρων που είναι ευαίσθητες στην

αναμενόμενη βλάβη. Το σύστημα υπό βλάβη, μπορεί επίσης να επικυρώσει ότι οι διαγνωστικές μετρήσεις είναι αρκετά ευαίσθητες για να πραγματοποιούν διάκριση μεταξύ των χαρακτηριστικών από το υγιές και το εν βλάβη σύστημα. Η χρήση αναλυτικών εργαλείων όπως πειραματικά επικυρωμένα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να αποτελέσει ένα εξαιρετικό προσόν για την διαδικασία. Σε πολλές περιπτώσεις, αναλυτικά εργαλεία χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση αριθμητικών πειραμάτων όπου οι βλάβες εισάγονται μέσω υπολογιστικής προσομοίωσης. Έλεγχοι συσσώρευσης ζημιών, κατά την διάρκεια των οποίων σημαντικά κατασκευαστικά εξαρτήματα του ελεγχόμενου συστήματος υπόκεινται σε χειροτέρευση της κατάστασης τους μέσω της επιβολής πραγματικών συνθηκών φόρτισης, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση των κατάλληλων χαρακτηριστικών. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει έλεγχο της προκληθείσης βλάβης, έλεγχο κόπωσης, ανάπτυξη διάβρωσης ή έλεγχο κύκλου θερμοκρασίας για να συσσωρευτούν συγκεκριμένοι τύποι βλαβών με έναν επιταχυμένο τρόπο εμφάνισης.

Ανάπτυξη Στατιστικού Μοντέλου

Η Ανάπτυξη Στατιστικού Μοντέλου για την πραγματοποίηση διάκρισης των χαρακτηριστικών από υγιείς και εν βλάβη κατασκευές αποτελεί το τμήμα της διαδικασίας Παρακολούθησης Λειτουργίας που έχει λάβει την λιγότερη προσοχή στην τεχνική βιβλιογραφία. Η Ανάπτυξη Στατιστικού Μοντέλου αφορά στην εφαρμογή των αλγορίθμων στα εξαγόμενα χαρακτηριστικά με στόχο την ποσοτικοποίηση της κατάστασης βλάβης του εξοπλισμού. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη στατιστικού μοντέλου συνήθως εντάσσονται σε δύο κατηγορίες. Όταν δεδομένα είναι διαθέσιμα τόσο από τον υγιή όσο και από τον εν βλάβη εξοπλισμό, τότε οι αλγόριθμοι στατιστικής αναγνώρισης προτύπων ανήκουν στην γενική ταξινόμηση που αναφέρεται ως Εκπαιδευόμενη Μάθηση (Supervised Learning). Η ταξινόμηση ομάδων και η ανάλυση παλινδρόμησης αποτελούν κατηγορίες των αλγορίθμων επιβλεπόμενης μάθησης. Η Μη Επιβλεπόμενη Μάθηση αναφέρεται σε αλγορίθμους που εφαρμόζονται σε δεδομένα που δεν περιλαμβάνουν παραδείγματα από την εν βλάβη κατάσταση. Η ανίχνευση ακραίων τιμών ή καινοτομίας (outlier or novelty detection) αποτελούν την πρωτογενή κλάση αλγορίθμων που εφαρμόζονται σε εφαρμογές μη επιβλεπόμενης μάθησης. Όλοι οι αλγόριθμοι αναλύουν τις στατιστικές κατανομές των μετρούμενων ή υπολογισμένων χαρακτηριστικών για να ενισχύσουν την διαδικασία αναγνώρισης βλαβών.

Η κατάσταση της βλάβης ενός συστήματος μπορεί να περιγραφεί ως μια διαδικασία πέντε βημάτων, ακολουθώντας την διαδικασία που πρότεινε ο Rytter [Rytter 1993], για την απάντηση των ακόλουθων ερωτήσεων.

- (i) Ύπαρξη (Existence). Υπάρχει βλάβη στο σύστημα;
- (ii) Τοποθεσία (Location). Που βρίσκεται η βλάβη στο σύστημα;
- (iii) Τύπος (Type). Τι είδους βλάβη υπάρχει;
- (iv) Έκταση (Extent). Πόσο σοβαρή είναι η βλάβη;
- (v) Πρόγνωση (Prognosis). Πόση ωφέλιμη διάρκεια ζωής παραμένει;

Οι απαντήσεις στις ερωτήσεις αυτές, με την σειρά που παρουσιάστηκαν, αναπαριστούν την αυξανόμενη γνώση της κατάστασης της βλάβης. Τα στατιστικά μοντέλα, όταν εφαρμόζονται με έναν μη επιβλεπόμενο τρόπο, χρησιμοποιούνται τυπικά για την απάντηση των ερωτήσεων που σχετίζονται με την ύπαρξη και την τοποθεσία της βλάβης. Όταν εφαρμόζονται με έναν επιβλεπόμενο τρόπο και συνδέονται με αναλυτικά μοντέλα, οι στατιστικές διαδικασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το καλύτερο καθορισμό του τύπου της βλάβης, της έκτασης της βλάβης και του υπολειπόμενης ωφέλιμης διάρκειας ζωής της κατασκευής. Τα στατιστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται επίσης για την ελαχιστοποίηση των ψευδών ενδείξεων βλάβης. Οι ψευδείς ενδείξεις βλάβης εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες: (i) ψευδής – θετική ένδειξη βλάβης (ένδειξη ύπαρξης βλάβης ενώ δεν υπάρχει) και (ii) ψευδής – αρνητική ένδειξη (μη ένδειξη ύπαρξης βλάβης ενώ στην πραγματικότητα υπάρχει). Σφάλματα του πρώτου τύπου είναι ανεπιθύμητα, καθώς προκαλούν μη αναγκαίες διακοπές λειτουργίας και κατά συνέπεια απώλειες εσόδων καθώς και απώλεια εμπιστοσύνης στο σύστημα παρακολούθησης. Τα σφάλματα του δεύτερου τύπου είναι βέβαια πιο σημαντικά καθώς τίθενται ξεκάθαρα ζητήματα ασφαλείας εάν προκύψουν λανθασμένες ταξινομήσεις. Σφάλματα της κατηγορίας αυτής μπορούν να οδηγήσουν σε σοβαρότατα ατυχήματα με κίνδυνο απώλειας ανθρωπίνων ζωών και πρόκλησης οικολογικής καταστροφής μέσω εκτενούς περιβαλλοντικής ρύπανσης. Για τον λόγο αυτό, τα σφάλματα του δεύτερου τύπου κρίνονται εξαιρετικά σημαντικά και πολλοί αλγόριθμοι αναγνώρισης προτύπων επιτρέπουν την επιλογή της βαρύτητας του ενός τύπου σφάλματος εις βάρος του άλλου. Η βαρύτητα αυτή μπορεί να είναι ένας από του παράγοντες που αποφασίζονται στο στάδιο αξιολόγησης λειτουργίας.

Ακολουθώντας την οπτική ότι η διαδικασία της Παρακολούθησης Κατάστασης Λειτουργίας - Υγείας περιστρεφόμενων μηχανών και κατασκευών μπορεί να αντιμετωπιστεί ως πρόβλημα Στατιστικής Αναγνώρισης Προτύπων (Statistical Pattern Recognition), στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετώνται μεθοδολογίες διάγνωσης βλαβών με έμφαση σε ένσφαιρους τριβείς και κατασκευές δοκών. Μελετώνται δύο μέθοδοι αποδιαμόρφωσης δυναμικής απόκρισης περιστρεφόμενου εξοπλισμού με στόχο την ορθή και επιτυχής εξαγωγή χαρακτηριστικών που σχετίζονται με την εμφάνιση βλάβης στο σύστημα. Εφαρμόζεται ο Αλγόριθμος Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή (Energy Operator Separation Algorithm - EOSA) και ο συνεχής κυματιδιακός μετασχηματισμός με χρήση Μιγαδικών Μετατοπισμένων Κυματιδίων Morlet. Στο πεδίο των κατασκευών μελετάται η εφαρμογή της μεθόδου Αποσύνθεσης Ορθοκανονικών Προβολών (Proper Orthogonal Decomposition) σε διατάξεις δοκών και επιχειρείται μορφολογική επεξεργασία των Ορθοκανονικών Μορφών (Proper Orthogonal Modes). Στο πεδίο της ανάπτυξης στατιστικού μοντέλου, προτείνεται υβριδικός αλγόριθμος που βασίζεται σε ένα Στοχαστικό Μοντέλο Προσομοίωσης Δυναμικής Απόκρισης Ένσφαιρων Τριβείων, στην στρατηγική Ένας-Εναντίον-Όλων (One-Against-All) και στην χρησιμοποίηση της μεθόδου επιβλεπόμενης εκμάθησης Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης (Support Vector Machines). Στις παρακάτω ενότητες πραγματοποιείται σύντομα εισαγωγή και αναφορά στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διδακτορική διατριβή.

1.2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

1.2.1 Μέθοδοι Αποδιαμόρφωσης Δυναμικής Απόκρισης Περιστρεφόμενου Μηχανολογικού Εξοπλισμού

1.2.1.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος παρακολούθησης κραδασμών που βασίζεται στην Τεχνική Υψίσυχνου Συντονισμού (High Frequency Resonance Technique - HFRT) [McFadden and Smith 1984b] έχει αποδειχθεί μία από τις πλέον επιτυχημένες και διαδεδομένες μεθόδους. Η μέθοδος HFRT είναι μία από τις πιο ταιριαστές μεθόδους για την παρακολούθηση κραδασμών κιβωτίων ταχυτήτων και στροβιλοκινητήρων χάρη στην ικανότητά της να ξεχωρίσει τον κραδασμό που παράγεται από ένα φθαρμένο έδρανο κύλισης από τον κραδασμό που παράγεται από τα υπόλοιπα στοιχεία μηχανών.

Η μέθοδος αυτή πρωτοπαρουσιάστηκε στις αρχές της δεκαετίας του '70 και είναι εναλλακτικά γνωστή ως Ανάλυση Αποδιαμόρφωσης Διεγερμένης Συχνότητας (Demodulated Resonance Analysis) ή Ανάλυση Περιβάλλουσας Ισχύος Φασματικής Πυκνότητας (Envelope Power Spectral Density Analysis). Η HFRT βασίζεται θεμελιακά στην παραδοχή ότι οι μηχανολογικές κατασκευές, όταν υποβάλλονται σε δυναμικές φορτίσεις, παράγουν ταλαντωτικά σήματα με συχνότητες που σχετίζονται με τις συχνότητες των φορτίσεων που τις προκάλεσαν [Rao 1995], [Dimarogonas 1992], [Mitchell 1993], [Wowk 1991], [Harris 1987], [Taylor 1994].

Η Τεχνική Υψίσυχνου Συντονισμού (High-Frequency Resonance – HFR) [McFadden and Smith 1984b], [Randall 1987] εφαρμόζεται σε σήματα με κρουστικά χαρακτηριστικά όπως αυτά που προκύπτουν από σφάλματα ή φθορά κάποιου περιστρεφόμενου μηχανολογικού εξαρτήματος (π.χ. οδοντωτού τροχού, εδράνου κ.ά.), με σκοπό την εξαγωγή της περιβάλλουσας του σήματος. Περαιτέρω επεξεργασία της περιβάλλουσας μπορεί να οδηγήσει όχι μόνο στην αναγνώριση ύπαρξης αλλά και στον εντοπισμό του είδους των δυσλειτουργιών και των ελαττωμάτων. Η Τεχνική HFR διαχωρίζει το υψίσυχο περιεχόμενο του σήματος που διεγείρεται από τις κρούσεις ή τις ωστικές δυνάμεις και εκμεταλλεύεται την απουσία χαμηλόσυχνου μηχανολογικού θορύβου με σκοπό την αποδιαμόρφωση του σήματος κραδασμού. Η αποδιαμόρφωση λοιπόν απομονώνει τον χαμηλόσυχο παράγοντα διαμόρφωσης που συχνά ενυπάρχει σε υψίσυχνες περιοχές του φάσματος. Συνεπώς, η Τεχνική οδηγεί σε ένα χαμηλής συχνότητας αποδιαμορφωμένο σήμα με υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio). Η υψίσυχη περιοχή του φάσματος συνήθως φιλτράρεται για να αποφευχθούν παρεμβολές από άλλους παράγοντες. Η επιλογή της ζώνης συχνοτήτων προς αποδιαμόρφωση, το εύρος της ζώνης συχνοτήτων καθώς και η μεθοδολογία αποδιαμόρφωσης αποτελούν ανοιχτά πεδία έρευνας.

Ποικίλες μέθοδοι αποδιαμόρφωσης έχουν προταθεί ειδικά για αναγνώριση και εντοπισμό βλαβών σε ένσφαιρους τριβείς και οδοντοτροχούς. Μια μέθοδος αποδιαμόρφωσης που βασίζεται σε αναλογικό εξοπλισμό παρουσιάζεται στις [McFadden and Smith 1984b], [Randall 1987], [Ho and Randall 2000]. Κατά την μέθοδο αυτή, το σήμα αρχικά διέρχεται από ένα αναλογικό υψιπερατό (high-pass) φίλτρο για να αφαιρέσει τον χαμηλόσυχο θόρυβο.

Στην συνέχεια εισάγεται σε έναν Ανιχνευτή Περιβάλλουσας (Envelop Detector) που αποτελείται από έναν ανορθωτή (rectifier) ημκύματος (half-wave) ή πλήρους κύματος (full-wave) που μετατρέπει το διπολικό σήμα εισόδου σε ένα μονοπολικό σήμα και από ένα κύκλωμα εξομάλυνσης (smoothing circuit).

Ο Sheen [Sheen 2008] πρότεινε μια μέθοδο επεξεργασίας σήματος και έναν αναδρομικό αλγόριθμο υπολογισμού που βασίζεται στη συχνότητα διέγερσης της πρώτης μορφής ταλάντωσης ενός μηχανολογικού συστήματος. Αρχικά η συχνότητα αυτή επιλέγεται και στη συνέχεια εφαρμόζεται ο αναδρομικός αλγόριθμος για να βελτιώσει την ακρίβεια της επιλεγμένης συχνότητας. Υπό την παραδοχή μιας κλιμακωτής συνάρτησης για την περιβάλλουσα του σήματος, το σήμα κραδασμού μπορεί να αποσυντεθεί σε μια ημιτονοειδής συνάρτηση βάσης στη συχνότητα διέγερσης. Συνεπώς, η περιβάλλουσα του σήματος ανακτάται απευθείας με εκτίμηση των συντελεστών της συνάρτησης βάσης χρησιμοποιώντας μια γραμμική ανάλυση ελαχίστων τετραγώνων.

Μεταξύ των πολύμορφων και πολυάριθμων μεθόδων αποδιαμόρφωσης που έχουν προταθεί, η πιο ευρέως διαδεδομένη είναι η μέθοδος που βασίζεται στον μετασχηματισμό Hilbert (Hilbert Transform) [Randall 1987] με σκοπό να παρασχεθεί ένα μιγαδικό σήμα. Πριν την εφαρμογή του μετασχηματισμού απαιτείται η χρήση ενός ζωνοπερατού (band pass) φίλτρου γύρω από την επιλεγμένη διεγερμένη περιοχή. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει ορισμένα βασικά μειονεκτήματα. Ο μετασχηματισμός Hilbert απαιτεί πρώτα την εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier στο επεξεργαζόμενο σήμα. Αυτό αυξάνει το υπολογιστικό κόστος, ενώ παράλληλα μεταφέρει τα μειονεκτήματα του μετασχηματισμού Fourier στην υπόλοιπη διαδικασία. Αγνοεί τα τοπικά χρονικά χαρακτηριστικά ενός σήματος και κατά συνέπεια την μεταβολή της κατανομής της ενέργειας στο εύρος των συχνοτήτων από την μια χρονική στιγμή στην άλλη. Έπειτα, εξαιτίας της απαίτησης για “ξετύλιγμα” της φάσης (phase unwrapping) προκύπτουν αριθμητικές αστάθειες, που δεν επιτρέπουν την ακριβή ανάκτηση της φάσης και κατά συνέπεια της στιγμιαίας συχνότητας του σήματος. Τέλος, απαιτεί ως ένα σημαντικό βαθμό την παρέμβαση εμπειρου και εξειδικευμένου χειριστή για την επιλογή συγκεκριμένων χαρακτηριστικών παραμέτρων της μεθόδου, όπως η επιλογή του τύπου του φίλτρου, του εύρους του και της κεντρικής συχνότητας του.

Σε έναν αριθμό εφαρμογών απαιτείται μια αυξημένη ευκρίνεια στο πεδίο του χρόνου, συγκρινόμενη με αυτή που προσφέρεται από τις παραπάνω μεθόδους. Τέτοιες εφαρμογές περιλαμβάνουν μη γραμμικά δυναμικά συστήματα με απότομες μεταβολές, όπως αυτές που προκαλούνται από την εισαγωγή ρωγμών, διακένων και ολίσθησης. Οι μη γραμμικότητες μπορούν ποιοτικά καθώς και ποσοτικά να μεταβάλουν την δυναμική απόκριση του συστήματος. Μικρές αλλαγές στην συχνότητα ή στο πλάτος της διέγερσης μπορεί να προκαλέσουν δραστικές αλλαγές στην απόκριση. Τυπικές περιπτώσεις τέτοιων συστημάτων είναι οι ένσφαιροι τριβείς και οι οδοντοτροχοί με τοπικά ελαττώματα.

1.2.1.2 Αλγόριθμος Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή (Energy Operator Separation Algorithm - EOSA)

Στην εργασία του πάνω στη μη γραμμική μοντελοποίηση της παραγωγής φωνής [Teager 1980], [Teager and Teager 1983], [Teager and Teager 1990], ο Teager εφήρμοσε έναν μη

γραμμικό τελεστή Ψ_d σε διακριτά σήματα που σχετίζονται με την ομιλία. Ο Kaiser [Kaiser 1983] ανέλυσε τον μη γραμμικό τελεστή Ψ_d και έδειξε ότι μπορεί να ανιχνεύσει την συχνότητα απλών ημιτόνων και σημάτων που η συχνότητα τους αυξάνεται με τον χρόνο (chirp signals) καθώς και ότι παρουσιάζει πολλές χρήσιμες ιδιότητες. Στη συνέχεια ο Kaiser [Kaiser 1990] παρουσίασε έναν νέο μη γραμμικό τελεστή Ψ_c (στενά συνδεδεμένο με τον Ψ_d) για συνεχή σήματα. Ο Ψ_c προτάθηκε αρχικά για τον εντοπισμό της ενέργειας ενός γραμμικού ταλαντωτή χωρίς απόσβεση και εφαρμόστηκε σε ημιτονοειδή σήματα. Βρέθηκε ότι είναι ανάλογος της ενέργειας της πηγής της ταλάντωσης και κατά συνέπεια μπορεί να θεωρηθεί Ενεργειακός Τελεστής.

Την περίοδο 1991-1993 οι Maragos, Kaiser και Quatieri, [Maragos et al. 1990], [Maragos et al. 1993a] πρότειναν ένα νέο μη γραμμικό μοντέλο για την παραγωγή φωνής που στηρίζεται στη θεωρία της διαμόρφωσης AM-FM και εφήρμοσαν τους Τελεστές Ψ_d και Ψ_c ως εργαλείο για αποδιαμόρφωση των σημάτων με στόχο την ανάκτηση της πληροφορίας που περιέχουν. Παρουσίασαν τον Αλγόριθμο Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή (Energy Operator Separation Algorithm) και παραλλαγές του και μελέτησαν τις ιδιότητες του εφαρμόζοντάς τον σε φωνητικά σήματα.

Το 1994 οι Potamianos και Maragos [Potamianos and Maragos 1994] παρουσίασαν μια εκτενή σύγκριση δύο θεμελιακά διαφορετικών μεθόδων αποδιαμόρφωσης AM-FM σημάτων, του Μετασχηματισμού Hilbert και του Αλγορίθμου Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή (Energy Operator Separation Algorithm - EOSA). Επεξεργάστηκαν τυχαία σήματα και σήματα φωνής μοντελοποιημένα ως AM-FM σήματα. Σύμφωνα με τους συγγραφείς τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ισχυρές ενδείξεις ότι η προσέγγιση του εξομαλυμένου ενεργειακού τελεστή εμφανίζει παρόμοια σφάλματα εκτίμησης με την προσέγγιση μετασχηματισμού Hilbert για εφαρμογές ομιλίες, αλλά μικρότερα σφάλματα για εφαρμογές επικοινωνιών. Επιπλέον η προσέγγιση εξομαλυμένου ενεργειακού τελεστή έχει μικρότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα και ταχύτερη προσαρμογή εξαιτίας της στιγμιαίας φύσης της.

Τα τελευταία χρόνια ο Αλγόριθμος Ενεργειακού Τελεστή εφαρμόστηκε σε ποικίλα είδη σημάτων με έμφαση στην ομιλία. Ο Abdel-Galil χρησιμοποίησε τον EOSA [Abdel-Galil et al. 2002], [Abdel-Galil et al. 2004] για την μελέτη της αυξομείωσης της τάσης του ρεύματος. Ο Sussman χρησιμοποίησε τον αλγόριθμο στην ανάλυση και την ανασύνθεση ήχων μουσικών οργάνων [Sussman and Kahrs 1996] ενώ ο Cexus συνδύασε τον EOSA με την Αποσύνθεση Εμπειρικών Μορφών (Empirical Mode Decomposition) για επεξεργασία σημάτων υποβρυχίου ραντάρ [Cexus and Boodraa 2005].

1.2.1.3 Κυματιδιακός Μετασχηματισμός

Μια διαφορετική προσέγγιση προκύπτει αν τα μη στάσιμα σήματα παρασταθούν ως άθροισμα χρονικά περιορισμένων σημάτων διαφορετικής κλίμακας και πλάτους (κυματίδια). Με αυτήν την προσέγγιση, αντί για μια χρονοσυχνοτική απεικόνιση (time-frequency representation) χρησιμοποιείται μια απεικόνιση χρόνου – κλίμακας (time-scale representation). Τα κυματίδια (Wavelets) είναι εντοπισμένα τόσο στον χρόνο όσο και στην συχνότητα και κατά συνέπεια μπορούν να διασταλούν και να μετατεθούν κατά μήκος του σήματος με σκοπό την εξαγωγή τόσο της χρονικής όσο και της συχνοτικής πληροφορίας.

Μετά το 1807, που διατυπώθηκε από τον Joseph Fourier η έννοια της ανάλυσης συχνοτήτων, η διερεύνηση της έννοιας των συναρτήσεων, της σύγκλισης σειρών Fourier και των ορθογώνιων συστημάτων, οδήγησε σταδιακά τους μαθηματικούς (Gabor, Hoelström) στην ανάλυση κλίμακας. Η πρώτη αναφορά των κυματιδίων εμφανίστηκε σε παράρτημα της διατριβής του A. Haar [Haar 1909]. Μια ιδιότητα του κυματιδίου Haar είναι ότι έχει συμπαγή υποστήριξη, δηλαδή ότι εξαφανίζεται έξω από ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα. Τα Haar κυματίδια όμως δεν είναι συνεχώς παραγωγίσιμα, γεγονός που περιορίζει κάπως τις εφαρμογές τους.

Περί τα 1930, διάφορες ερευνητικές ομάδες, ανεξάρτητα εργαζόμενες, προσπάθησαν να χρησιμοποιήσουν βασικές συναρτήσεις μεταβλητής κλίμακας, μια έννοια κλειδί για την μετέπειτα εξέλιξη των μετασχηματισμών με κυματίδια. Ο φυσικός Paul Levy μελετώντας την κίνηση Brown, εφάρμοσε την συνάρτηση Haar σε τύπους τυχαίων σημάτων και διαπίστωσε ότι οι συναρτήσεις Haar ήταν αποτελεσματικότερες από τις βασικές συναρτήσεις Fourier στην περιγραφή λεπτομερειών. Το 1980, οι Grossman και Morlet, ένας φυσικός και ένας μηχανικός, όρισαν τα κυματίδια στο πλαίσιο της κβαντικής φυσικής [Grossmann and Morlet 1984]. Τα κυματίδια (Wavelets) σταδιακά άρχισαν να γίνονται γνωστά. Ο Goupillaud [Goupillaud et al. 1984] και οι Grossmann και Morlet [Grossmann and Morlet 1984] τα χρησιμοποίησαν ως εργαλείο για ανάλυση σεισμικών δεδομένων.

Το 1985, ο Stephane Mallat έδωσε καινούργια ώθηση στα κυματίδια με την εργασία του στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος. Ανακάλυψε ορισμένες σχέσεις μεταξύ των ορθογώνιων κατοπτρικών φίλτρων, των αλγορίθμων πυραμίδας και των ορθοκανονικών βασικών συναρτήσεων κυματιδίων [Mallat 1998]. Βασιζόμενος σε αυτά τα συμπεράσματα ο Y. Meyer [Meyer 1990] πρότεινε τα ομώνυμα (μη - τετριμμένα) κυματίδια που σε αντίθεση με την κυματίδια Haar είναι συνεχώς παραγωγίσιμα. Ωστόσο δεν έχουν συμπαγή υποστήριξη. Μερικά χρόνια αργότερα, η Ingrid Daubechies βασιζόμενη στην εργασία του Mallat κατασκεύασε ένα σύνολο από ορθοκανονικές συναρτήσεις [Daubechies 1988], [Daubechies 1992] οι οποίες κρίθηκαν ως οι πιο επιτυχείς και αποτελούν ακρογωνιαίο λίθο της εφαρμογής των κυματιδίων σήμερα. Η θεωρία των κυματιδίων αναπτύχθηκε τάχιιστα κατά την διάρκεια της προηγούμενης δεκαετίας και παρουσιάζει ευρύ πεδίο εφαρμογών.

Ο Κυματιδιακός Μετασχηματισμός μπορεί να χωριστεί σε Συνεχή (Continuous) και Διακριτό (Discrete). Γενικά τα συνεχή κυματίδια είναι καλύτερα για ανάλυση χρόνου-συχνότητας ενώ τα διακριτά για αποσύνθεση, συμπίεση και επιλογή χαρακτηριστικών. Η επιλογή του κυματιδίου δεν είναι πάντα ξεκάθαρη. Τα κυματίδια Grossman-Morlet είναι τα καλύτερα γνωστά συνεχή κυματίδια. Τα κυματίδια Daubechies αποτελούν μάλλον την πιο γνωστή βάση ορθογώνιων κυματιδίων. Τα Διπλά Β-κυματίδια αποτελούν ειδικές περιπτώσεις διακριτών κυματιδίων. Αποτελούνται από δύο σύνολα κυματιδίων: ένα για αποσύνθεση και ένα για ανακατασκευή. Τα κυματίδια άνοιξαν νέους δρόμους απεικόνισης σήματος πέρα από την κλασική κυματιδιακή ανάλυση χρόνου – κλίμακας. Οι προσεγγίσεις αυτές περιλαμβάνουν: κυματίδια χρόνου-συχνότητας (δηλαδή Malvar και Αρμονικά κυματίδια), Πακέτα κυματιδίων (Wavelet Packets) και Αναζήτησης Ταιριάσματος (Matching Pursuit) που έχουν την ικανότητα να αναλύουν μια συνάρτηση σε ένα συνδυαστικό πεδίο χρόνου – συχνότητας – κλίμακας (Meyer, Chui, Mallat).

Η κυματιδιακή ανάλυση της κυματομορφής ενός σήματος εκφράζει το σήμα σε μια σειρά ταλαντώσεων (ταλαντούμενων συναρτήσεων) με διαφορετικές συχνότητες σε διαφορετικό χρόνο με διαστολές μέσω της παραμέτρου κλίμακας a και μεταθέσεις μέσω της παραμέτρου χρόνου b . Ομοίως με το φάσμα ισχύος και το φάσμα φάσης στην ανάλυση Fourier, ορίζονται ένα κλιμακογράφημα (scalogram) και ένα φάσμα κυματιδιακής φάσης και χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία του σήματος. Βασικά πλεονεκτήματα του κυματιδιακού μετασχηματισμού είναι η ικανότητα του: α) να παράγει υψηλή ευκρίνεια συχνότητας σε χαμηλές συχνότητες και υψηλή ευκρίνεια χρόνου σε υψηλές συχνότητες για σήματα με μεγάλης διάρκειας χαμηλές συχνότητες και μικρής διάρκειας υψηλές συχνότητες και β) να μειώνει τον θόρυβο στα μη επεξεργασμένα αρχικά σήματα.

Ο κυματιδιακός μετασχηματισμός έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στην ανάλυση κυματομορφών στην διαγνωστική βλαβών οδοντοτροχών (γρاناζιών), ένσφαιρων τριβέων και άλλων μηχανολογικών συστημάτων. Οι Dalpiaz και Rivola εκτίμησαν και συνέκριναν την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία του κυματιδιακού μετασχηματισμού με άλλες τεχνικές επεξεργασίας σήματος κραδασμών [Dalpiaz and Rivola 1997]. Οι Baydar και Ball εφήρμοσαν το κυματιδιακό μετασχηματισμό σε ακουστικά σήματα και σήματα κραδασμών [Baydar and Ball 2003]. Ο Addison και οι συνεργάτες του διερεύνησαν [Addison et al. 2002] την χρήση χαμηλά ταλαντούμενων (low-oscillation) μιγαδικών κυματιδίων, κυματιδίων Mexican Hat και Morlet, ως εργαλεία εντοπισμού χαρακτηριστικών. Κυματίδια Haar χρησιμοποιήθηκαν στα [Xu and Yan 1991], [Tonshoff et al. 2003]. Οι Miller και Reichard χρησιμοποίησαν μια κυματιδιακή βάση ως φίλτρο χτένας για την αποδιαμόρφωση σημάτων κραδασμών [Miller et al. 1999]. Ένα γραφικό εργαλείο, οι κυματιδιακοί πολικοί χάρτες προτάθηκε στο [Boulaahbal et al. 1999] για την παρουσίαση του πλάτους και της φάσης του κυματιδίου και εφαρμόστηκε για διαγνωστική βλαβών οδοντοτροχών στο [Meltzer and Dien 2004]. Ο κυματιδιακός μετασχηματισμός συνδυασμένος με μετασχηματισμό Fourier για να ενισχύσει την ικανότητα εξαγωγής χαρακτηριστικών προτάθηκε στο [Wang and Gao 2003]. Στα [Yen and Lin 2000], [Zhang et al. 2005], [Toliyat et al. 2003], [Nikolaou and Antoniadis 2002b] μελετήθηκε ένας ανώτερος μετασχηματισμός, γνωστός ως μετασχηματισμός πακέτων κυματιδίων. Μια νέα μέθοδος γνωστή ως αναζήτηση βάσης (basis pursuit) βασιζόμενη σε ένα γενικό λεξικό πακέτων κυματιδίων εφαρμόστηκε για την ανάλυση σημάτων κραδασμών για διαγνωστική βλαβών ένσφαιρων τριβέων στο [Yang et al. 2005]. Δείχθηκε ότι η αναζήτηση βάσης έχει μερικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με άλλες συχνά χρησιμοποιούμενες κυματιδιακές προσεγγίσεις. Ο Lin και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν μια κυματιδιακή τεχνική αποθορυβοποίησης ορίου [Lin et al. 2004] για να εξάγουν την πληροφορία της βλάβης από τα σήματα με θόρυβο. Οι Nikolaou και Antoniadis χρησιμοποίησαν μια οικογένεια Μιγαδικών Μετατοπισμένων Κυματιδίων Morlet [Nikolaou and Antoniadis 2002a] για την κατασκευή ενός πίνακα από την απόλυτη τιμή του κυματιδιακού μετασχηματισμού για ένα σήμα κραδασμού. Μια πρόσφατη επιθεώρηση με πιο εκτενείς συζητήσεις και περισσότερες παραπομπές σε εφαρμογές του κυματιδιακού μετασχηματισμού για επεξεργασία σήματος στην παρακολούθηση κατάστασης μηχανής (machine condition monitoring) και στην διαγνωστική βλαβών (fault diagnostics) δίνεται στην αναφορά [Peng and Chu 2004].

1.2.2 Μέθοδοι Εντοπισμού Ρωγμών μέσω Επεξεργασίας Δυναμικής Απόκρισης Κατασκευών

1.2.2.1 Εισαγωγή

Η εμφάνιση ρωγμών σε κατασκευές, ειδικά σε αεροπορικές, δομικές και μηχανολογικές υποδομές, μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές αστοχίες με σοβαρά αποτελέσματα (απώλεια ανθρωπίνων ζώων, εκτενείς διακοπές παραγωγής, καθυστερήσεις κ.ά.). Ως συνέπεια, μια πληθώρα αναλυτικών, αριθμητικών και πειραματικών μεθοδολογιών, προσεγγίσεων και τεχνικών έχουν προταθεί για εντοπισμό ρωγμών, επικεντρωμένες σε διαφορετικούς τύπους κατασκευών συμπεριλαμβανομένων αεροσκαφών, τεχνικών υποδομών όπως γέφυρες και κτήρια, καθώς βέβαια και σε εργαστηριακά δείγματα, όπως οι δοκοί και οι πλάκες. Ενδεικτικές αντίστοιχες ανασκοπήσεις μπορούν να βρεθούν μεταξύ άλλων στις αναφορές [Sohn et al. 2004], [Doebling et al. 1998], [Dimarogonas 1996], [Randall 2002].

Η φθορά-ζημιά-βλάβη μπορεί να οριστεί συγκρίνοντας διαφορετικές αποκρίσεις ενός συστήματος, καθώς αυτές προκύπτουν από αλλαγές στην κατάστασή τους, που εισάγονται ως αποτέλεσμα της βλάβης [Sohn et al. 2004]. Ένα σύστημα ταξινόμησης κατάστασης βλάβης πέντε βημάτων προτάθηκε από τον [Rytter 1993], εξετάζοντας 1) την ύπαρξη, 2) την θέση, 3) τον τύπο, 4) το μέγεθος της βλάβης και 5) την δυνατότητα πρόγνωσης σχετικά με την υπολείπουσα χρήσιμη ζωή του συστήματος. Η εμφάνιση μιας ρωγμής σε μια κατασκευή εισάγει τοπική ευκαμψία και ως αποτέλεσμα, προκαλεί αλλαγές στη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής. Κατά συνέπεια, ένας μεγάλος αριθμός μεθοδολογιών για εντοπισμό ρωγμών έχει αναπτυχθεί, βασιζόμενες στον εντοπισμό αλλαγών σε ποικίλες δυναμικές ιδιότητες της κατασκευής όπως οι ιδιοσυχνότητες, η απόσβεση, οι ιδιομορφές, οι συναρτήσεις μεταφοράς κ.ά., καθώς αυτές οι μεταβολές προκύπτουν ως άμεση συνέπεια της βλάβης.

Η πιο εύκολη, απλή και πιο διάσημη μέθοδος για εντοπισμό βλάβης είναι η αναγνώριση αλλαγών στις ιδιοσυχνότητες. Σε μια σχετική πρωτοπόρα εργασία [Lifshitz and Rotem 1969], η χρήση μετρήσεων κραδασμών για εντοπισμό βλάβης προτείνεται. Μια μεθοδολογία για εντοπισμό βλάβης (damage detection), εντόπιση και ποσοτικοποίηση βασιζόμενη στις μετατοπίσεις των ιδιοσυχνοτήτων προτάθηκε στο [Cawley and Adams 1979]. Με σκοπό να ξεπεραστούν δυσκολίες που σχετίζονται με την διάγνωση ρωγμής βάσει των μετατοπίσεων των ιδιοσυχνοτήτων, μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν αλλαγές στο σχήμα των ιδιομορφών έχουν επίσης προταθεί. Μια πολύ ενδιαφέρουσα σύγκριση μεταξύ των μεθόδων που βασίζονται στις ιδιοσυχνότητες και των μεθόδων που βασίζονται στο σχήμα των ιδιομορφών για διάγνωση βλάβης σε κατασκευές δοκών παρουσιάζεται στο [Kim et al. 2003]. Οι αλλαγές στις ιδιομορφές είναι πολύ πιο ευαίσθητες, συγκριτικά με τις αλλαγές των ιδιοσυχνοτήτων. Όμως, μια ρωγμή μπορεί να μην επηρεάσει τις χαμηλές ιδιοσυχνότητες, που συνήθως μετρούνται. Λειτουργικές και περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, τα φορτία και οι οριακές συνθήκες μπορεί να προκαλέσουν αλλαγές που “κρύβουν” αυτές που προκύπτουν εξαιτίας της βλάβης [Farrar et al. 1994], [Cawley 1997].

Στην περίπτωση πολλαπλών ρωγμών, επιπλέον θέματα εμπλέκονται, όπως ο προσανατολισμός των ρωγμών σε σχέση με την καθεμία, αλλαγές στις ιδιομορφές και πολυπλοκότητα. Στο [Ostachowicz and Krawczuk 1991] η επίδραση των θέσεων και των

βαθών δύο ρωγμών επί της ιδιοσυχνότητας μιας πρόβολου δοκού αναλύονται. Η επίδραση του βάθους της ρωγμής και της θέσης στις ιδιομορφές μιας δοκού με δύο ρωγμές παρουσιάζεται στο [Ruotolo and Surace 1997]. Μεταξύ άλλων μερικές πολύ καλές ανασκοπήσεις της ανάλυσης κατασκευών με πολλαπλές ρωγμές παρουσιάζονται στα [Ruotolo and Surace 1997], [Sekhar 2008].

Οι περισσότερες από τις προαναφερθείσες εργασίες που αφορούν σε ρωγμές περιλαμβάνουν έναν συνδυασμό αναλυτικών και υπολογιστικών μοντέλων με πειραματικά αποτελέσματα [Alvandi and Cremona 2006], [Wang and Deng 1999], [Bamnios et al. 2002], [Chang and Chen 2005], [Douka et al. 2003], [Loutridis et al. 2004], [Hadjileontiadis et al. 2005a], [Sahin and Shenoι 2003]. Μεταξύ άλλων οι [Alvandi and Cremona 2006] και [Sahin and Shenoι 2003] εμπεριέχουν μοντέλα Πεπερασμένων Στοιχείων. Ως αποτέλεσμα των προηγμένων ικανοτήτων των μεθόδων μοντελοποίησης όπως η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM), η αντικατάσταση της πειραματικής διαδικασίας από κατάλληλους υπολογισμούς βασιζόμενους στη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων και από προσθήκη τυχαίου θορύβου έχει προταθεί για να προσομοιώσει την πειραματική διαδικασία [Luzzato 2003], [Andreus et al. 2007], [Zhong and Oyadiji 2007]. Επιπλέον, με σκοπό να οδηγηθεί σε μια πιο αξιόπιστη ανάλυση, η πρακτική της προσθήκης τεχνητού θορύβου στα αναλυτικά ή αριθμητικά αποτελέσματα έχει επίσης χρησιμοποιηθεί [Alvandi and Cremona 2006], [Hadjileontiadis et al. 2005b].

Σχετικά με τα αναλυτικά μοντέλα, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται ειδικότερα σε δοκούς με ανοιχτές ρωγμές, η περιοχή της ρωγμής αρχικά μοντελοποιήθηκε ως μια περιοχή που χαρακτηρίζεται από μειωμένη καμπτική δυσκαμψία [Rytter 1993], ενώ αργότερα, η δοκός προσομοιώθηκε θεωρώντας την περιοχή της ρωγμής ως ένα περιστροφικό ελατήριο [Wang and Deng 1999], [Bamnios et al. 2002], [Chang and Chen 2005], [Douka et al. 2003], [Loutridis et al. 2004], [Hadjileontiadis et al. 2005a]. Επιπλέον, ένα αναλυτικό μοντέλο έχει προταθεί [Douka et al. 2004] για να μοντελοποιήσει μια πλάκα με εγκάρσια ρωγμή. Όμως, θεωρώντας την πιο κατάλληλη προσέγγιση μοντελοποίησης για μια ρωγμή σε μια κατασκευή όπως μια δοκός, η εμφάνιση μιας ρωγμής προκαλεί την κατασκευή να επιδεικνύει μια έντονα μη γραμμική συμπεριφορά, εάν η ρωγμή διαδοχικά ανοίγει και κλείνει (“αναπνέει”) κατά την διάρκεια της ταλάντωσης. Με σκοπό να ληφθεί υπόψη μια αναπνέουσα ρωγμή, μοντέλα δοκών με διγραμμικά συστήματα ελατηρίου-μάζας έχουν αναπτυχθεί [Luzzato 2003], [Cheng et al. 1999], [Loutridis et al. 2005], [Douka and Hadjileontiadis 2005], [Guo and Billings 2007]. Τα μοντέλα αυτά κυρίως θεωρούν ότι η ρωγμή είναι είτε μονίμως ανοιχτή είτε μονίμως κλειστή. Όμως υπάρχει τουλάχιστον μία εφαρμογή ενός συνεχούς αναπνέοντος μοντέλου ρωγμής [Cheng et al. 1999]. Σχετικά με την φασματική επίδραση μιας αναπνέουσας ρωγμής, γενικά θεωρείται [Luzzato 2003], [Cheng et al. 1999] ότι η χρήση μοντέλων αναπνέουσας ρωγμής είναι απαραίτητη καθώς στην περίπτωση αυτή η μείωση της ιδιοσυχνότητας είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη μείωση για την περίπτωση όπου η ρωγμή είναι μονίμως ανοιχτή.

1.2.2.2 Κανονική Ορθογώνια Αποσύνθεση (Proper Orthogonal Decomposition)

Η Κανονική Ορθογώνια Αποσύνθεση (Proper Orthogonal Decomposition – POD), γνωστή επίσης ως Αποσύνθεση Karhunen-Loève (Karhunen-Loève Decomposition – KLD) προτάθηκε ανεξάρτητα από αρκετούς επιστήμονες όπως ο Karhunen [Karhunen 1946], ο Kosambi [Kosambi 1943], ο Loève [Loève 1945], ο Obukhov [Obukhov 1954] και ο Rougachev [Rougachev 1953] και αρχικά συνελήφθη ως ιδέα στα πλαίσια των συνεχών διαδικασιών 2^{ης} Τάξης. Όταν περιορίζεται σε μια πεπερασμένης διάστασης περίπτωση και σε μερικούς πρώτους όρους, η μέθοδος POD είναι ισοδύναμη με την Ανάλυση Κύριας Συνιστώσας (Principal Component Analysis – PCA). Η προαναφερθείσα μεθοδολογία εγκαινιάστηκε με την δουλειά του Pearson [Pearson 1901] ως ένας τρόπος προσέγγισης επιπέδων με ορθογώνια ελάχιστα τετράγωνα αλλά είχε προταθεί επίσης από τον Hotelling [Hotelling 1933]. Υπογραμμίζεται ότι η μέθοδος εμφανίζεται με ποικίλα πρόσωπα στην σχετική βιβλιογραφία και είναι γνωστή με διάφορα ονόματα ανάλογα με την γνωστική περιοχή της εφαρμογής και ειδικότερα ως PCA στην βιβλιογραφία της Στατιστικής, ως Εμπειρική Ορθογώνια Συνάρτηση (Empirical Orthogonal Function) στην Ωκεανολογία και στην Μετεωρολογία και ως Ανάλυση Παραγόντων (Factor Analysis) στην Ψυχολογία και στα Οικονομικά. Υπάρχουν πολλές αναφορές όπου γίνεται λεπτομερής ανάλυση της ισοδυναμίας των POD, PCA και KLD και της σύνδεσής τους με την Αποσύνθεση Μοναδικής Τιμής (Singular Value Decomposition –SVD).

Η εύρεση των μορφών (modes) της μεθόδου POD απαιτεί ένα μεγάλο αριθμό υπολογισμών και για το λόγο αυτό, τεχνική έμεινε ουσιαστικά αχρησιμοποίητη μέχρι τα μέσα του 20^{ου} αιώνα. Δραστικές αλλαγές επήλθαν με την εμφάνιση ισχυρών υπολογιστικών συστημάτων. Η μέθοδος POD έχει πλέον γίνει δημοφιλής και χρησιμοποιείται σε ποικίλα ερευνητικά πεδία. Για παράδειγμα, αρκετοί ερευνητές χρησιμοποιούν την μέθοδο POD στο πλαίσιο της τύρβης για την εξαγωγή συνεκτικών δομών. Οι Wax και Kailath πρότειναν την χρήση της για τον εντοπισμό του αριθμού των σημάτων σε μια πολυκάναλη χρονοσειρά [Wax and Kailath 1985]. Στην παραπομπή [Newman and Krishnaprasad 1998] οι μορφές μιας χημικής διαδικασίας αντίδρασης διάχυσης απαθανατίζονται μέσω της KLD και εξακριβώνεται η δυναμική συμπεριφορά της. Οι Bayly et al. χρησιμοποίησαν την KLD [Bayly et al. 1995] για να περιγράψουν ποσοτικές αλλαγές στην πολυπλοκότητα του χώρου κατά την διάρκεια παρατεταμένων επεισοδίων κοιλιακής μαρμαρυγής. Ο Eprueanu [Eprueanu et al. 2001] ανέκτησε μοντέλα περιορισμένης τάξης ασταθών τυρβωδών ροών. Οι Barnston και Ropelewski χρησιμοποίησαν την μέθοδο [Barnston and Ropelewski 1992] για πρόβλεψη στη μετεωρολογία. Οι Leen et al. εισήγαγε την μέθοδο ως ένα μέσο ταξινόμησης των δεδομένων ομιλίας [Leen et al. 1990].

Οι πρώτες εφαρμογές της POD στο πεδίο της Δυναμικής Κατασκευών χρονολογείται πίσω στο 1990. Οι Fitzsimons και Rui χρησιμοποίησαν την μέθοδο για τον καθορισμό μοντέλων μικρών διαστάσεων διανεμημένων συστημάτων [Fitzsimons and Rui 1993]. Ο Cusumano και οι συνσυγγραφείς [Cusumano et al. 1994] εκμεταλλεύτηκαν την μέθοδο για μελέτη διάστασης (dimensionality). Οι Kreuzer και Kust χρησιμοποίησαν την POD [Kreuzer and Kust 1996] για τον έλεγχο των αυτοδιεγειρόμενων ταλαντώσεων μακρών στρεπτικών

χορδών. Οι Azeez και Vakakis εφάρμοσαν την μέθοδο για να δημιουργήσουν μοντέλα μικρών διαστάσεων ενός κρεμαστού στροβίλου [Azeez and Vakakis 1997].

Η POD πλέον επιδεικνύει διάφορες εφαρμογές στην Δυναμική Κατασκευών όπως ο ενεργός έλεγχος, τα αεροελαστικά προβλήματα, ο εντοπισμός ρωγμών, ο δυναμικός χαρακτηρισμός, η ενημέρωση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, η ανάλυση μητρών μάζας και δυσκαμψίας, τα συστήματα πολλαπλών σωμάτων, η μείωση της τάξης μοντέλων, επικύρωση αισθητήρων και στοχαστική δυναμική κατασκευών.

1.2.2.3 Μορφολογική Επεξεργασία Σήματος (Morphological Signal Processing)

Με τον όρο “**Μορφολογική Επεξεργασία Σήματος**” ορίζεται ένα ευρύ και συνεκτικό σύνολο που απαρτίζεται από θεωρητικές έννοιες, μαθηματικά εργαλεία ανάλυσης σήματος, μη γραμμικοί τελεστές σήματος, μεθοδολογίες σχεδιασμού και συστήματα εφαρμογών, τα οποία βασίζονται ή σχετίζονται με την Μαθηματική Μορφολογία (Mathematical Morphology). Η Μαθηματική Μορφολογία αποτελεί ένα σύνολο-δίκτυο θεωρητικής μεθοδολογίας για επεξεργασία εικόνας. Η Μαθηματική Μορφολογία αποσκοπεί αρχικά στην ποσοτική περιγραφή της γεωμετρικής δομής των σχημάτων. Οι μαθηματικές της ρίζες προέρχονται από την Θεωρία Συνόλων, την Άλγεβρα Πλεγμάτων, την Κυρτή Ανάλυση και την Ολοκληρωτική και Στοχαστική Γεωμετρία. Εισήχθη κυρίως από τους G. Matheron [Matheron 1975] και J. Serra [Serra 1982] στην δεκαετία του '60. Κάποια πρώτα εγχειρήματα μπορούν να βρεθούν στην δουλειά κάποιων άλλων ερευνητών που χρησιμοποίησαν Κυτταρικά Αυτόματα και Λογική Boole/Ορίου για την ανάλυση Δεδομένων Δυαδικών Εικόνων στην δεκαετία του '50 και '60. Η μαθηματική Μορφολογία τυποποίησε τα πρώτα εγχειρήματα και πρόσθεσε ένα σημαντικό αριθμό νέων εννοιών και τελεστών εικόνων. Την δεκαετία του '70 επεκτάθηκε σε εικόνες γκρι κλίμακας. Αρχικά η Μαθηματική Μορφολογία εφαρμόστηκε για την ανάλυση εικόνων σε γεωλογικές και βιολογικές εφαρμογές. Όμως το πλούσιο θεωρητικό υπόβαθρο της, η αποδοτικότητα των αλγορίθμων, η εύκολη εφαρμογή της σε ειδικές υπολογιστικές συσκευές και η καταλληλότητα εφαρμογής της σε πολλά θέματα γεωμετρικής φύσης έδωσαν ώθηση προς την ευρύτατη διάδοση και υιοθέτηση της από πλείστες ακαδημαϊκές και βιομηχανικές ομάδες ως μια από τις κυρίαρχες μεθοδολογίες Ανάλυσης Εικόνας. Πολλές από τις ερευνητικές ομάδες επέκτειναν την θεωρία και τις εφαρμογές της Μαθηματικής Μορφολογίας. Ως αποτέλεσμα, η Μαθηματική Μορφολογία σήμερα προσφέρει πολλά θεωρητικά εργαλεία και αλγορίθμους και εμπνέει νέες κατευθύνσεις σε πολλές ερευνητικές περιοχές που εντάσσονται στα πεδία της Επεξεργασίας Σήματος, της Επεξεργασίας Εικόνας, της Τεχνητής Όρασης και της Αναγνώρισης Προτύπων.

Όπως υποδηλώνεται από την ετυμολογία της λέξης (Μορφ- + -ο- + -λογία, Μελέτη/Ανάλυση της Μορφής/Σχήματος), η Μορφολογική Επεξεργασία Σήματος μπορεί να ποσοτικοποιήσει το σχήμα, το μέγεθος και άλλες πτυχές της γεωμετρικής δομής των σημάτων που εξετάζονται ως οπτικά αντικείμενα, με τρόπο που συμφωνεί με την ανθρώπινη διαίσθηση και αντίληψη. Αντίθετα, τα παραδοσιακά εργαλεία των Γραμμικών Συστημάτων και η Ανάλυση Συχνοτήτων (Fourier) παρουσιάζουν εξαιρετικά περιορισμένη εφαρμογή στην επίλυση γεωμετρικής φύσης προβλημάτων καθώς δεν θίγουν τα θεμελιώδη ζητήματα της ποσοτικοποίησης του σχήματος, του μεγέθους και άλλων γεωμετρικών δομών των σημάτων

και κατά συνέπεια μπορεί να αλλοιώσουν σημαντικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων/εικόνων. Κατά συνέπεια τα Μορφολογικά Συστήματα είναι καταλληλότερα από τα Γραμμικά Συστήματα για Ανάλυση Σχημάτων. Επίσης προσφέρουν απλές και αποτελεσματικές λύσεις σε ποικίλα μη γραμμικά προβλήματα όπως η καταστολή μη Κανονικού (non Gaussian) θορύβου και ο υπολογισμός περιβαλλουσών (envelope estimation). Επιπροσθέτως, σχετίζονται στενά με μια άλλη κατηγορία Μη Γραμμικών Συστημάτων, τον Διάμεσο Τελεστή, τον τελεστή Τάξης και τον Τελεστή Στοίβας που υπερτερούν των γραμμικών συστημάτων στην περιστολή μη κανονικού θορύβου και στην ενίσχυση σήματος με γεωμετρικούς περιορισμούς. Οι Τελεστές Τάξης και Στοίβας μπορούν να αναπαρασταθούν με όρους στοιχειωδών Μορφολογικών Τελεστών. Τα παραπάνω σε συνδυασμό με το πλούσιο μαθηματικό υπόβαθρο της Μαθηματικής Μορφολογίας, καθιστούν την Μορφολογική Επεξεργασία Σήματος ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την μελέτη και επίλυση πολλών προβλημάτων της Ανάλυσης Εικόνας και του Μη Γραμμικού Φιλτραρίσματος.

Ο Chu χρησιμοποίησε τους συνδυασμένους Μορφολογικούς Τελεστές [Chu and Delp 1989], Ανοιγμα και Κλείσιμο για την διόρθωση της γραμμής αναφοράς (baseline) και για την συμπίεση του θορύβου σε ηλεκτροεγκεφαλογραφήματα (ElectroEncephaloGrams - EEGs). Η απόδοση του μορφολογικού φίλτρου ήταν καλή όμως ο αλγόριθμος προκαλούσε διαταραχές στα χαρακτηριστικά σημεία του ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος. Το γεγονός αυτό δυσχεραίνει τον αξιόπιστο εντοπισμό των αξιοσημείωτων συστατικών ή των διαστημάτων τους κατά την μετέπειτα επεξεργασία των ηλεκτροεγκεφαλογραφημάτων.

Ο Fu χρησιμοποίησε την Μορφολογική Ανάλυση σε συνδυασμό με Συναρτήσεις Εντροπίας για την ταξινόμηση αυτοδιεγερόμενων ταλαντώσεων κατά την κυλινδρική κατακόρυφη λείανση σε εργαλειομηχανή λείανσης [Fu et al. 1996]. Εφάρμοσε τους Μορφολογικούς Τελεστές Διαστολής και Διάβρωσης στο φάσμα του σήματος με στόχο την αφαίρεση των μικρών διαταραχών της κλίσης που εμφανίζονται στις κορυφώσεις του πλάτους και του θορύβου μεταξύ των κορυφώσεων αυτών ενώ παράλληλα οι κορυφές του φάσματος διατηρούνται ανέπαφες.

Ο Matsopoulos παρουσίασε μια αυτόματη μέθοδο, η οποία χρησιμοποιεί τους Μορφολογικούς Τελεστές για να συσχετίσει και να απομονώσει το κεφάλι του εμβρύου από μια εικόνα υπερήχων [Matsopoulos and Marshall 1994]. Παράλληλα υπολογίζει την διάμετρο του κεφαλιού του εμβρύου και χρησιμοποιεί την μέτρηση αυτή ως χρήσιμο δείκτη της εμβρυακής ηλικίας του βρέφους.

Ο Nishida εφήρμοσε τα μορφολογικά φίλτρα στην μοναδιαία σάρωση (single sweep) δεδομένων Βιοματικών Δυναμικών-ΒΔ (Event-Related Potentials – ERPs) και ιδιαίτερα των Ακουστικών Προκλητών Δυναμικών (Auditory Evoked Potentials - AEP) [Nishida et al. 1995]. Μελέτησε την μερική κυματομορφή του Ακουστικού Προκλητού Δυναμικού P300 και χρησιμοποίησε το μορφολογικό φίλτρο για την μείωση του θορύβου.

Ο Nishida εφήρμοσε τους βασικούς μορφολογικούς τελεστές για την επεξεργασία πονοσχετιζόμενων Σωματοαισθητικών Προκλητών Δυναμικών (pain-related Somatosensory Evoked Potentials – pain SEPs) [Nishida et al. 1997]. Στόχος του ήταν η βέλτιστη εξαγωγή των χρήσιμων συστατικών του σήματος και ειδικότερα η βελτίωση του λόγου Σήματος προς

Θόρυβο (SNR). Η μέθοδος δοκιμάστηκε τόσο σε προσομοιωμένα όσο και σε πραγματικά σήματα.

Ο Nishida εφάρμοσε μορφολογικά φίλτρα σε ηλεκτροεγκεφαλογραφήματα (electroencephalograms - EEGs) με στόχο την εξαγωγή των κορυφών των σημάτων από τον παρασιτικό θόρυβο των μετρήσεων [Nishida et al. 1999].

Ο Ping ασχολήθηκε με την αφαίρεση του μη κανονικού θορύβου από δυαδικές εικόνες εγγράφων [Ping and Lihui 2001]. Η οπτική αναγνώριση χαρακτήρων σε φωτοτυπίες, τηλεομοίτυπα και χειρόγραφα κείμενα είναι εξαιρετικά δύσκολη λόγω της ύπαρξης θορύβου. Στην εργασία του ο Ping χρησιμοποιεί τροποποιημένο κατευθυνόμενο μορφολογικό φίλτρο για να περιορίσει τον μη κανονικό θόρυβο τύπου “αλατιού και πιπεριού” που βρίσκεται διασκορπισμένος στην εικόνα των χαρακτήρων και για να εξομαλύνει τα περιγράμματα των ιχνών, διατηρώντας τα αρχικά ίχνη και την κατεύθυνση των χαρακτήρων.

Ο Sun [Sun et al. 2002] χρησιμοποίησε τα μορφολογικά φίλτρα για την προεπεξεργασία ηλεκτροκαρδιογραφημάτων. Βασιζόμενος στην εργασία του Chu [Chu and Delp 1989] χρησιμοποίησε μετασχηματισμένους Μορφολογικούς Τελεστές για την διόρθωση της γραμμής αναφοράς και για την συμπίεση του θορύβου με την ελάχιστη παραμόρφωση των σημάτων.

Ο Nikolaou εφάρμοσε πρώτος τους Μορφολογικούς Τελεστές για την κατασκευή της Περιβάλλουσας Κρουστικού Τύπου Περιοδικών Σημάτων Κραδασμών προερχόμενων από μετρήσεις κραδασμών σε ένσφαιρους τριβείς [Nikolaou and Antoniadis 2003]. Εξέτασε την επίδραση του είδους του Μορφολογικού Τελεστή καθώς και του Δομικού Στοιχείου στο σχήμα της περιβάλλουσας του σήματος. Χρησιμοποιήθηκε επίπεδο δομικό στοιχείο Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε προσομοιωμένα και βιομηχανικά σήματα με πολύ καλά αποτελέσματα.

Ο Sun ανέπτυξε μια νέα τεχνική μετασχηματισμού χρησιμοποιώντας μορφολογική παράγωγο πολλαπλής κλίμακας (Multiscale Morphological Derivative – MMD) για τον εντοπισμό των σημείων αναφοράς των χαρακτηριστικών κυματομορφών ηλεκτροκαρδιογραφημάτων (ECG) [Sun et al. 2005]. Εφαρμόζοντας τον προτεινόμενο μετασχηματισμό σε συγκεκριμένη τιμή της κλίμακας, περιορίζεται η ευαισθησία του θορύβου ενώ δεν χρειάζεται η σάρωση όλης της κλίμακας για την εύρεση των ιδιόμορφων σημείων.

Ο Xua εισήγαγε μια μέθοδο εύρεσης αιχμών για τον διαχωρισμό των επιληπτικών αιχμών από τον περιβάλλον θόρυβο [Xua et al. 2007]. Χρησιμοποίησε ένα μέσης βαρύτητας συνδυασμό των Τελεστών Άνοιγμα-Κλείσιμο και Κλείσιμο-Άνοιγμα για τον περιορισμό των στατιστικών αποκλίσεων του πλάτους του σήματος. Στη συνέχεια ανάλογα με το χαρακτηριστικό του αιχμηρού συστατικού, κατασκευάζονται δομικά στοιχεία από 2 παραβολές και χρησιμοποιείται ένα νέο κριτήριο για την βελτιστοποίησή τους. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε φυσιολογικά και επιληπτικά ηλεκτροεγκεφαλογραφήματα (EEGs).

Ο Hao βασιζόμενος στις έννοιες της Μορφολογικής Κυματιδιακής Αποσύνθεσης (Morphological Wavelet Decomposition) παρουσίασε μια μέθοδο Μορφολογικής Κυματιδιακής Αποσύνθεσης μη Αποδεκατισμού (Morphological Undecimated Wavelet Decomposition) [Hao and Chu 2009]. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε σε σήματα κραδασμών με στόχο τον περιορισμό του θορύβου και την εξαγωγή των κρουστικών χαρακτηριστικών

σημάτων ένσφαιρων τριβέων με βλάβη. Η μέθοδος εξαγωγής της περιβάλλουσας συγκρίνεται με τον Μορφολογικό Κυματιδιακό Μετασχηματισμό και με τον κλασικό Κυματιδιακό Μετασχηματισμό και παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα.

Ο Wang [Wang et al. 2009] προσπάθησε να επεκτείνει την εργασία του Nikolaou [Nikolaou and Antoniadis 2003]. Χρησιμοποίησε ένα μέσης βαρύτητας συνδυασμό των Τελεστών Άνοιγμα-Κλείσιμο και Κλείσιμο-Άνοιγμα για τον περιορισμό των στατιστικών αποκλίσεων του πλάτους των σημάτων ενώ παράλληλα κατασκεύασε ένα δομικό στοιχείο βασιζόμενος στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κρουστικών συστατικών των σημάτων φθαρμένων ένσφαιρων τριβέων. Μεταχειρίστηκε ένα νέο κριτήριο για την βελτιστοποίηση του δομικού στοιχείου και εφήρμοσε την μέθοδο σε προσομοιωμένα και πραγματικά σήματα.

Ο Li χρησιμοποίησε την Μαθηματική Μορφολογία για τον εντοπισμό ορίων σε εικόνες γκρι κλίμακας [Li et al. 2009]. Εφήρμοσε την μέθοδο που προτείνει για την επεξεργασία εικόνων κυττάρων γαστρικών όγκων.

Ο Mak συνδύασε ένα προεκπαιδευμένο κυματιδιακό δίκτυο Gabor με την μορφολογική επεξεργασία εικόνας με στόχο την αυτόματη διάγνωση φθορών και ελαττωμάτων σε υφάσματα [Mak et al. 2009]. Η μέθοδος του δοκιμάζεται σε μια ευρεία ποικιλία εικόνων ομογενών υφασμάτων με διάφορα τυπικά ελαττώματα και παρουσιάζει καλά αποτελέσματα.

Ο Heidenreich παρουσίασε μια μη παραμετρική προσέγγιση για την εξαγωγή χρονοσυχνοτικών υπογραφών πηγών με την χρήση μορφολογικής επεξεργασίας εικόνας [P.Heidenreich et al. 2009]. Με την μέθοδο αυτή καθίσταται εφικτή η εκτίμηση του αριθμού των πηγών, της υπογραφής-κυματομορφής των σημάτων καθώς και της χωρικής προέλευσής τους.

Ο Yun χρησιμοποίησε την μορφολογική επεξεργασία εικόνας σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους αντιστάθμισης φωτισμού με στόχο την αναγνώριση προσώπων σε περιλήψεις τηλεοπτικών (βίντεο) προγραμμάτων [Yun et al. 2009].

Ο Belavy παρουσίασε έναν αλγόριθμο για την ποσοτικοποίηση της διαμόρφωσης κατά πλάτος ηλεκτρομυογραφικού (ElectroMyoGrafic – EMG) σήματος χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση Μαθηματικής Μορφολογίας [Belavy et al. 2009], προσπαθώντας να υπάρξει μια καλύτερη κατανόηση των τονικών και φασικών συστατικών τέτοιου είδους σημάτων που αντανακλούν την συμπεριφορά του Κεντρικού Νευρικού Συστήματος.

1.2.3 Μέθοδοι Αυτόματης Διάγνωσης Βλαβών Περιστρεφόμενου Μηχανολογικού Εξοπλισμού

1.2.3.1 Εισαγωγή

Η διαγνωστική βλαβών μηχανών είναι μια διαδικασία απεικόνισης της πληροφορίας που αποκτάται από τον χώρο μετρήσεων (measurement space) και/ή των χαρακτηριστικών του χώρου χαρακτηριστικών (feature space) σε βλάβες μηχανής στο πεδίο βλαβών (fault space). Η διαδικασία αυτή απεικόνισης ονομάζεται αναγνώριση προτύπων (pattern recognition) και παραδοσιακά πραγματοποιείται χειροκίνητα με χρήση βοηθητικών γραφικών εργαλείων όπως το γράφημα φάσματος ισχύος, το γράφημα φάσματος φάσης, το γράφημα cepstrum, το γράφημα φάσματος AR, το φασματογράφημα, το κυματιδιακό

φασματογράφημα χρόνου - κλίμακας, το διάγραμμα κυματιδιακής φάσης κλπ. Εντούτοις, η χειροκίνητη αναγνώριση προτύπων απαιτεί εξειδίκευση στην συγκεκριμένη περιοχή της διαγνωστικής εφαρμογής. Κατά συνέπεια, απαιτείται ειδικά εκπαιδευμένο και εξειδικευμένο προσωπικό. Συνεπώς, η αυτόματη αναγνώριση προτύπων είναι ιδιαίτερα επιθυμητή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί ταξινομώντας τα σήματα με βάση την πληροφορία και/ή τα χαρακτηριστικά που εξάγονται από τα σήματα. Οι δύο βασικές κατευθύνσεις των προσεγγίσεων διάγνωσης βλαβών μηχανών είναι οι στατιστικές προσεγγίσεις και οι προσεγγίσεις τεχνητής νοημοσύνης. Η διαγνωστική μηχανών με έμφαση σε πρακτικές εφαρμογές συζητήθηκε στο [Williams et al. 1994].

1.2.3.2 Στατιστικές Προσεγγίσεις

Μια συνήθης μέθοδος διάγνωσης βλαβών είναι η περιγραφή του προβλήματος ως ένα πρόβλημα έλεγχου υπόθεσης με μηδενική υπόθεση H_0 : Σφάλμα Α είναι παρόν ενάντια στην εναλλακτική υπόθεση H_1 : Σφάλμα Α δεν είναι παρόν. Σε ένα συμπαγές πρόβλημα διάγνωσης βλάβης, οι υποθέσεις H_0 και H_1 εκφράζονται σε μια σχέση χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα μοντέλα και κατανομές ή αντίστοιχα τις παραμέτρους τους. Η μηδενική υπόθεση H_0 γίνεται αποδεκτή ή απορρίπτεται με στατιστικούς ελέγχους. Παραδείγματα στατιστικών ελέγχων για διάγνωση βλαβών παρουσιάζονται στα [Ma and Li 1995], [Kim et al. 2001], [Sohn et al. 2002]. Πρόσφατα, ένα πλαίσιο για διάγνωση βλαβών, (δομημένοι έλεγχοι υπόθεσης) προτάθηκε για συμβατική αντιμετώπιση περίπλοκων πολλαπλών βλαβών διαφόρων τύπων [Nyberg 2001].

Η Ανάλυση Συστάδας (Cluster Analysis), ως μέθοδος στατιστικής ανάλυσης πολλών μεταβλητών, είναι μια προσέγγιση στατιστικής ταξινόμησης που ομαδοποιεί σήματα σε διαφορετικές κατηγορίες βλάβης με βάση την ομοιότητα των χαρακτηριστικών που έχουν. Εφαρμογή της Ανάλυσης Συστάδας στην διάγνωση βλαβών μηχανολογικού εξοπλισμού συζητήθηκε στα [Skormin et al. 1999], [Artes et al. 2003]. Η ομαδοποίηση των σημάτων βασίζεται σε μέτρα απόστασης ή μέτρα ομοιότητας μεταξύ δύο σημάτων [Schurmann 1996]. Συχνά χρησιμοποιούμενα μέτρα απόστασης είναι η ευκλείδεια απόσταση, η απόσταση Mahalanobis, η απόσταση Kullback-Leibler και η απόσταση Bayesian. Στα [Ding et al. 1991], [Staszewski et al. 1997], [Goumas et al. 2002], [Lou and Loparo 2004] παρουσιάζονται μερικές εφαρμογές με χρήση αυτών των μέτρων απόστασης για διαγνωστική βλαβών. Ο Ding και οι συνεργάτες του εισήγαγαν ένα νέο μέτρο απόστασης, την απόσταση πηλίκου, για διάγνωση βλαβών [Ding et al. 1991]. Ο Pan και οι συνεργάτες του πρότειναν μια διευρυμένη συμμετρική απόσταση Itakura για σήματα σε χρονοσυχνοτικές απεικονίσεις [Pan et al. 2003] όπως οι κατανομές Wigner-Ville. Ο συντελεστής διανύσματος συσχέτισης χαρακτηριστικών είναι επίσης ένα μέτρο ομοιότητας [Lou and Loparo 2004]. Μια πλειάδα αλγορίθμων συστάδας είναι διαθέσιμοι [Webb 2002], όπως ο αλγόριθμος κοντινότερου γείτονα (nearest neighbour) [Mechefske and Mathew 1992]. Το όριο των δύο παρακαείμενων ομάδων καθορίζεται από την χρησιμοποιούμενη συνάρτηση διάκρισης (discriminant). Μια γραμμική κλαδική συνάρτηση διάκρισης χρησιμοποιήθηκε για ταξινόμηση κατάστασης ένσφαιρων τριβέων στο [Sun et al. 2004].

Τα Hidden Markov Models χρησιμοποιούνται επίσης για ταξινόμηση βλαβών. Οι πρώτες εφαρμογές των HMM στην ταξινόμηση βλαβών και στη διαγνωστική μεταχειρίστηκαν τις πραγματικές καταστάσεις βλάβης μηχανής και την κανονική κατάσταση μηχανής ως κρυμμένες καταστάσεις των HMM [Bunks et al. 2000], [Ying et al. 2000]. Δύο πρόσφατες εφαρμογές των HMM στην ταξινόμηση βλαβών χρησιμοποιούν ένα HMM με κρυμμένες καταστάσεις που δεν έχουν φυσική έννοια για κάθε κατάσταση μηχανής (κανονική και με σφάλμα) [Ge et al. 2004], [Li et al. 2005]. Τα εκπαιδευμένα HMMs χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για να αποκωδικοποιήσουν μια παρατήρηση με μια άγνωστη κατάσταση μηχανής για ταξινόμηση σφάλματος. Οι Xu και Ge παρουσίασαν ένα ευφές σύστημα διάγνωσης βλαβών βασισμένο σε ένα HMM [Xu and Ge 2004]. Ο Ye και οι συνεργάτες του [Ye et al. 2002] μελέτησαν μια εφαρμογή δισδιάστατων HMM βασισμένα σε ανάλυση χρόνου-συχνότητας για διάγνωση βλαβών.

1.2.3.3 Προσεγγίσεις Τεχνητής Νοημοσύνης

Οι τεχνικές Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence) εφαρμόζονται με ταχείς ρυθμούς στην διάγνωση βλαβών. Στην πράξη, η εφαρμογή τους δεν είναι εύκολη εξαιτίας της έλλειψης αποτελεσματικών διαδικασιών για την απόκτηση δεδομένων εκπαίδευσης και συγκεκριμένης γνώσης, που είναι απαραίτητα για την εκπαίδευση των μοντέλων. Μέχρι στιγμής, οι περισσότερες εφαρμογές στην βιβλιογραφία χρησιμοποιούν πειραματικά δεδομένα για την εκπαίδευση μοντέλων. Στη βιβλιογραφία, οι δύο δημοφιλείς AI τεχνικές για διάγνωση μηχανών είναι τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks - ANNs) και τα Έμπειρα Συστήματα (Expert Systems - ESs). Οι AI τεχνικές περιλαμβάνουν επίσης συστήματα ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic Systems), νευρωνικά δίκτυα ασαφούς λογικής (Fuzzy-Neural Networks – FNNs), νευρωνικά-ασαφή συστήματα (Neural-Fuzzy Systems) και εξελικτικούς αλγορίθμους (Evolutionary Algorithms – EAs). Μια ανασκόπηση των πρόσφατων εξελίξεων στις εφαρμογές των τεχνικών AI για την διαγνωστική βλαβών στάτορα επαγωγικών μηχανών δόθηκε από τον Siddique και τους συνεργάτες του [Siddique et al. 2003].

Τα ANN είναι υπολογιστικά μοντέλα που μιμούνται την δομή του ανθρώπινου εγκεφάλου. Η δομή των εμπροσθοτροφοδοτούμενων Νευρωνικών δικτύων (FeedForward Neural Network – FFNN) είναι η πιο διαδεδομένη δομή νευρωνικού δικτύου στην διάγνωση βλαβών μηχανής [Roemer et al. 1996], [Larson et al. 1997], [Li et al. 2000], [Fan and Li 2002]. Ένα ειδικό FFNN, ο πολυεπίπεδος νευρώνας με αλγόριθμο εκπαίδευσης οπισθοδιάδοσης, είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μοντέλο νευρωνικών δικτύων για αναγνώριση προτύπων και ταξινόμηση, και κατά συνέπεια για διάγνωση βλαβών μηχανών [Yang et al. 2002], [Paya et al. 1997], [Samanta and Al-Balushi 2003]. Τα νευρωνικά δίκτυα οπισθοδιάδοσης (Backpropagation Neural Networks) έχουν όμως δύο βασικούς περιορισμούς: (α) δυσκολία στον καθορισμό της δομής του δικτύου και του αριθμού των κόμβων, (β) αργή σύγκλιση της διαδικασίας εκπαίδευσης. Ένα νευρωνικό δίκτυο κλιμακωτής συσχέτισης (Cascade Correlation Neural Network - CCNN) δεν χρειάζεται αρχικό καθορισμό της δομής του νευρωνικού δικτύου και του αριθμού των κόμβων. Τα CCNN μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις όπου προτιμάται η σύγχρονη (on-line) εκπαίδευση. Ο

Spoerre [Spoerre 1997] εφήρμοσε τα CCNN στην ταξινόμηση βλαβών ένσφαιρων τριβέων και έδειξε ότι μπορούν να καταλήξουν στην χρήση της ελάχιστης δομής δικτύου για αναγνώριση βλάβης με ικανοποιητική ακρίβεια. Άλλα μοντέλα νευρωνικών δικτύων που εφαρμόστηκαν στη διαγνωστική μηχανών είναι τα νευρωνικά δίκτυα με συνάρτηση ακτινωτής συνάρτησης (Radial Basis Function Neural Networks) [Baillie and Mathew 1994], τα επαναλαμβανόμενα νευρωνικά δίκτυα (Recurrent Neural Networks) ([Dong et al. 1997], [Li and Huang 1999]) και τα νευρωνικά δίκτυα μετρούμενης διάδοσης (Counter Propagation Neural Network). Τα παραπάνω μοντέλα ANN συνήθως χρησιμοποιούν αλγόριθμους επιβλεπόμενη εκμάθησης. Οι Wang και Too [Wang and Too 2002], εφήρμισαν μη επιβλεπόμενα νευρωνικά δίκτυα (Unsupervised Neural Networks), αυτό-οργανώμενους χάρτες (Self-Organising Maps – SOM) και κβάντιση διανύσματος εκμάθησης (Learning Vector Quantization) στην διαγνωστική βλαβών περιστρεφόμενων μηχανών. Ο Tallam και οι συνεργάτες του πρότειναν αλγορίθμους αυτό-ανάθεσης (self-commissioning) και σύγχρονης εκπαίδευσης (on-line training) για FFNN, εφαρμόζοντας τους για διάγνωση βλάβης ηλεκτρικής μηχανής. Ο Sohn και οι συνεργάτες [Sohn et al. 2002] χρησιμοποίησαν ένα αυτό-συνεργαζόμενο (Autoassociative) νευρωνικό δίκτυο για να ξεχωρίσει το αποτέλεσμα της βλάβης από το περιβάλλον και τις διακυμάνσεις των κραδασμών του συστήματος. Μετά μια διαδοχική δοκιμή λόγου πιθανοτήτων (sequential probability ratio test) πραγματοποιήθηκε σε κανονικοποιημένα χαρακτηριστικά για κατάταξη βλάβης.

Σε αντίθεση με τα νευρωνικά δίκτυα, τα οποία μαθαίνουν γνώση εκπαιδευόμενα σε παρατηρημένα δεδομένα με γνωστές εισόδους και εξόδους, τα Έμπειρα Συστήματα χρησιμοποιούν έμπειρη γνώση σε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα με μια αυτόματη μηχανή εξαγωγής συμπερασμάτων για την πραγματοποίηση συλλογισμού για την επίλυση προβλημάτων. Τρεις βασικές μέθοδοι συλλογιστικής για έμπειρα συστήματα που χρησιμοποιούνται στην περιοχή της διαγνωστικής μηχανολογικού εξοπλισμού είναι ο συλλογισμός βάσει κανόνων (real-based reasoning) [Yoon et al. 1993], [Hansen and Pickles 1994], [Baig and Sayeed 1998], ο συλλογισμός βάσει περίπτωσης (case-based reasoning) [Wen et al. 2003], [Bengtsson et al. 2004] και η συλλογιστική βάσει μοντέλου (model-based reasoning) [Araiza et al. 2002]. Μια άλλη συλλογιστική μέθοδος, η αρνητική συλλογιστική, παρουσιάστηκε στην μηχανολογική διαγνωστική από τον Hall και τους συνεργάτες του [Hall et al. 1997]. Ο Stanek και οι συνεργάτες του [Stanek et al. 2001] συνέκριναν τις συλλογιστικές βάσει περίπτωσης και βάσει μοντέλου και πρότειναν τον συνδυασμό τους με σκοπό μια χαμηλού κόστους λύση για εκτίμηση της κατάστασης μηχανής και για διάγνωση. Σε αντίθεση με άλλες συλλογιστικές μεθόδους, η αρνητική συλλογιστική αντιμετωπίζει αρνητική πληροφορία, η οποία με την απουσία της ή με την έλλειψη συμπτωμάτων είναι ενδεικτική εποικοδομητικών συμπερασμάτων.

Ο συνδυασμός των έμπειρων συστημάτων και των νευρωνικών δικτύων βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση τους. Ο Silva και οι συνεργάτες του [Silva et al. 1998] χρησιμοποίησαν δύο νευρωνικά δίκτυα, αυτοοργανώμενους χάρτες και θεωρία προσαρμοστικής διέγερσης (Adaptive Resonance Theory – ART), συνδυασμένες σε ένα έμπειρο σύστημα βασιζόμενο στην εξίσωση ζωής εργαλείων του Taylor για να ταξινομήσει την κατάσταση φθοράς εργαλείων. Οι DePold και Gass [DePold and Gass 1999] μελέτησαν

τις εφαρμογές των νευρωνικών δικτύων και των έμπειρων συστημάτων σε ένα αποτελούμενο από πρότυπα στοιχεία ευφύες και προσαρμοζόμενο σύστημα για διαγνωστική στροβίλων καυσαερίων. Ο Yang και οι συνεργάτες του [Yang et al. 2004a] παρουσίασαν μια προσέγγιση για ολοκλήρωση ενός συλλογιστικού βάσει περίπτωσης έμπειρου συστήματος με ένα ART-Kohonen νευρωνικό δίκτυο για να βελτιώσουν την διάγνωση βλαβών. Δείχτηκε ότι η προτεινόμενη προσέγγιση παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με ένα σύστημα αυτό-οργανώμενου χάρτη χαρακτηριστικών ως προς το ποσοστό ταξινόμησης.

Συχνά, η γνώση έμπειρων συγκεκριμένων πεδίων και η συλλογιστική είναι ανακριβής. Κατά συνέπεια, απαιτούνται μέτρα των αβεβαιοτήτων στη γνώση και την συλλογιστική για την επίτευξη συμπαγέστερης επίλυσης προβλημάτων. Συχνά χρησιμοποιούμενα μέτρα αβεβαιότητας είναι οι πιθανότητες, οι ασαφείς συναρτήσεις στην θεωρία ασαφούς λογικής και οι συναρτήσεις πίστης στη θεωρία δικτύων πίστης (belief networks theory). Στο [Mechefske 1998] η ασαφής λογική χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση φασμάτων συχνότητας που παρουσιάζουν ποικίλα σφάλματα ένσφαιρων τριβέων. Μια σύγκριση μεταξύ συμβατικών βάσει κανόνων Έμπειρων Συστημάτων και δικτύων πίστης που εφαρμόστηκαν στη διαγνωστική μηχανής δόθηκε στο [Collins et al. 1989]. Οι Du και Yeung εισήγαγαν μια προσέγγιση αποκαλούμενη πιθανότητα ασαφούς μετάβασης (fuzzy transition probability) που συνδυάζει την πιθανότητα μετάβασης (διαδικασία Markov) καθώς και τα ασαφή σύνολα, για την παρακολούθηση εξελισσόμενων βλαβών [Du and Yeung 2004]. Η εφαρμογή ασαφούς λογικής συνήθως συγχωνεύεται με άλλες τεχνικές όπως τα νευρωνικά δίκτυα και τα έμπειρα συστήματα. Ο Zhang και οι συνεργάτες του [Zhang et al. 2003] ανέπτυξαν ένα FNN για διάγνωση βλάβης περιστρεφόμενων μηχανών για την βελτίωση του ποσοστού αναγνώρισης της αναγνώρισης προτύπων, ειδικά στην περίπτωση όπου τα δεδομένα δείγματος είναι παρόμοια. Οι Lou και Loperao [Lou and Loperao 2004] χρησιμοποίησαν ένα προσαρμοζόμενο νευροασαφές συμπερασματικό σύστημα ως διαγνωστικό ταξινομητή για διάγνωση βλαβών ένσφαιρων τριβέων. Ο Liu και οι συνεργάτες του [Liu et al. 1996] εφήρμοσαν ασαφή λογική και έμπειρα συστήματα για την κατασκευή ενός ασαφούς έμπειρου συστήματος για εντοπισμό βλαβών ένσφαιρων τριβέων. Ο Chang και οι συνεργάτες του [Chang et al. 1995] έφτιαξαν ένα σύστημα για υποστήριξη λήψης απόφασης σε ένα εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας αμφότερα ένα βάσει κανόνων έμπειρο σύστημα και ασαφή λογική.

Τα νευρωνικά δίκτυα και τα έμπειρα συστήματα έχουν συνδυαστεί επίσης με άλλες τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης για να ενισχύσουν τα διαγνωστικά συστήματα μηχανών. Ο Garga και οι συνεργάτες του [Garga et al. 2001] πρότειναν μια υβριδική αιτιολογική προσέγγιση συνδυάζοντας νευρωνικά δίκτυα, ασαφή λογική και έμπειρα συστήματα για την ολοκλήρωση της γνώσης πεδίου και των δοκιμαστικών και λειτουργικών δεδομένων της μηχανής. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms – EA) [Fogel 1994], που μιμούνται την φυσική εξελικτική διαδικασία ενός πληθυσμού, έχουν παρουσιάσει πλεονεκτήματα σε εφαρμογές στη διαγνωστική μηχανών. Οι γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms – GAs) είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος εξελικτικών αλγορίθμων. Ο Sampath και οι συνεργάτες του πρότειναν μια προσέγγιση βελτιστοποίησης βασιζόμενη σε γενετικούς αλγορίθμους για διαγνωστική στροβίλων καυσαερίων [Sampath et al. 2002].

Διάφορα παραδείγματα ANN που περιλαμβάνουν γενετικούς αλγόριθμους και άλλους εξελικτικούς αλγόριθμους για ταξινόμηση σφαλμάτων και διαγνωστική βλαβών παρουσιάζονται στα [Chen et al. 2003], [Huang and Huang 2002], [Yan and Ma 2004].

1.2.3.4 Άλλες Προσεγγίσεις

Μια άλλη κατηγορία προσεγγίσεων διαγνωστικής βλαβών μηχανής είναι οι προσεγγίσεις που βασίζονται σε μοντέλα [Gertler 1998], [Simani et al. 2003]. Οι προσεγγίσεις αυτές χρησιμοποιούν συγκεκριμένο φυσικό, αναλυτικό μαθηματικό μοντέλο της παρακολουθούμενης μηχανής. Βασιζόμενες σε αυτό το αναλυτικό μοντέλο, μέθοδοι υπολοίπου (residual) όπως τα φίλτρα Kalman, η εκτίμηση παραμέτρων (ή αναγνώριση συστήματος) και οι σχέσεις ισοτιμίας χρησιμοποιούνται για την απόκτηση σημάτων, που ονομάζονται υπόλοιπα (residuals), τα οποία είναι ενδεικτικά της παρουσίας σφάλματος στη μηχανή. Οι προσεγγίσεις που βασίζονται σε μοντέλο μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικές από άλλες προσεγγίσεις χωρίς μοντέλο, αν ένα σωστό και ακριβές μοντέλο χτιστεί. Όμως η αναλυτική μαθηματική μοντελοποίηση μπορεί να μην είναι εφικτή για σύνθετα συστήματα καθώς θα ήταν πολύ δύσκολο ή ακόμα και αδύνατον να χτιστούν μαθηματικά μοντέλα για τέτοια συστήματα.

Ποικίλες διαγνωστικές προσεγγίσεις βασιζόμενες σε μοντέλα έχουν εφαρμοστεί στη διάγνωση βλαβών διαφόρων μηχανολογικών συστημάτων όπως τα κιβώτια ταχυτήτων [Howard et al. 2001], [Wang 2002], οι τριβείς [Baillie and Mathew 1994], [Loparo et al. 2000], [Loparo et al. 2003], οι δρομείς [Oppenheimer and Loparo 2002], [Sekhar 2004] και τα εργαλεία κοπής [Choi and Choi 1996]. Ο Bartelmus [Bartelmus 2001], [Bartelmus 2003] χρησιμοποίησε μαθηματική μοντελοποίηση και υπολογιστική προσομοίωση για να βοηθήσει την επεξεργασία σήματος και την ερμηνεία. Ο Hansen και οι συνεργάτες του [Hansen et al. 1995] πρότειναν μια προσέγγιση για πιο εύρωστη διάγνωση βασιζόμενη σε συγχώνευση της πληροφορίας αισθητήρων και μοντέλου. Οι Vania και Pennacchi [Vania and Pennacchi 2004] ανέπτυξαν κάποιες μεθόδους για να μετρήσουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που αποκτώνται με τεχνικές που βασίζονται σε μοντέλα με σκοπό την αναγνώριση σφαλμάτων σε περιστρεφόμενες μηχανές. Η πληροφορία που προσφέρεται από αυτές τις μεθόδους δείχθηκε ότι είναι χρήσιμη για να πραγματοποιείται μια πιο ακριβής αναγνώριση σφαλμάτων ταυτόχρονα με τον υπολογισμό της εμπιστοσύνης της διαγνωστικής απόφασης.

Τα δίκτυα Petri, ως ένα γραφικό εργαλείο γενικής χρήσης για περιγραφή σχέσεων μεταξύ συνθηκών και γεγονότων [David and Alla 1994], έχουν πρόσφατα εφαρμοστεί στον εντοπισμό σφαλμάτων μηχανής και στην διαγνωστική. Ο Probes [Probes 2003] χρησιμοποίησε ένα ασαφές δίκτυο Petri για να περιγράψει την μετάβαση τρόπου λειτουργίας και τον εντοπισμό τρόπου αλλαγής γεγονότος για εντοπισμό σφαλμάτων στη διαγνωστική σύνθετων συστημάτων. Ο Yang [Yang 2003] πρότεινε μια υβριδικού δικτύου Petri μέθοδο μοντελοποίησης συζευγμένη με ανάλυση δένδρων βλαβών και φιλτράρισμα Kalman για έγκαιρο εντοπισμό αστοχίας και απομόνωση σφάλματος. Ο Yang και οι συνεργάτες του [Yang et al. 2004b] πρότειναν μια προσέγγιση για να ολοκληρώσουν την αιτιολογία βάσει περίπτωσης με τα δίκτυα Petri για την διάγνωση βλαβών σε επαγωγικούς κινητήρες,

παρουσιάζοντας καλύτερα αποτελέσματα από τα συμβατικά αιτιολογίας περίπτωσης έμπειρα συστήματα.

1.3 Συνεισφορά της Διδακτορικής Διατριβής

Η εμφάνιση βλαβών σε περιστρεφόμενες και παλινδρομικές μηχανές και κατασκευές, ειδικά σε αεροπορικές, δομικές και μηχανολογικές υποδομές, μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές αστοχίες με σοβαρά αποτελέσματα (απώλεια ανθρωπίνων ζώων, εκτεταμένη περιβαλλοντική ρύπανση, εκτενείς διακοπές παραγωγής, χρονικές καθυστερήσεις κ.ά.). Ως συνέπεια, μια πληθώρα αναλυτικών, αριθμητικών και πειραματικών μεθοδολογιών, προσεγγίσεων και τεχνικών έχουν προταθεί για την έγκαιρη και έγκυρη διάγνωση βλαβών.

Προς την κατεύθυνση αυτή, η παρούσα διατριβή αποτελεί συνεισφορά στην εφαρμογή νοημών μεθόδων επεξεργασίας δυναμικών σημάτων για την διάγνωση βλαβών μηχανολογικού εξοπλισμού.

Στο κεφάλαιο 2 μελετάται η αποδιαμόρφωση δυναμικών σημάτων με χρήση δύο προσεγγίσεων. Η πρώτη προσέγγιση βασίζεται στον Μη Γραμμικό Διαφορικό Ενεργειακό Τελεστή Teager-Kaiser και χρησιμοποιείται ο Αλγόριθμος Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή (Energy Operator Separation Algorithm - EOSA).

Ο διακριτός Αλγόριθμος Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή (EOSA) αποτελεί μια πρωτότυπη και πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την αποδιαμόρφωση σημάτων για πολλούς λόγους: (i) Εμφανίζει πολύ λίγα σφάλματα για αποδιαμόρφωση διαμορφωμένων σημάτων τόσο κατά πλάτος όσο και κατά συχνότητα (AM-FM). (ii) Παρουσιάζει εξαιρετικά χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. (iii) Εμφανίζει άριστη χρονική ευκρίνεια, σχεδόν στιγμιαία (instantaneous), καθώς εφαρμόζεται σε ένα κινούμενο παράθυρο 5 σημείων και μπορεί να εντοπίσει στιγμιαίες αλλαγές στην διαμόρφωση των σημάτων. (iv) Είναι υπολογιστικά λιγότερο σύνθετη και έχει καλύτερη χρονική ευκρίνεια από άλλες κλασικές προσεγγίσεις αποδιαμόρφωσης όπως ο μετασχηματισμός Hilbert. (v) Μπορεί να εντοπίσει την πραγματική φυσική ενέργεια της πηγής κραδασμών. (vi) Μπορεί να ανιχνεύσει μεταβατικά γεγονότα, γεγονός που μπορεί να είναι εξαιρετικά χρήσιμο κατά την παρακολούθηση ταχέως εξελισσομένων φαινομένων, όπως οι αυτοδιεγείρομενες ταλαντώσεις και το “κροτάλισμα” (chatter) που εμφανίζονται σε βιομηχανικά έλαστρα.

Ο Αλγόριθμος Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή (EOSA) εφαρμόζεται αρχικά σε αποκρίσεις του κλασικού μη γραμμικού Van der-Pol ταλαντωτή. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται σε σήματα που προσομοιώνουν την δυναμική απόκριση ενός ελαττωματικού ένσφαιρου τριβέα παρουσιάζοντας τοπικό σφάλμα στον εσωτερικό ή στον εξωτερικό δακτύλιο καθώς και ολίσθηση των σφαιρών του. Τελικά η μέθοδος εφαρμόζεται σε τρεις τυπικές περιπτώσεις από μετρήσεις βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται στη χρήση Μιγαδικών Μετατοπισμένων Κυματιδίων Morlet. Τα Μιγαδικά Μετατοπισμένα Κυματίδια Morlet παρουσιάζουν έναν αριθμό πλεονεκτημάτων έναντι των άλλων παρόμοιων μεθόδων. (i) Τα Κυματίδια Morlet είναι διαμορφωμένα στο πεδίο του χρόνου από ένα κανονικό (Gaussian) σχήματος χρονικό παράθυρο (και για το λόγο αυτό είναι επίσης γνωστά ως κυματίδια Gabor). Κατά συνέπεια

παρουσιάζουν την βέλτιστη ευκρίνεια (resolution) ταυτόχρονα στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας. (ii) Συγκρινόμενα με τον Διακριτό Κυματιδιακό Μετασχηματισμό (Discrete Wavelet Transform - DWT), επιτρέπουν τον συνεχή (και κατά συνέπεια και πιο ακριβή) υπολογισμό τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Επιπλέον, δεν σχετίζονται με φαινόμενα φασματικής διαρροής. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ ο Συνεχής Κυματιδιακός Μετασχηματισμός (Continuous Wavelet Transform – CWT) θεωρείται υπολογιστικά πιο απαιτητικός σε σχέση με τον Διακριτό Κυματιδιακό Μετασχηματισμό σχετικοί αλγόριθμοι μπορούν να ξεπεράσουν το μειονέκτημα αυτό ως έναν αξιοσημείωτο βαθμό. (iii) Σε αντίθεση με την κλασική αναπαράσταση πραγματικών αριθμών του Κυματιδιακού Μετασχηματισμού Morlet, τα Μιγαδικά Μετατοπισμένα Κυματίδια Morlet οδηγούν σε μιγαδικούς κυματιδιακούς συντελεστές στο πεδίο του χρόνου, επιτρέποντας κατά συνέπεια τον απευθείας υπολογισμό της περιβάλλουσας του σήματος από το πλάτος των κυματιδιακών συντελεστών, με τρόπο παρόμοιο με τον κλασικό Μετασχηματισμό Hilbert. (iv) Σε αντίθεση με την κλασική αρχή της κλιμάκωσης του κυματιδίου στο πεδίο του χρόνου ή της συχνότητας το οποίο επιτρέπει την αναγνώριση μόνο μίας παραμέτρου, της κυματιδιακής κλίμακας, η έννοια της μετατόπισης του κυματιδίου Morlet στο πεδίο της συχνότητας επιτρέπει την ταυτόχρονη βέλτιστη επιλογή και των δύο κυματιδιακών παραμέτρων που είναι απαραίτητοι για την αναγνώριση του ως ένα κατάλληλο φίλτρο στο πεδίο της συχνότητας: Την Κεντρική Συχνότητα (Center Frequency) και το Εύρος (Bandwidth). (v) Τα κυματίδια Morlet είναι προοδευτικά.

Για την επιλογή των δύο κυματιδιακών παραμέτρων έχουν προταθεί μια σειρά από μεθοδολογίες και κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά ελέγχονται συστηματικά και συγκρίνονται σε πραγματικά βιομηχανικά σήματα δυναμικής απόκρισης ένσφαιρων τριβέων με βλάβη στο εσωτερικό ή στον εξωτερικό δακτύλιό τους. Οι Δείκτες “Σχήματος” είναι ευαίσθητοι σε ακραίες τιμές, ενώ τα Κριτήρια που βασίζονται στην Ενέργεια είναι ευαίσθητα στις αλλαγές κλίμακας.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνεται ένα νέο κριτήριο για την ταυτόχρονη βέλτιστη επιλογή των κρίσιμων παραμέτρων προσφέροντας δυνατότητες για αυτοματοποίηση της διαδικασίας υπολογισμού της περιβάλλουσας καθώς και εγκυρότερο και ασφαλέστερο εντοπισμό της ζώνης αποδιαμόρφωσης. Ο Δείκτης Ενέργειας Αιχμών μετράει την Ενέργεια του πλάτους των Αιχμών του κυματιδίου που υπερβαίνουν ένα κατώτατο όριο. Δεδομένου ότι λαμβάνει υπόψιν μόνο την ενέργεια των κορυφών, είναι ευαίσθητος στην “αιχμηρή” δομή του σήματος. Από τον τρόπο ορισμού του, είναι εμφανές ότι συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των ενεργειακών κριτηρίων (π.χ. x_{RMS}) με τα πλεονεκτήματα των δεικτών σχήματος (π.χ. Crest Factor, Kurtosis, Smoothness Index.).

Στο κεφάλαιο 3 επιχειρείται ο εντοπισμός ρωγμών σε κατασκευές δοκών. Ως πρώτο βήμα, η μέθοδος Αποσύνθεσης Ορθοκανονικών Προβολών (Proper Orthogonal Decomposition - POD) χρησιμοποιείται με σκοπό να αποκτηθεί ένας αριθμός Ορθοκανονικών Μορφών (Proper Orthogonal Modes - POMs) δοκού με ρωγμή.

Η Μέθοδος Αποσύνθεσης Ορθοκανονικών Προβολών (Proper Orthogonal Decomposition) είναι μια πολυμεταβλητή στατιστική μέθοδος που αποσκοπεί στην απόκτηση μιας πυκνής περιγραφής των δεδομένων. Η μέθοδος υπηρετεί ονομαστικά δύο σκοπούς:

(i) την προβολή δεδομένων διανυσματικού χώρου μεγάλων διαστάσεων σε χώρο μικρότερης διάστασης και (ii) την εξαγωγή χαρακτηριστικών αποκαλύπτοντας σχετικές αλλά απροσδόκητες δομές που βρίσκονται κρυμμένες στα δεδομένα. Η βασική ιδέα της POD είναι η μείωση ενός μεγάλου αριθμού αλληλοεξαρτώμενων μεταβλητών σε έναν μικρότερο αριθμό ασυσχέτιστων μεταβλητών, διατηρώντας όσο περισσότερο γίνεται την διακύμανση των αρχικών μεταβλητών. Ένας ορθογώνιος μετασχηματισμός στην βάση των ιδιοδιανυσμάτων του πίνακα συνδιακύμανσης δειγμάτων πραγματοποιείται και τα δεδομένα προβάλλονται σε έναν υποχώρο που αναπτύσσεται από τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες ιδιοτιμές. Ο μετασχηματισμός αυτός αποσυσχετίζει τις συνιστώσες του σήματος και μεγιστοποιεί την διακύμανση.

Έπειτα, εναλλακτικά με άλλες προσεγγίσεις, η Μορφολογική Επεξεργασία (Morphological Processing) προτείνεται για την περαιτέρω επεξεργασία του σχήματος των εξαγόμενων Ορθοκανονικών Μορφών POMs. Τα παραδοσιακά εργαλεία των γραμμικών συστημάτων και η Ανάλυση Συχνότητας (Fourier) παρουσιάζουν εξαιρετικά περιορισμένη εφαρμογή στην επίλυση γεωμετρικής φύσης προβλημάτων καθώς δεν θίγουν τα θεμελιώδη ζητήματα της ποσοτικοποίησης του σχήματος, του μεγέθους και άλλων γεωμετρικών δομών των σημάτων και κατά συνέπεια μπορεί να αλλοιώσουν σημαντικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων. Αντίθετα, η Μορφολογική Επεξεργασία Σήματος μπορεί να ποσοτικοποιήσει το σχήμα, το μέγεθος και άλλες πτυχές της γεωμετρικής δομής των σημάτων που εξετάζονται ως οπτικά αντικείμενα, με τρόπο που συμφωνεί με την ανθρώπινη διαίσθηση και αντίληψη. Κατά συνέπεια τα μορφολογικά συστήματα είναι καταλληλότερα από τα γραμμικά συστήματα για ανάλυση σχημάτων. Επίσης προσφέρουν απλές και αποτελεσματικές λύσεις σε ποικίλα μη γραμμικά προβλήματα όπως η καταστολή μη Κανονικού (non Gaussian) θορύβου και ο υπολογισμός περιβαλλουσών σημάτων (envelope estimation).

Η βασική αρχή της μορφολογικής επεξεργασίας είναι η μετατροπή του σχήματος ενός αντικειμένου, που ισοδύναμα θεωρείται ως ένα σύνολο, μέσω του μετασχηματισμού του μέσω της αλληλεπίδρασής του με ένα άλλο αντικείμενο, που αποκαλείται δομικό στοιχείο. Χρησιμοποιώντας μια κατάλληλη διαδικασία μορφολογικής επεξεργασίας, η θέση και το βάθος των ρωγμών μπορούν να εκτιμηθούν απομονώνοντας την τοπική ξαφνική αλλαγή της επίδρασης των ρωγμών στην χωρική μεταβολή του σχήματος κάθε POM. Για τον σκοπό αυτό, οι τέσσερις βασικοί μορφολογικοί τελεστές (διαστολή - dilation, διάβρωση - erosion, άνοιγμα - opening, κλείσιμο - closing) συγκρίνονται, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικούς τύπους δομικών στοιχείων. Ο τελεστής της διάβρωσης (erosion) με ένα καμπύλο (spline) δομικό στοιχείο φαίνεται να παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα.

Τελικά, η απόδοση της μεθόδου εκτιμάται σε διαφορετικές κατασκευές δοκών που παρουσιάζουν μια “αναπνέουσα” ρωγμή, αναφορικά με διάφορους παράγοντες, όπως οι οριακές συνθήκες, η θέση της ρωγμής, το βάθος της ρωγμής, η ύπαρξη πολλαπλών ρωγμών, η απόσταση μεταξύ των πολλαπλών ρωγμών, το επίπεδο του θορύβου κατά την μέτρηση και η χωρική ευκρίνεια των μετρούμενων σημείων.

Απώτερος στόχος του κεφαλαίου 4 αποτελεί ο σχεδιασμός ενός Αυτόματου Συστήματος Διάγνωσης Βλαβών Ένσφαιρων Τριβών που θα ταξινομεί τα ελεγχόμενα σήματα σε τρεις

(3) βασικές κλάσεις: α) Καλή Λειτουργία Μηχανής, β) Φθορά στον Εξωτερικό Δακτύλιο του ένσφαιρου τριβέα, γ) Φθορά στον Εσωτερικό Δακτύλιο του Ένσφαιρου Τριβέα.

Η μέθοδος Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης (Support Vector Machines) παρουσιάζει μια σειρά από πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks): (i) Σε αντίθεση με τα ANNs, τα οποία μπορεί να υποφέρουν από πολλαπλά τοπικά ελάχιστα, η λύση σε ένα SVM είναι ολική (global) και μοναδική (unique). (ii) Τα SVMs παρουσιάζουν απλή γεωμετρική ερμηνεία και δίνουν μια αραιή (sparse) λύση. (iii) Σε αντίθεση με τα ANNs, η υπολογιστική πολυπλοκότητα των SVMs δεν εξαρτάται από την διάσταση του μαθηματικού χώρου εισόδου. (iii) Η διατύπωση των SVM ενσωματώνει την έννοια της Ελαχιστοποίησης Δομικού Κινδύνου (Structural Risk Minimisation - SRM), που έχει αποδειχθεί ότι είναι ανώτερη, από την έννοια της παραδοσιακής Ελαχιστοποίησης Εμπειρικού Κινδύνου (Empirical Risk Minimisation - ERM), που χρησιμοποιείται από τα συμβατικά Νευρωνικά Δίκτυα. Το SRM ελαχιστοποιεί το άνω όριο του αναμενόμενου κινδύνου σε αντίθεση με το ERM που ελαχιστοποιεί το σφάλμα στα δεδομένα εκπαίδευσης. Αυτή ακριβώς η διαφορά καθιστά την μέθοδο SVM ικανότερη για γενίκευση και λιγότερο επιρρεπή στην υπερπροσαρμογή. (iv) Σε αντίθεση με τις περισσότερες μεθόδους ταξινόμησης, οι Μηχανές Διανυσματικής Υποστήριξης δεν απαιτούν μεγάλο αριθμό δειγμάτων δεδομένων.

Η Αυτόματη Διάγνωση Βλαβών μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικά τμήματα, στην εισαγωγή-προεπεξεργασία των σημάτων και στην μέθοδο ταξινόμησης. Στη μάθηση με επίβλεψη το σύστημα καλείται να “μάθει” μια έννοια ή συνάρτηση από ένα σύνολο δεδομένων, η οποία αποτελεί περιγραφή μιας κατάστασης. Κατά συνέπεια έχει πολύ μεγάλη σημασία η ορθή, ακριβής και επιτυχής περιγραφή της κατάστασης αυτής με την χρήση καταλλήλων χαρακτηριστικών (features). Στην περίπτωση της διάγνωσης βλαβών ένσφαιρων τριβέων, βασικό κριτήριο για την επιτυχία της μεθόδου είναι η επιτυχής περιγραφή της Κατάστασης Καλής Λειτουργίας του Τριβέα, της Κατάστασης Λειτουργίας με Φθορά στον Εσωτερικό Δακτύλιο, της Κατάστασης Λειτουργίας με Φθορά στον Εξωτερικό Δακτύλιο. Για την περιγραφή των προαναφερθεισών καταστάσεων, έχουν προταθεί μια σειρά από μεγέθη – χαρακτηριστικά τόσο από το πεδίο της συχνότητας όσο και από το πεδίο του χρόνου.

Στις μεθόδους επιβλεπόμενης εκμάθησης, δύο βασικά προβλήματα ανακύπτουν συχνά: (i) Απαιτούνται πειραματικά δεδομένα του ελεγχόμενου μηχανολογικού εξοπλισμού υπό πραγματικές συνθήκες βλάβης για την εκπαίδευσή τους. Τέτοια δεδομένα είναι πολύ δύσκολο να αποκτηθούν σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον, καθώς ούτε τεχνητά σφάλματα μπορούν να εισαχθούν στον βιομηχανικό εξοπλισμό εν λειτουργία, ούτε η εφαρμογή της διαγνωστικής διαδικασίας μπορεί να αναβληθεί μετά την εμφάνιση μιας πραγματικής βλάβης. (ii) Χρησιμοποιούνται αρκετά πολύπλοκα σύνολα χαρακτηριστικών, βασιζόμενα περισσότερο σε γενικά κριτήρια που εξάγονται από την Θεωρία Πληροφορίας (Information Theory) ή την στατιστική επεξεργασία, παρά σε χαρακτηριστικά και μεγέθη που απορρέουν από την μηχανολογική γνώση της συγκεκριμένης εφαρμογής. Τα δύο αυτά προβλήματα μπορούν να καταστήσουν τις παραπάνω μεθόδους πρακτικά ανεφάρμοστες σε βιομηχανικά περιβάλλοντα.

Προς την κατεύθυνση της υπερνίκησης των παραπάνω δύο αδυναμιών, στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνεται ένας υβριδικός αλγόριθμος που βασίζεται σε ένα Στοχαστικό Μοντέλο Προσομοίωσης Δυναμικής Απόκρισης Ένσφαιρων Τριβέων, στην στρατηγική Ένας-Εναντίον-Όλων (One-Against-All) και στην χρησιμοποίηση της μεθόδου Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης SVM.

Τα προσομοιωμένα σήματα παράγονται από ένα καλά καθορισμένο μοντέλο που περιγράφει την δυναμική απόκριση φθαρμένων ένσφαιρων τριβέων ως αποτέλεσμα της εφαρμογής της “Τεχνικής Υψίσυχνου Συντονισμού” (High Frequency Resonance Technique - HFRT) [McFadden and Smith 1984a] με κατάλληλες επεκτάσεις και βελτιώσεις ([Randall 1987], [Antoni and Randall 2002]).

Εναλλακτικά στα ήδη προταθέντα χαρακτηριστικά εισόδου, στην παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάζονται χαρακτηριστικά που μπορούν να εξαχθούν από το πεδίο της συχνότητας και αποτελούν περιγραφικούς δείκτες της μεταβολής της Κατάστασης Λειτουργίας της Μηχανής. Ως κύριο μέτρο-χαρακτηριστικό λαμβάνεται ο υπολογισμός της ενέργειας που κατανέμεται και αναπτύσσεται σε προσεκτικά, ορθά και αυστηρά καθορισμένες ζώνες συχνοτήτων, που μπορούν να καθοριστούν με βάση την καλή κατανόηση της φύσης του φαινομένου εμφάνισης της βλάβης από την σκοπιά ενός μηχανικού. Ο πετυχημένος ορισμός των συχνοτικών αυτών ζωνών μπορεί να οδηγήσει σε ακριβέστερη, πιο αξιόπιστη και αυτοματοποιημένη παρακολούθηση της κατάστασης λειτουργίας περιστρεφόμενου εξοπλισμού και στην έγκυρη και έγκαιρη διάγνωση βλαβών που ενδέχεται να εμφανιστούν στο σύστημα. Τα χαρακτηριστικά αυτά λαμβάνονται από τα φάσματα τόσο των αρχικών σημάτων όσο και της περιβάλλουσάς τους.

Τα σήματα κραδασμών περιστρεφόμενου εξοπλισμού κατά τη διάρκεια εμφάνισης μεταβατικών φαινομένων, όπως π.χ. κατά την έναρξης λειτουργίας (επιτάχυνση) και της διακοπής λειτουργίας (επιβράδυνση), είναι κατά βάση μη στάσιμα σήματα. Ως αποτέλεσμα, η εφαρμογή της φασματικής ανάλυσης απευθείας σε αυτά τα είδη σημάτων αλλοιώνει το φάσμα συχνοτήτων και οδηγεί στη λεγόμενη “Φασματική Διαρροή”. Για να ξεπεραστεί η αδυναμία αυτή, προτείνεται η χρήση Ανάλυσης Τάξης (Order Analysis).

Equation Section 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**Μέθοδοι Αποδιαμόρφωσης Δυναμικής Απόκρισης
Μηχανολογικού Εξοπλισμού****2.1 Αποδιαμόρφωση με χρήση του Αλγορίθμου Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή
(Energy Operator Separation Algorithm - EOSA)****2.1.1 Εισαγωγή**

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται μια διαφορετική προσέγγιση αποδιαμόρφωσης. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στον μη γραμμικό διαφορικό ενεργειακό τελεστή Teager-Kaiser [Teager 1980], [Kaiser 1990] που είναι ικανός να εντοπίζει την ενέργεια απλών αρμονικών ταλαντωτών. Βασιζόμενος στον αλγόριθμο αυτό, ο Μαραγκός και οι συνεργάτες του [Maragos et al. 1993a] πρότειναν τον Αλγόριθμο Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή (Energy Operator Separation Algorithm - EOSA). Ο αλγόριθμος οδηγεί στον στιγμιαίο υπολογισμό τόσο του πλάτους όσο και της συχνότητας του σήματος. Συγκρινόμενος με τον κλασικό Μετασχηματισμός Hilbert [Potamianos and Maragos 1994], προσφέρει τα ίδια ή μικρότερα υπολογιστικά λάθη εκτίμησης όμως επιπλέον παρουσιάζει μικρότερη υπολογιστική περιπλοκότητα και ταχύτερη προσαρμοστικότητα χάρη στην στιγμιαία φύση του.

Ο EOSA εφαρμόζεται πρώτα σε αποκρίσεις του κλασικού μη γραμμικού Van der-Pol ταλαντωτή. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται σε σήματα που προσομοιώνουν την δυναμική απόκριση ενός ελαττωματικού ένσφαιρου τριβέα παρουσιάζοντας ένα σφάλμα στον εσωτερικό ή στο εξωτερικό δακτύλιο καθώς και ολίσθηση των σφαιρών του. Τελικά η μέθοδος εφαρμόζεται σε τρεις τυπικές περιπτώσεις από μετρήσεις βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

Σε όλες τις περιπτώσεις, ο αλγόριθμος οδηγεί σε επιτυχή υπολογισμό, κυρίως του στιγμιαίου πλάτους των σημάτων. Η στιγμιαία συχνότητα επίσης υπολογίζεται ως έναν ικανοποιητικό βαθμό, όμως συγκεκριμένες βελτιώσεις είναι απαραίτητες στον αλγόριθμο για να αυξηθεί η ομαλότητα των εξαγόμενων χρονικών κυματομορφών της στιγμιαίας συχνότητας.

2.1.2 Ο Ενεργειακός Τελεστής

Ο αλγόριθμος διαχωρισμού με υπολογισμό της ενέργειας, στηρίζεται στο λεγόμενο ενεργειακό τελεστή που προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Teager (για μοντελοποίηση

παραγωγής φωνής) [Teager and Teager 1983], παρουσιάστηκε συστηματικά από τον Kaiser (εισάγοντας συστηματικά τους μη γραμμικούς τελεστές Ψ_c και Ψ_d) [Kaiser 1990] και εισήχθη ως εργαλείο για αποδιαμόρφωση από τους Maragos et al. [Maragos et al. 1993b]. Τυπικά η αποδιαμόρφωση ενός σήματος είναι η εκτίμηση του πλάτους της περιβάλλουσας $a(t)$ και της στιγμιαίας συχνότητας $\omega_i(t)$, με δεδομένα τα $x(t)$ και ω_c .

Οι Maragos et al. [Maragos et al. 1993a] εισήγαγαν έναν τελεστή “ανίχνευσης ενέργειας” με σκοπό πρώτα να εκτιμηθεί η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή ενός AM-FM σήματος και μετά να διαχωριστεί η ενέργεια αυτή σε συνιστώσες πλάτους και συχνότητας. Πρόκειται για ένα μη γραμμικό τελεστή που για διακριτά σήματα, έχει τη μορφή:

$$\Psi_d[x(n)] \triangleq x^2(n) - x(n-1)x(n+1) \quad (2.1)$$

ενώ επεκτείνεται για συνεχή σήματα παίρνοντας τη μορφή:

$$\Psi_c[x(t)] \triangleq [\dot{x}(t)]^2 - x(t)\ddot{x}(t) \quad (2.2)$$

όπου $\dot{x} = dx/dt$

Ο συγκεκριμένος τελεστής έχει την ιδιότητα να ανιχνεύει την ενέργεια ενός γραμμικού ταλαντωτή. Από εκεί προκύπτει και η θεώρησή του ως ενεργειακού τελεστή. Πιο συγκεκριμένα, για έναν ελεύθερο γραμμικό ταλαντωτή χωρίς απόσβεση με μάζα m και σταθερά επαναφοράς k , η απομάκρυνση από τη θέση ισορροπίας περιγράφεται από τη διαφορική εξίσωση κίνησης:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (2.3)$$

που έχει τη γενική λύση:

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \theta) \quad (2.4)$$

$$\text{όπου } \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

και η στιγμιαία ενέργειά του είναι σταθερή και ίση με το άθροισμα της δυναμικής και της κινητικής του ενέργειας:

$$E_0 = \frac{m}{2} \dot{x}^2 + \frac{k}{2} x^2 \quad (2.5)$$

δηλαδή είναι ανάλογη τόσο με το τετράγωνο του πλάτους όσο και με το τετράγωνο της συχνότητας της ταλάντωσης. Επιπλέον:

$$\Psi_c[A \cos(\omega_0 t + \theta)] = A^2 \omega_0^2 = \frac{E_0}{m/2} \quad (2.6)$$

Έτσι, ο ενεργειακός τελεστής, εφαρμοζόμενος στην ταλάντωση $x(t)$ ουσιαστικά δίνει την ενέργεια (ανά μισή μονάδα μάζας) της πηγής που προκαλεί την ταλάντωση. Αυτή η συγκεκριμένη ιδιότητά ενέπνευσε τους ερευνητές που εισήγαγαν τον αλγόριθμο διαχωρισμού με υπολογισμό της ενέργειας [Maragos et al. 1993a].

2.1.3 Περιγραφή του Αλγορίθμου Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή (EOSA)

Ο Αλγόριθμος Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή αποτελεί μία απλή μέθοδο αποδιαμόρφωσης σημάτων που είναι διαμορφωμένα τόσο κατά πλάτος όσο και κατά συχνότητα. Πραγματικά συνεχή σήματα που παρουσιάζουν μια δομή διαμόρφωσης κατά πλάτος (amplitude modulation - AM) και κατά συχνότητα (frequency modulation - FM) μπορεί να αναπαρασταθούν ως:

$$x(t) = \alpha(t) \cos \left(\underbrace{\omega_c t + \omega_m \int_0^t q(\tau) d\tau + \varphi(0)}_{\varphi(t)} \right) \quad (2.7)$$

όπου το $x(t)$ παριστάνει ένα ημίτονο με φέρουσα συχνότητα ω_c , με χρονικά μεταβαλλόμενο πλάτος σήματος $\alpha(t)$ και χρονικά μεταβαλλόμενη στιγμιαία γωνιακή συχνότητα:

$$\omega_i(t) \triangleq \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega_c + \omega_m q(t) \quad (2.8)$$

όπου $q(t)$ είναι το σήμα διαμόρφωσης κατά συχνότητα ($-1 < q(t) < 1$), ω_m ($0 < \omega_m < \omega_c$) είναι η μέγιστη απόκλιση της στιγμιαίας συχνότητας από τη φέρουσα και $\varphi(0)$ είναι η αρχική τιμή της φάσης.

Η αποδιαμόρφωση χρησιμοποιώντας αυτούς τους ενεργειακούς τελεστές παρουσιάζει μερικά ενδιαφέροντα και ελκυστικά χαρακτηριστικά, όπως η απλότητα, η αποτελεσματικότητα και η προσαρμοστικότητα σε στιγμιαίες μεταβολές του σήματος.

Εφαρμόζοντας τον τελεστή Ψ_c σε ένα AM-FM σήμα, το τετραγωνισμένο γινόμενο του πλάτους και της συχνότητας των σημάτων μπορεί περίπου να εκτιμηθεί:

$$\Psi_c [x(t)] \approx [a(t) \omega_i(t)]^2 \quad (2.9)$$

Υπό τις παραδοχές ότι τα σήματα $a(t)$ και $\omega_i(t)$ παρουσιάζουν σχετικά μικρές και αργές μεταβολές είτε του ρυθμού μεταβολής είτε του εύρους των τιμών σε σύγκριση με την φέρουσα συχνότητα ω_c , ο Αλγόριθμος Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή (Energy Operator Separation algorithm - EOSA) για την αποδιαμόρφωση AM-FM σημάτων $x(t)$ ορίζεται ως:

$$\omega_i(t) \approx \sqrt{\frac{\Psi_c [\dot{x}(t)]}{\Psi_c [x(t)]}} \quad (2.10)$$

$$|\alpha(t)| \approx \frac{\Psi_c [x(t)]}{\sqrt{\Psi_c [\dot{x}(t)]}} \quad (2.11)$$

όπου $\omega_i(t)$ είναι η στιγμιαία συχνότητα και $\alpha(t)$ το στιγμιαίο πλάτος. $\Psi[\sim]$ είναι ο ενεργειακός τελεστής, όπως ορίζεται στην σχέση (2.6). Πρόκειται για τον συνεχή αλγόριθμο διαχωρισμού με βάση την ενέργεια (CESA). Ο EOSA εκτιμάει την στιγμιαία συχνότητα και το πλάτος της περιβάλλουσας του $x(t)$ σε κάθε χρονικό βήμα υπολογίζοντας τις τιμές εξόδου του μη γραμμικού ενεργειακού τελεστή που εφαρμόζεται στο σήμα x και στην παράγωγο του σήματος.

Ανάλογα, στην περίπτωση διακριτού σήματος ισχύει:

$$x(n) = \alpha(n) \cos \left[\underbrace{\Omega_c n + \Omega_m \int_0^n q(m) dm + \theta}_{\varphi(n)} \right] \quad (2.12)$$

$$\Omega_i(n) \triangleq \frac{d}{dn} \varphi(n) = \Omega_c + \Omega_m q(n) \quad (2.13)$$

όπου Ω_c , Ω_m ανάλογα των ω_c , ω_m ενώ $\theta \triangleq \varphi(0)$. Ο αλγόριθμος, αν υποθέσουμε ότι η περίοδος δειγματοληψίας είναι $T = 1$, παίρνει την παρακάτω μορφή,:

$$y(n) = x(n) - x(n-1) \quad (2.14)$$

$$\Omega_i(n) \approx \arccos \left(1 - \frac{\Psi_d[y(n)] + \Psi_d[y(n+1)]}{4\Psi_d[x(n)]} \right) \quad (2.15)$$

$$|\alpha(n)| \approx \sqrt{\frac{\Psi_d[x(n)]}{1 - \left(1 - \frac{\Psi_d[y(n)] + \Psi_d[y(n+1)]}{4\Psi_d[x(n)]} \right)^2}} \quad (2.16)$$

όπου $\Omega_i(n)$, $\alpha(n)$ είναι η διακριτή στιγμιαία συχνότητα και το διακριτό στιγμιαίο πλάτος αντίστοιχα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συχνότητες Ω_c , Ω_m , Ω_i θεωρούνται μη αρνητικές και μικρότερες από π ($0 < \Omega_c, \Omega_m, \Omega_i(n) < \pi$) ενώ υποτίθεται ότι είναι σε ακτίνια/δείγμα. Κατά συνέπεια ο διακριτός EOSA είναι ικανός να εκτιμήσει στιγμιαίες συχνότητες μέχρι το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας.

Πριν την εφαρμογή του EOSA ένα ζωνοπερατό φίλτρο (bandpass filter) πρέπει να χρησιμοποιηθεί γύρω από την διεγερμένη φυσική συχνότητα. Πρέπει να επισημανθεί ότι ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του ενεργειακού τελεστή είναι η στιγμιαία φύση του που εγγυάται άριστη ευκρίνεια (resolution) στο πεδίο του χρόνου. Με σκοπό την διατήρηση αφενός του προαναφερθέντος πλεονεκτήματος και αφετέρου της απλότητας του Ψ_d ένα φίλτρο με σύντομη κρουστική απόκριση (short impulse response) πρέπει να επιλεγθεί.

2.1.4 Παραλλαγές του Διακριτού Αλγορίθμου

Η μορφή του αλγορίθμου που δίνεται, επονομάζεται DESA-1. Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζεται η παράγωγος του σήματος $x(n)$ υπάρχουν διάφορες μορφές (DESA-1a, DESA-1, DESA-2). Στην περίπτωση του DESA-1, η παράγωγος προσεγγίζεται μεν από τη διαφορά του τρέχοντος δείγματος από το προηγούμενο (όπως και στον DESA-1a) αλλά γίνεται μερική αναίρεση των επιπτώσεων αυτής της ασυμμετρίας στο αποτέλεσμα του ενεργειακού τελεστή με κατάλληλη εφαρμογή του τελευταίου. Από την άλλη, στην παραλλαγή DESA-2, η παράγωγος στην τρέχουσα περίοδο δειγματοληψίας προσεγγίζεται από τη διαφορά μεταξύ του επόμενου και του προηγούμενου δείγματος. Αναφέρεται ότι σε σχετικές δοκιμές οι επιδόσεις των τριών αυτών μορφών του αλγορίθμου είναι ανάλογες. Ανεπαίσθητα καλύτερη εμφανίζεται η παραλλαγή DESA-1, που είναι και αυτή που χρησιμοποιείται στη συνέχεια. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η παραλλαγή DESA-1 σε συνδυασμό με ομαλοποιητικό βαθυπερατό φιλτράρισμα της εξόδου του

ενεργειακού τελεστή ώστε να απομονωθεί όσο είναι δυνατόν το επιθυμητό μέρος της εξόδου από το σφάλμα, αφού από σχετική μελέτη [Bovik et al. 1993] προκύπτει ότι τα δύο μέρη είναι αρκετά καλά διαχωρισμένα στο χώρο συχνοτήτων. Το φιλτράρισμα δεν θα πρέπει να ζημιώσει την πολύ καλή διακριτική ικανότητα στο χρόνο που έχει ο ESA. Επίσης, θα μπορούσε να εφαρμοστεί φιλτράρισμα και στα σήματα του πλάτους και της συχνότητας που υπολογίζονται τελικά.

2.1.5 Ανάλυση της δυναμικής απόκρισης του ταλαντωτή Van der Pol

Για να αποτιμηθούν οι δυνατότητες του EOSA, ο αλγόριθμος εφαρμόζεται αρχικά στη δυναμική απόκριση της εξαναγκασμένης ταλάντωσης του μη γραμμικού ταλαντωτή Van der Pol.

Η εξίσωση του Van der Pol [Nayfeh and Mook 1979], στην κανονική της μορφή δίνεται από τη σχέση:

$$\ddot{x} + \mu(x^2 - 1)\dot{x} + \omega^2 x = 0 \quad (2.17)$$

Παρουσιάζει έναν ταλαντωτή με μια γραμμική δύναμη ελατηρίου και μια μη γραμμική δύναμη απόσβεσης. Θεωρείται ότι $\mu > 0$. Όταν $\mu \geq 0$, το σύστημα μπαίνει σε έναν οριακό κύκλο (limit cycle) όπου η ενέργεια συνεχίζει να διατηρείται. Η ενέργεια μπορεί να χαθεί και το έργο να διακοπεί εάν το σύστημα δεν μπει αμέσως σε οριακό κύκλο.

Η δύναμη απόσβεσης μεταβάλλεται με έναν άκρως ενδιαφέρον τρόπο. Για $|x| < 1$ η απόσβεση είναι αρνητική και κατά συνέπεια παράγει μια ενίσχυση της κίνησης. Για $|x| > 1$, υπάρχει μια πραγματική απόσβεση και η κίνηση αποσβένει. Οι παρατηρήσεις αυτές υποδηλώνουν την πιθανότητα μιας ταλάντωσης, στην οποία το σύστημα ξεκινάει σε μια μικρή απόκριση $x(t)$, οδηγείται σε μεγάλη $x(t)$ από την ενίσχυση και μετά αποσβένει πίσω σε μικρή $x(t)$, οδηγώντας σε αυτοδιεγυριόμενες ταλαντώσεις.

Ο εξαναγκασμένος, ή οδηγούμενος ταλαντωτής Van der Pol παίρνει την αρχική του μορφή και προσθέτει μια συνάρτηση οδήγησης-διέγερσης $\omega^2 X_s \cos(\Omega t)$ που οδηγεί σε μια διαφορική εξίσωση της μορφής:

$$\ddot{x} - \mu(1 - x^2)\dot{x} + \omega^2 x = \omega^2 X_s \cos(\Omega t) \quad (2.18)$$

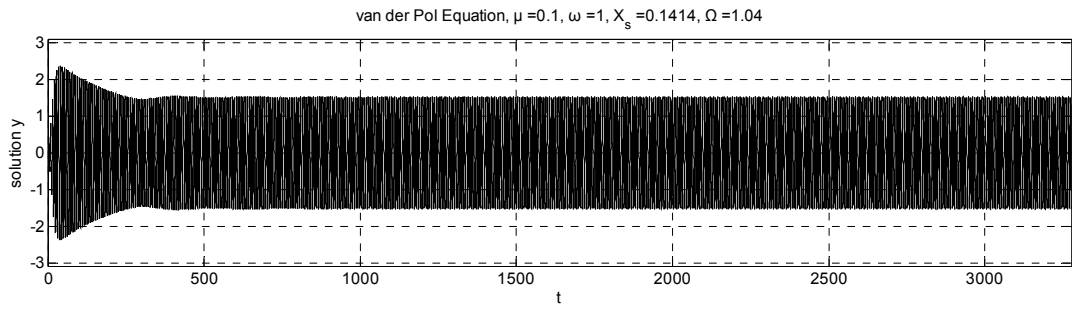
Ο Van der Pol ταλαντωτής που υποβάλλεται σε εξωτερικές ημιτονοειδείς δυνάμεις, μπορεί να παρουσιάσει σταθερές και ασταθείς περιοδικές και σχεδόν περιοδικές αποκρίσεις. Συνεπώς παρουσιάζει καταστάσεις ευσταθούς και ασταθούς ισορροπίας, η μετάβαση μεταξύ των οποίων γίνεται απότομα για μικρές αλλαγές των παραμέτρων του συστήματος. Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα, είναι το φαινόμενο της “Εξαγωγής Συχνότητας” και το φαινόμενο της “Καταστολής”.

Η πρώτη περίπτωση που εξετάζεται εμπλέκει μια απόκριση Συχνότητας Εξαγωγής (Pull-out Frequency). Το φαινόμενο της Εξαγωγής Συχνότητας εμφανίζεται όταν η συχνότητα της διεγείρουσας δύναμης βρίσκεται κοντά στη φυσική συχνότητα του συστήματος. Οι καμπύλες συχνοτικής απόκρισης (Frequency-response curves) για κύριες ιδιοσυχνότητες του ταλαντωτή van der Pol δείχνουν ότι μια μικρή μεταβολή στη συχνότητα διέγερσης με

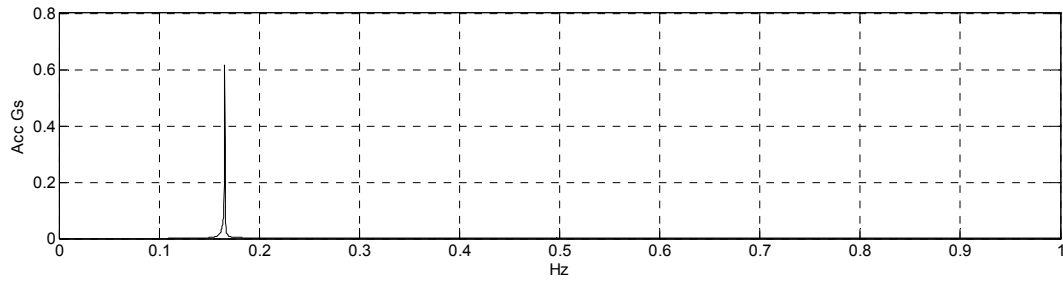
σταθερό πλάτος μπορεί να οδηγήσει σε μια δραστική αλλαγή στη μορφή της απόκρισης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συνολική απόκριση του ταλαντωτή van der Pol αποτελείται από δύο όρους καθώς περιέχει την ομογενή λύση (αυτοδιεγερόμενη ταλάντωση) και τη συνιστώσα της απόκρισης στην αρμονική διέγερση. Οι δύο όροι είτε συνδυάζονται οδηγώντας σε μια ταλάντωση της ίδιας συχνότητας, καθώς η ομογενής λύση “κλειδώνει” πάνω στην μερική λύση, είτε ξεχωρίζουν οδηγώντας σε μια απεριοδική απόκριση. Συνδεδεμένη με αυτόν τον διαχωρισμό είναι μια χαρακτηριστική Συχνότητα Εξαγωγής (Pull-out Frequency).

Μια προσομοίωση πραγματοποιείται για $\omega=1$, $\mu=0.1$ και $X_s = \sqrt{2}$. Σύμφωνα με την θεωρητική ανάλυση της [Nayfeh and Mook 1979], η απόκριση είναι περιοδική όταν $\Omega < 1.0426$ και απεριοδική όταν $\Omega > 1.0426$ περίπου. Πρώτα επιλέγεται $\Omega=1.04$. Η λύση παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-1 (α) και ο Μετασχηματισμός Fourier της στο Σχήμα 2-1 (β).

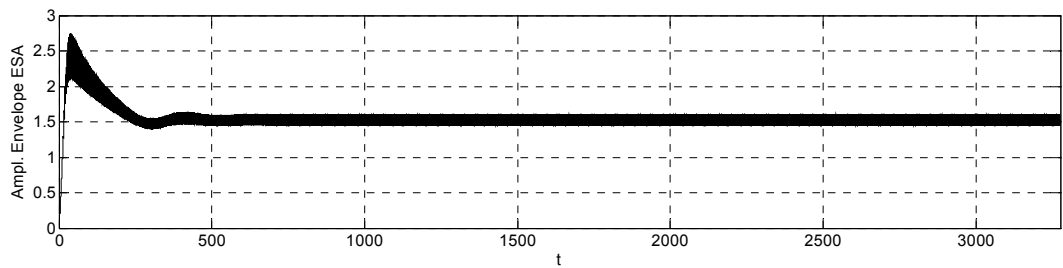
Ο Αλγόριθμος Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή (Energy Operator Separation Algorithm) εφαρμόζεται έπειτα στο σήμα. Το πλάτος του σήματος (περιβάλλουσα) και η στιγμιαία συχνότητα παρουσιάζονται στα Σχήματα 2-1 (γ) και 2-1 (δ). Τα διαγράμματα επιδεικνύουν την συμπεριφορά που αναμένεται από την θεωρία για αυτόν τον τύπο της απόκρισης. Τόσο η κυματομορφή του στιγμιαίου πλάτους όσο και η κυματομορφή της στιγμιαίας συχνότητας δείχνουν μια σταθερή συμπεριφορά, καθώς οι δύο όροι είναι “κλειδωμένοι” μαζί. Επιπλέον, η καμπύλη του πλάτους μπορεί να εντοπίσει επιτυχώς τις απότομες μεταβολές του πλάτους στις αρχικές χρονικές στιγμές. Εντούτοις, κάποια ποσότητα θορύβου είναι παρούσα και στις δυο κυματομορφές, εξαιτίας των αριθμητικών διαφορίσεων στις σχέσεις (2.15) και (2.16).



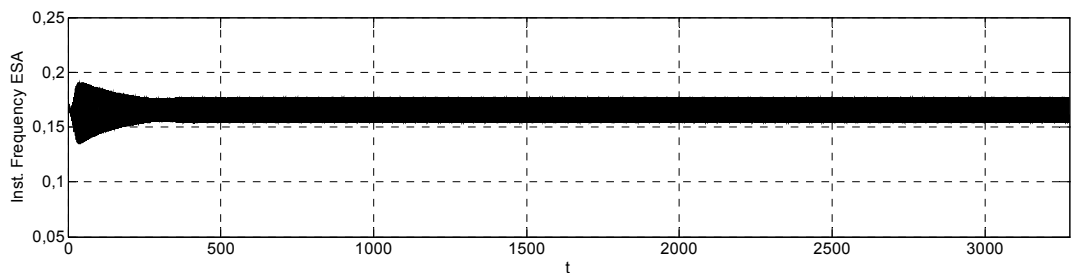
(α)



(β)

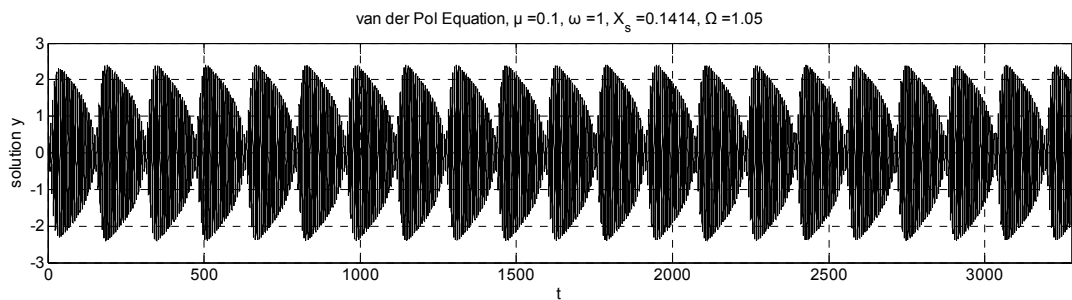


(γ)

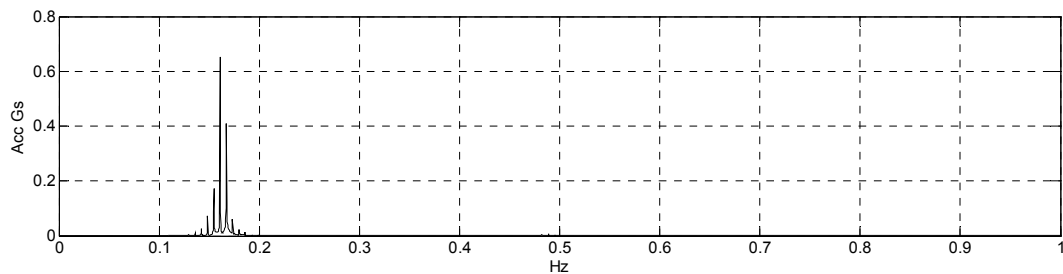


(δ)

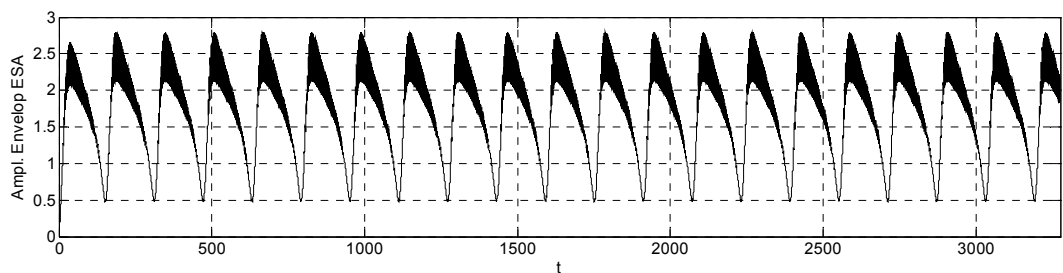
Σχήμα 2-1: Δυναμική απόκριση του ταλαντωτή Van der Pol για $\omega=1$, $\mu=0.1$, $X_s = \sqrt{2}$ και $\Omega=1.04$:
 (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα.



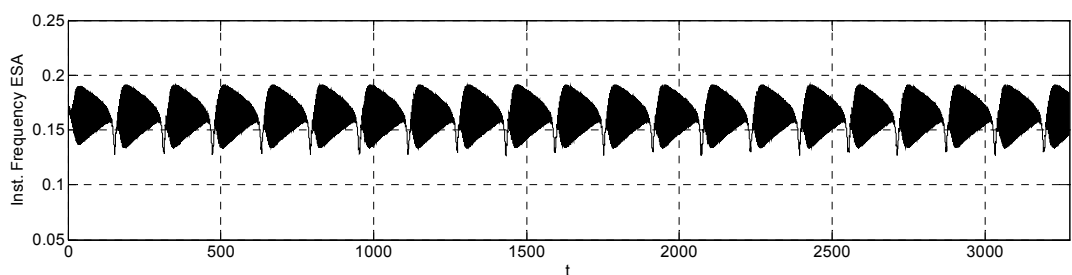
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 2-2: Δυναμική απόκριση του ταλαντωτή Van der Pol για $\omega=1$, $\mu=0.1$, $X_s = \sqrt{2}$ και $\Omega=1.05$: (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα.

Στη συνέχεια η συχνότητα διέγερσης αυξάνεται σε $\Omega=1.05$, που είναι μεγαλύτερη από την χαρακτηριστική κρίσιμη τιμή. Σύμφωνα με την θεωρητική ανάλυση [Nayfeh and Mook 1979], η ομογενής λύση “ξεκλειδώνει” από την μερική λύση. Η απόκριση αναμένεται να αποτελείται από δύο όρους που έχουν σχεδόν τις ίδιες συχνότητες.

Η απόκριση που αποκτάται μετά την προσομοίωση και το αντίστοιχό της φάσμα παρουσιάζεται στα Σχήματα 2-2 (α) και 2-2 (β) αντίστοιχα. Η απόκριση παρουσιάζει μια έντονη κρουστική συμπεριφορά όπως αναμενόταν από την θεωρία. Εφαρμόζοντας τον EOSA

στην απόκριση, το πλάτος και η στιγμιαία συχνότητα υπολογίζονται αντίστοιχα στα Σχήματα 2-2 (γ) και 2-2 (δ). Είναι προφανές από το Σχήμα 2-2 (γ) ότι ο αλγόριθμος ακολουθεί με αρκετή ακρίβεια την περιβάλλουσα την απόκρισης, συμπεριλαμβάνοντας τις λεπτές και απότομες μεταβολές στο πεδίο του χρόνου. Επιπλέον, η απόκριση της στιγμιαίας συχνότητας δείχνει μια διαφορετική ποιοτική συμπεριφορά από εκείνη του Σχήματος 2-1 (δ), χαρακτηριστική δύο διαφορετικών αλλά πολύ κοντινών συχνοτήτων.

Η δεύτερη περίπτωση που εξετάζεται είναι χαρακτηριστική ενός φαινομένου Καταστολής (Quenching phenomenon). Το φαινόμενο της καταστολής εμφανίζεται όταν η συχνότητα της διεγείρουσας δύναμης βρίσκεται μακριά από την φυσική συχνότητα του συστήματος. Η μερική και η ομογενής λύσεις αλληλεπιδρούν με τον κυβικό (θετικό) όρο απόσβεσης που μεταβάλλεται. Μια μικρή μεταβολή στο πλάτος της διεγείρουσας δύναμης προκαλεί δραστική αλλαγή στη μορφή της απόκρισης. Όταν το πλάτος της διεγείρουσας δύναμης είναι μικρότερο από μια χαρακτηριστική κρίσιμη τιμή, η συνολική απόκριση είναι η υπέρθεση της ομογενούς και της μερικής λύσης. Όταν όμως το πλάτος αυξηθεί, η ομογενής απόκριση καταστέλλεται και παραμένει η μερική. Η διαδικασία της αύξησης του πλάτους της διέγερσης με σκοπό να προκαλέσει την εξασθένηση του ελεύθερα ταλαντούμενου όρου είναι γνωστή στην βιβλιογραφία ως φαινόμενο Καταστολής (Quenching) [Nayfeh and Mook 1979].

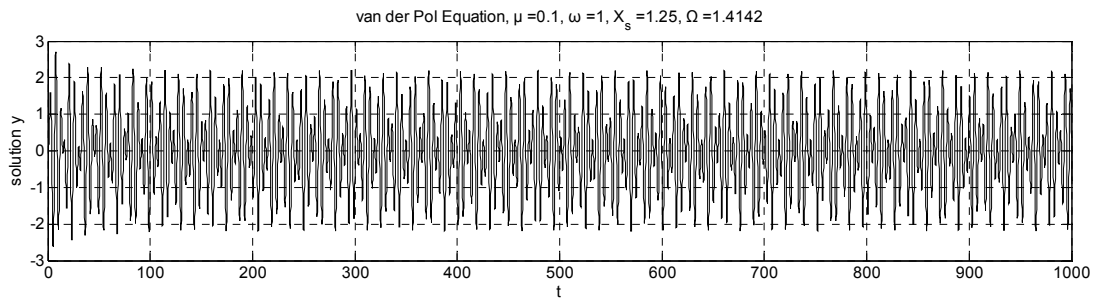
Μια προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για $\omega=1$, $\mu=0.1$, $\Omega=\sqrt{2}$ και $X_S=1,25$. Η απόκριση παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-3 (α) και το αντίστοιχο φάσμα στο Σχήμα 2-3 (β). Το εξαγόμενο πλάτος και η στιγμιαία συχνότητα επιδεικνύονται στα Σχήματα 2-3 (γ) και 2-3 (δ) αντίστοιχα. Ο όρος ελεύθερης ταλάντωσης δεν αποσβένει. Ο αλγόριθμος ξεκάθαρα ακολουθεί την περιβάλλουσα του σήματος.

Η στιγμιαία συχνότητα εξάγεται σε έναν ικανοποιητικό βαθμό. Ξανά, οι αιχμές που εμφανίζονται προκύπτουν από την αριθμητική διαφόριση, όπως φαίνεται στις σχέσεις (2.15) και (2.16). Οι αιχμές αυτές αποτελούν ένα συγκεκριμένο μειονέκτημα της μεθόδου και επιπλέον έρευνα απαιτείται για τον περιορισμό τους. Μετά, το πλάτος διέγερσης αυξάνεται σε $X_S=1.45$, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούν τις προηγούμενες τιμές $\omega=1$, $\mu=0.1$, $\Omega=\sqrt{2}$.

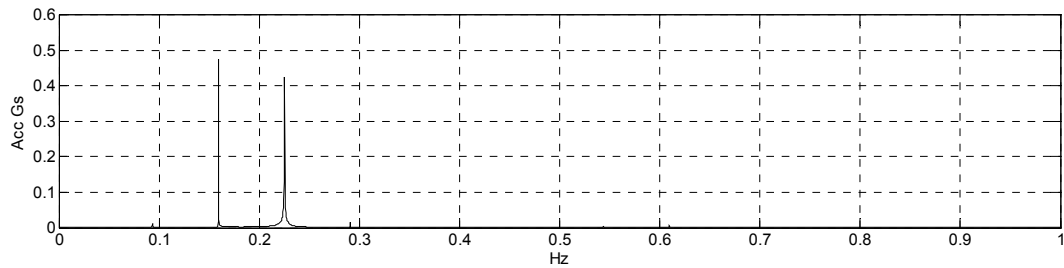
Η απόκριση του ταλαντωτή και το αντίστοιχο της φάσμα παρουσιάζονται στα Σχήματα 2-4 (α) και 2-4 (β) αντίστοιχα. Η εκτιμώμενη στιγμιαία συχνότητα και η εκτιμώμενη περιβάλλουσα του σήματος παρουσιάζονται στα Σχήματα 2-4 (γ) και 2-4 (δ).

Εδώ ο όρος της ελεύθερης ταλάντωσης αποσβένει και μια αποσβενόμενη απόκριση προκύπτει. Ο αλγόριθμος διαχωρισμού εξάγει σε έναν ικανοποιητικό βαθμό την στιγμιαία συχνότητα και το πλάτος της απόκρισης.

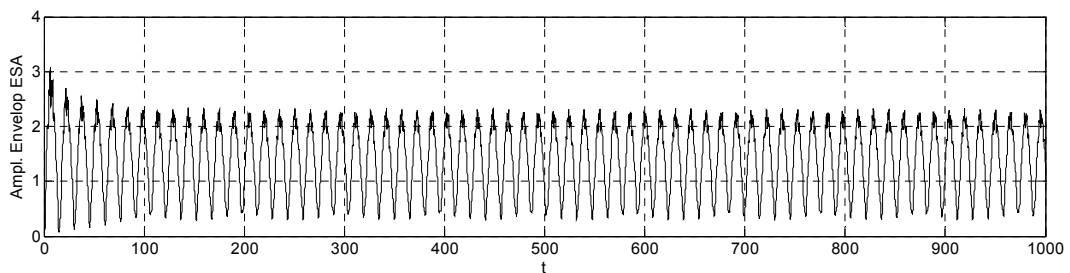
Μέθοδοι Αποδιαμόρφωσης Δυναμικής Απόκρισης Μηχανολογικού Εξοπλισμού



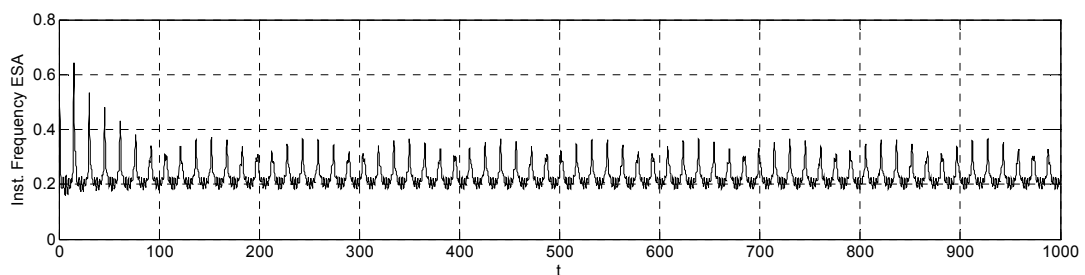
(α)



(β)

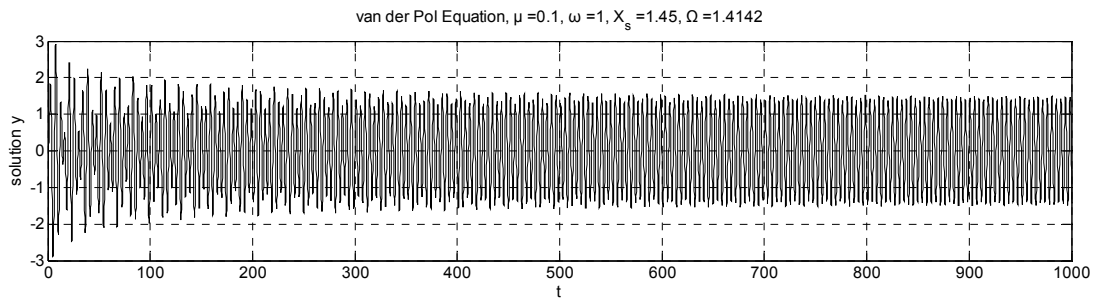


(γ)

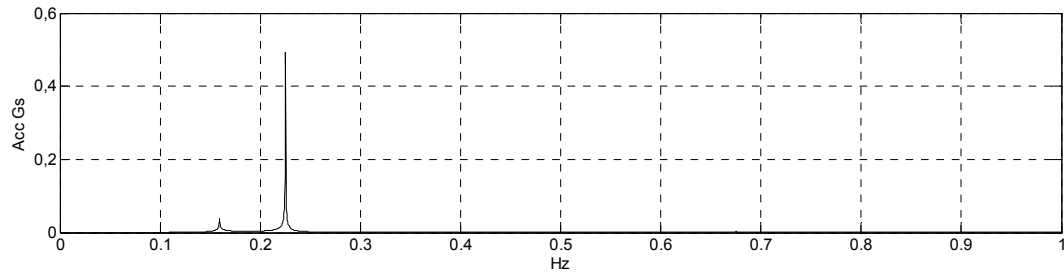


(δ)

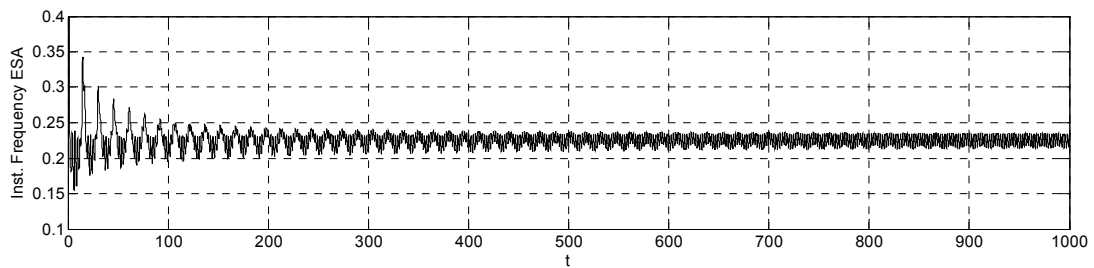
Σχήμα 2-3: Δυναμική απόκριση του ταλαντωτή Van der Pol για $\omega=1$, $\mu=0.1$, $\Omega = \sqrt{2}$ και $X_S=1.25$:
(α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα.



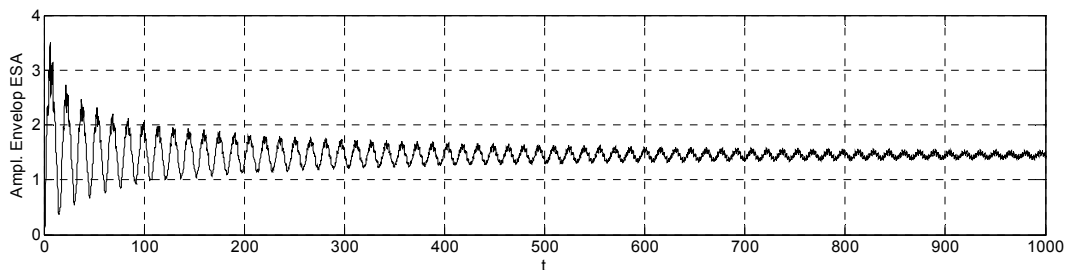
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 2-4: Δυναμική απόκριση του ταλαντωτή Van der Pol για $\omega=1$, $\mu=0.1$, $\Omega = \sqrt{2}$ και $X_S=1.45$: (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα.

2.1.6 Ανάλυση της απόκρισης προσομοιωμένων σημάτων ένσφαιρων τριβών με βλάβη

2.1.6.1 Εφαρμογή του EOSA σε προσομοιωμένα σήματα

Στη συνέχεια ο αλγόριθμος EOSA εφαρμόζεται σε δυναμικές αποκρίσεις ένσφαιρων τριβών με βλάβη στον εσωτερικό ή στον εξωτερικό δακτύλιο. Τα σήματα αυτά παράγονται

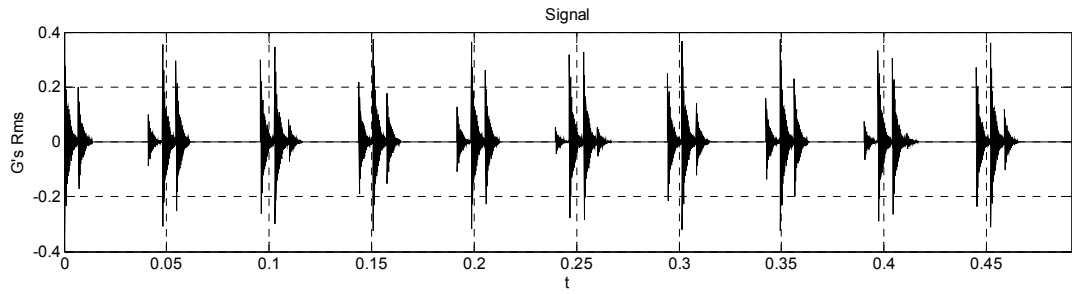
χρησιμοποιώντας το στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης απόκρισης ένσφαιρων τριβέων που παρουσιάζεται στο Παράρτημα. Ο στόχος της αποδιαμόρφωσης σημάτων κραδασμών είναι διπλός. Αρχικά έχει στόχο να απομονώσει τον χαμηλής συχνότητας παράγοντα διαμόρφωσης από τις υψηλές συχνότητες που διεγείρονται. Ο παράγοντας αυτός είναι η χαρακτηριστική συχνότητα της βλάβης του εδράνου και κατά συνέπεια η απομόνωση και η ανάδειξη του παράγοντα αυτού ενισχύει και διευκολύνει τον εντοπισμό και την ταυτοποίηση του τύπου της βλάβης. Ο δεύτερος στόχος είναι ο υπολογισμός της τιμής της διεγερόμενης ιδιοσυχνότητας της κατασκευής εξαιτίας της εμφάνισης της βλάβης. Όπως είναι γνωστό από την θεωρία, σε ένα φάσμα συχνοτήτων δυναμικής απόκρισης ένσφαιρων τριβέων με φθορά, η αιχμή με το μέγιστο πλάτος δεν ταυτίζεται αναγκαστικά με την ιδιοσυχνότητα που έχει διεγερθεί. Η μέγιστη αιχμή συνήθως αντιστοιχεί στο πλησιέστερο στην διεγερμένη ιδιοσυχνότητα ακέραιο πολλαπλάσιο της χαρακτηριστικής συχνότητας του τύπου της βλάβης. Κατά συνέπεια η εξαγωγή της Στιγμιαίας Συχνότητας χρησιμοποιώντας μια μέθοδο αποδιαμόρφωσης μπορεί να συμβάλει στον υπολογισμό της τιμής της διεγερμένης ιδιοσυχνότητας της κατασκευής.

Αρχικά εξετάζεται η εφαρμογή του αλγορίθμου στη δυναμική απόκριση ενός ένσφαιρου τριβέα με φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο.

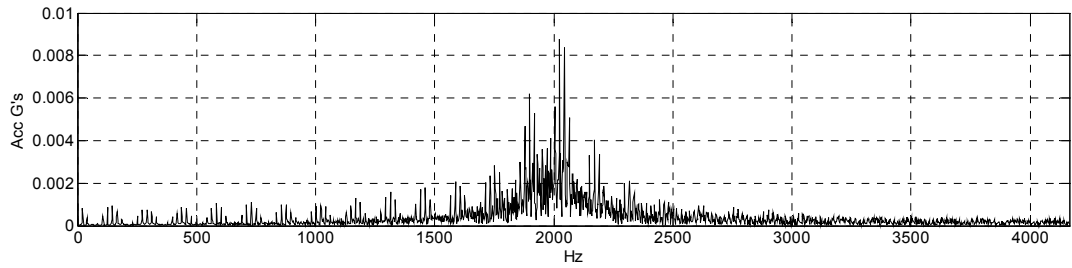
Η φυσική συχνότητα της κατασκευής που διεγείρεται θεωρείται ίση με $f_{nl} = 2,000$ Hz. Εισάγεται ολίσθηση των ένσφαιρων τριβέων έως 5%. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα, πάνω στον οποίο εδράζονται οι ένσφαιροι τριβείς είναι 1,200 ΣΑΛ (rpm), δηλαδή $f_{shaft} = 20$ Hz. Η χαρακτηριστική Συχνότητα Διέλευσης των Στοιχείων Κύλισης στον Εσωτερικό Δακτύλιο (Ball Pass Frequency Inner race – BPF_I) είναι ίση με 146 Hz. Το προσομοιωμένο σήμα έχει μήκος 4,096 δείγματα και καταγράφεται με συχνότητα δειγματοληψίας ίση με 8.333 KHz. Η χρονική κυματομορφή και το αντίστοιχο φάσμα παρουσιάζονται στα Σχήματα 2-5 (α) και 2-5 (β) αντίστοιχα. Το σήμα φιλτράρεται γύρω από την διεγερμένη ζώνη συχνοτήτων και στη συνέχεια η Περιβάλλουσα του σήματος και η Στιγμιαία Συχνότητα εξαγονται με την χρήση του Αλγορίθμου Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή και παρουσιάζονται στα Σχήματα 2-5 (γ) και 2-5 (δ). Ο αλγόριθμος παρουσιάζει εξαιρετικά καλά αποτελέσματα όσο αφορά την περιβάλλουσα του σήματος, όπως παρατηρείται από την κυματομορφή της περιβάλλουσας του σήματος στο Σχήμα 2-5 (γ), καθώς και από το αντίστοιχο φάσμα στο Σχήμα 2-5 (ε).

Οι κρουστικοί παλμοί και η διαμόρφωση κατά πλάτος τόσο από την ταχύτητα περιστροφής του άξονα f_{shaft} όσο και από την χαρακτηριστική Συχνότητα Διέλευσης Σφαιρών στον Εσωτερικό Δακτύλιο (BPF_I) παρουσιάζονται καθαρά στην περιβάλλουσα του σήματος στο Σχήμα 2-5 (γ). Εξετάζοντας το Σχήμα 2-5 (ε), παρατηρούνται στο φάσμα της περιβάλλουσας οι πρώτες τρεις αρμονικές της χαρακτηριστικής συχνότητας BPF_I που συνοδεύονται από πλευρικές αιχμές στην ταχύτητα περιστροφή του άξονα.

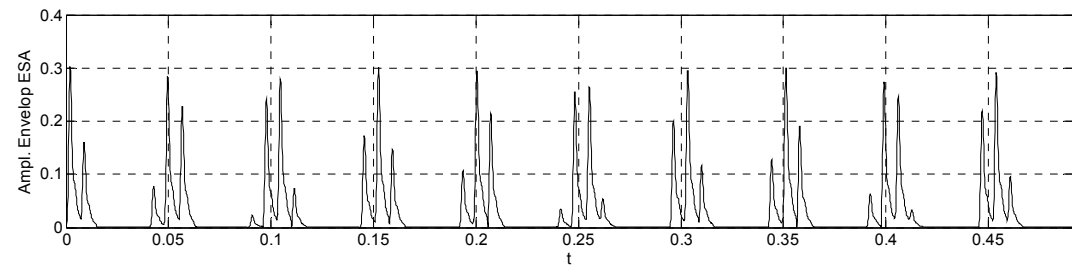
Η Στιγμιαία Συχνότητα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-5 (δ). Εμφανίζει μια σταθερή ευθύγραμμη συμπεριφορά ενώ είναι εμφανής και ένας αριθμός αιχμών σε συγκεκριμένες περιοχές του πεδίου του χρόνου. Η μέση τιμή της εξαχθείσας Στιγμιαίας Συχνότητας υπολογίζεται ίση με 2131 Hz, δηλαδή παρουσιάζει μια απόκλιση της τάξης του 6.5% από την αναμενόμενη τιμή της φυσικής συχνότητας των 2000 Hz.



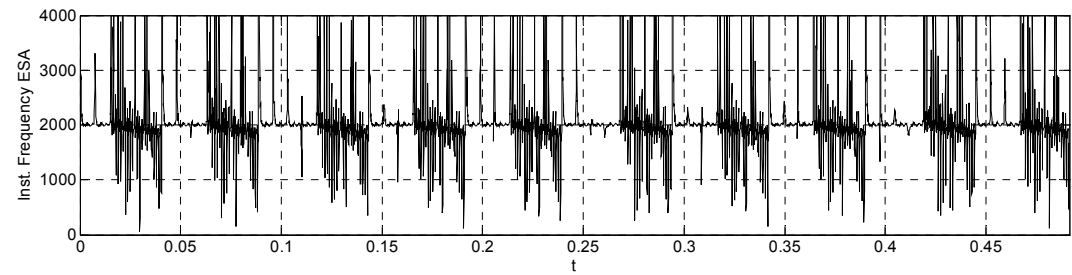
(α)



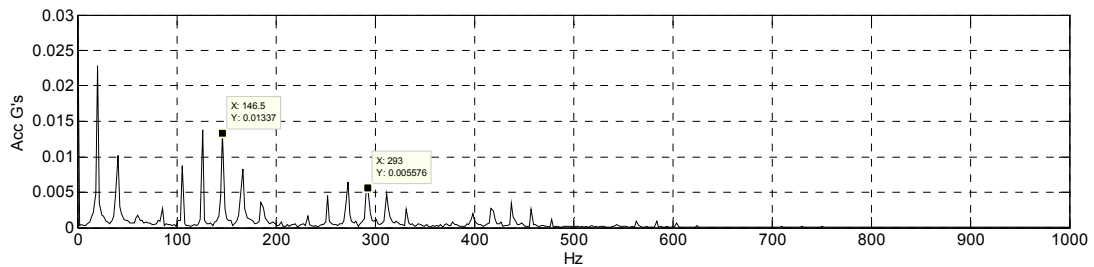
(β)



(γ)



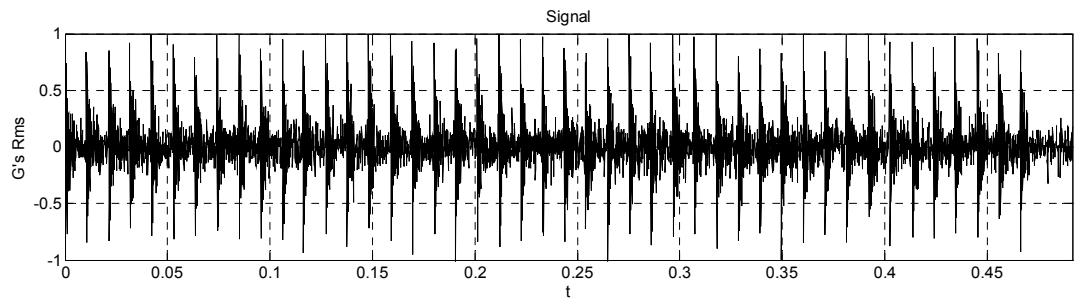
(δ)



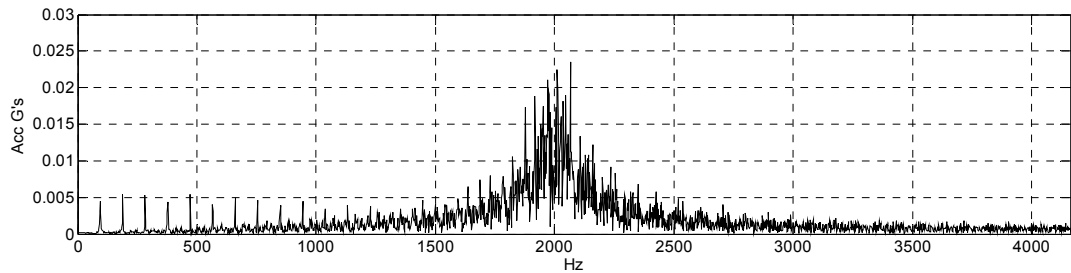
(ε)

Σχήμα 2-5: Σήμα προσομοίωσης της δυναμικής απόκρισης ένσφαιρου τριβέα με βλάβη στον εσωτερικό δακτύλιο: (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα, (ε) Φάσμα της Περιβάλλουσας του σήματος.

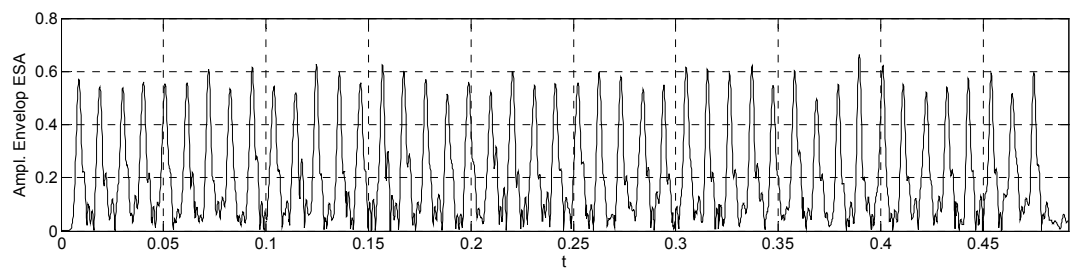
Μέθοδοι Αποδιαμόρφωσης Δυναμικής Απόκρισης Μηχανολογικού Εξοπλισμού



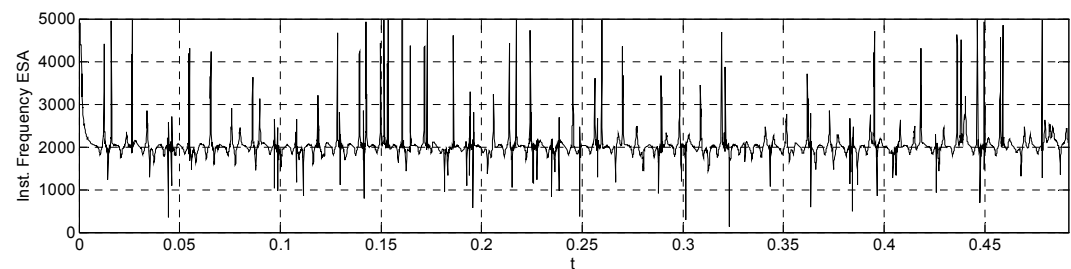
(α)



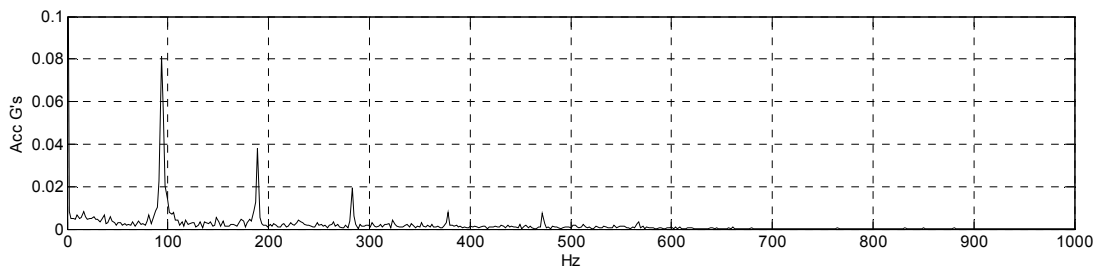
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 2-6: Σήμα προσομοίωσης της δυναμικής απόκρισης ένσφαιρου τριβέα με βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο: (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνότητας, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα, (ε) Φάσμα της Περιβάλλουσας του σήματος.

Στη συνέχεια ο αλγόριθμος EOSA εφαρμόζεται σε ένα σήμα που προσομοιώνει την δυναμική απόκριση ενός ένσφαιρου τριβέα που παρουσιάζει φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα είναι ίση με 20Hz. Η χαρακτηριστική Συχνότητα Διέλευσης Σφαιρών στον Εξωτερικό Δακτύλιο (Ball Pass Frequency Outer race – BPFO) θεωρείται ίση με 94.4 Hz. Το χρονικό σήμα έχει μήκος ίσο με 4,096 δείγματα και καταγράφεται με συχνότητα δειγματοληψίας ίση με 8.333 KHz. Η φυσική συχνότητα της κατασκευής που θεωρείται ότι διεγείρεται από τους κρουστικούς παλμούς επιλέγεται ίση με 2,000 Hz. Τα στοιχεία ολίσθησης θεωρείται ότι παρουσιάζουν ολίσθηση μέχρι 5% ενώ για να συμπεριληφθούν στην προσομοίωση σφάλματα μέτρησης και διάφορες επιδράσεις του περιβάλλοντος προστίθεται εξωτερικά Κανονικός (Gaussian) θόρυβος με επίπεδο έως 10%.

Το προσομοιωμένο χρονικό σήμα και το αντίστοιχό του φάσμα παρουσιάζονται αντίστοιχα στα Σχήματα 2-6 (α) και (β). Το Στιγμιαίο Πλάτος (Περιβάλλουσα) και η Στιγμιαία Συχνότητα παρουσιάζονται αντίστοιχα στα Σχήματα 2-6 (γ) και (δ). Η περιβάλλουσα του σήματος παρουσιάζει μια σειρά από κρουστικούς παλμούς με μια σχεδόν σταθερή χρονική περιοδικότητα, ίση με τον αντίστροφο της αναμενόμενης χαρακτηριστικής Συχνότητας BPFO. Το φάσμα της περιβάλλουσας του σήματος επιδεικνύει διακριτά την χαρακτηριστική Συχνότητα BPFO καθώς και την δεύτερη και Τρίτη αρμονική της όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-6 (ε). Η Στιγμιαία Συχνότητα παρουσιάζει μια γενικά σταθερή ευθύγραμμη συμπεριφορά, με έναν αριθμό αιχμών σε συγκεκριμένες περιοχές του χρονικού σήματος. Η μέση τιμή της εξαχθείσας Στιγμιαίας Συχνότητας υπολογίζεται ίση με 2046 Hz, παρουσιάζοντας μια απόκλιση της τάξεως του 2.3% από την αναμενόμενη φυσική συχνότητα των 2000 Hz.

2.1.6.2 Εφαρμογή του EOSA σε βιομηχανικά σήματα

Η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου ελέγχεται στη συνέχεια με την μελέτη σημάτων τριών τυπικών περιπτώσεων που μετρήθηκαν στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις της εταιρίας Αλουμίνιον της Ελλάδας Α.Ε.

Η συσκευή καταγραφής των δεδομένων βασίζεται σε έναν φορητό H/Y Pentium II/266 MHz, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με την μετρητική κάρτα 6024E της National Instruments, η οποία ενσωματώνεται σε είσοδο PCMCIA. Ο A/D μετατροπέας της μετρητικής κάρτας έχει ανάλυση 12 bits, φέρει 16 αναλογικά κανάλια εισόδου και έχει μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας 200 KHz. Το αισθητήριο που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις ήταν επιταχυνσιόμετρο της Brüel & Kjaer με ευαισθησία 100 mV/g και δυναμική περιοχή από 1 Hz έως 10 KHz. Η καταγραφή των δεδομένων πραγματοποιείται με το λογισμικό LabVIEW της National Instruments.

Στην πρώτη εξεταζόμενη περίπτωση το σήμα προέρχεται από μετρήσεις σε έδρανο βιομηχανικού ανεμιστήρα τροφοδοσίας αέρα λέβητα που παρουσιάζει σφάλμα στον εξωτερικό δακτύλιο. Ο κινητήρας έχει ιπποδύναμη 180 KW. Η πτερωτή αποτελείται από 12 πτερύγια. Ο άξονας του κινητήρα συνδέεται με μεταλλικό σύνδεσμο με τον άξονα της πτερωτής. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα κατά την διάρκεια των μετρήσεων είναι ίση κατά προσέγγιση με 1,200 ΣΑΛ (rpm), δηλαδή ίση με 20 Hz. Το υπό παρακολούθηση έδρανο είναι τύπου 2312 της εταιρίας SKF και παρουσιάζει χαρακτηριστική Συχνότητα Διέλευσης

Σφαιρών στον Εξωτερικό Δακτύλιο BPFO ίση με 4.72 επί την συχνότητα περιστροφής του άξονα, οδηγώντας σε μια θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης συχνότητας BPFO κατά προσέγγιση ίση με 94 Hz. Το σήμα έχει μήκος 4,096 δείγματα και καταγράφηκε με συχνότητα δειγματοληψίας ίση με 8.33 KHz.

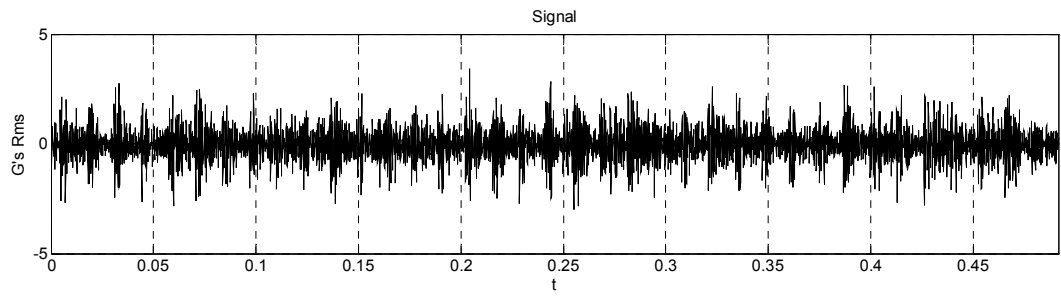
Το μετρούμενο σήμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-7 (α). Εξετάζοντας το χρονικό σήμα είναι εμφανής η ύπαρξη μιας σειράς κρουστικών παλμών, επιβεβαιώνοντας έτσι την ορθότητα του στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης βλαβών ένσφαιρων τριβέων που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Το χρονικό διάστημα μεταξύ των διαδοχικών κρουστικών παλμών είναι σχεδόν σταθερό και ίση με 0.0106 sec. Η τιμή του χρονικού αυτού διαστήματος σχετίζεται με την θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης χαρακτηριστικής συχνότητας BPFO. Το φάσμα της μέτρησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-7 (β) και παρουσιάζει μια ζώνη διέγερσης συχνοτήτων με εύρος από 1,000 έως 2,500 Hz.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο αλγόριθμος EOSA στο σήμα. Οι κρούσεις είναι εμφανείς καθαρά στην περιβάλλουσα του σήματος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-7 (γ). Το φάσμα της περιβάλλουσας, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-7 (ε), κυριαρχείται από την επαναλαμβανόμενη συχνότητα της ακολουθίας των κρούσεων, δηλαδή από την χαρακτηριστική συχνότητα BPFO και τις αρμονικές της.

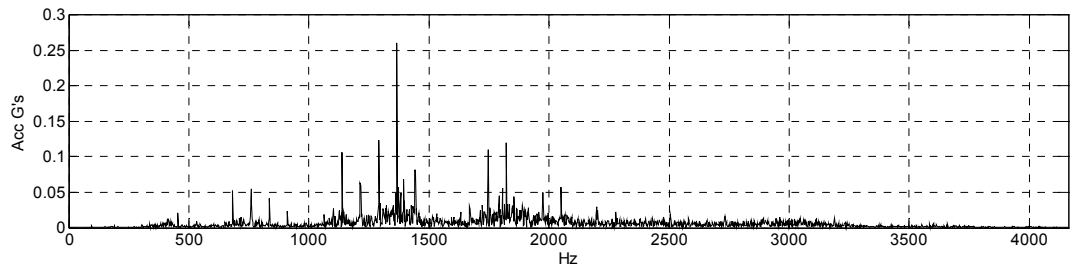
Η υπολογισμένη Στιγμιαία Συχνότητα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-7 (δ). Μελετώντας την κυματομορφή εξάγεται το συμπέρασμα ότι διεγείρεται μια μοναδική ιδιοσυχνότητα της κατασκευής με τιμή γύρω στα 1400 Hz. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται από το θέση και το εύρος της διεγερμένης ζώνης συχνοτήτων που εμφανίζεται στο φάσμα του Σχήματος 2-7 (β).

Στην δεύτερη εξεταζόμενη περίπτωση η μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε ένσφαιρο τριβέα αντλίας, που παρουσιάζει φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα κατά την διάρκεια των μετρήσεων ήταν περίπου ίση με 1,320 Σ.Α.Λ. (rpm), δηλαδή 22 Hz. Ο υπό παρακολούθηση ένσφαιρος τριβέας είναι τύπου 22205 EK και η Συχνότητα Διέλευσης Σφαιρών στον Εσωτερικό Δακτύλιο BPF1 είναι ίση με 8.32 επί την συχνότητα περιστροφής του άξονα, οδηγώντας σε μια θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης χαρακτηριστικής συχνότητας BPF1 περίπου ίση με 183 Hz. Το σήμα έχει μήκος 4,096 δείγματα και η συχνότητα δειγματοληψίας είναι ίση με 8.33 KHz.

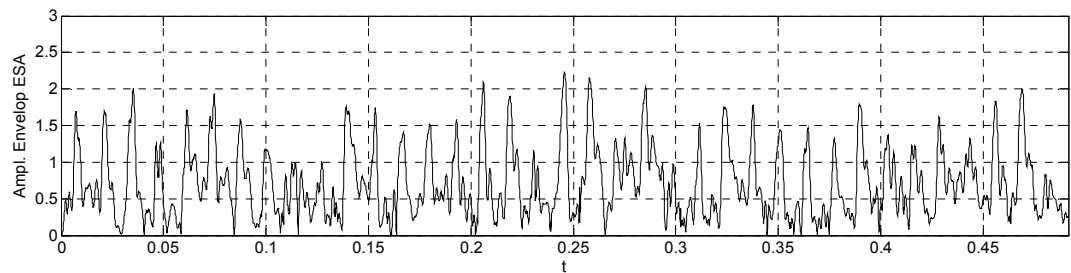
Το μετρούμενο σήμα και το αντίστοιχο φάσμα του παρουσιάζονται αντίστοιχα στα Σχήματα 2-8 (α) και (β), αντίστοιχα. Παρατηρώντας το χρονικό σήμα στο Σχήμα 2-8 (α) είναι εμφανής μια ακολουθία κρούσεων. Το πλάτος των κρουστικών παλμών διαμορφώνεται τόσο από την συχνότητα περιστροφής του άξονα όσο και από την χαρακτηριστική συχνότητα BPF1. Η ανάλυση του φάσματος του Σχήματος 2-8 (β) επιβεβαιώνει την ύπαρξη φθοράς στον εσωτερικό δακτύλιο του εδράνου. Στην περίπτωση αυτή, γύρω από τις διεγερόμενες ιδιοσυχνότητες της κατασκευής, αναπτύσσονται πλευρικές αιχμές σε συχνότητες ίσες με την χαρακτηριστική συχνότητα BPF1 και την συχνότητα περιστροφής του άξονα.



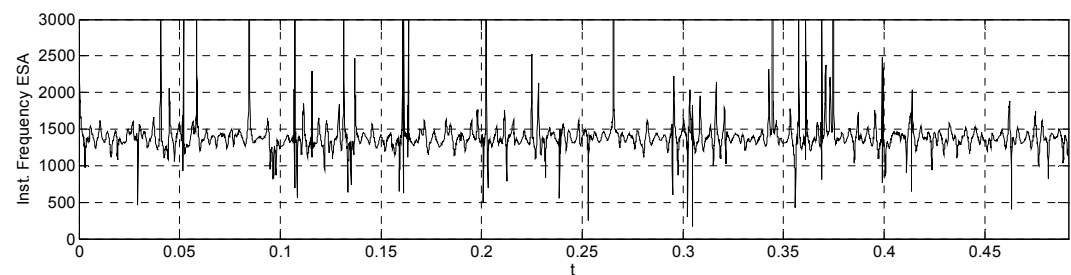
(a)



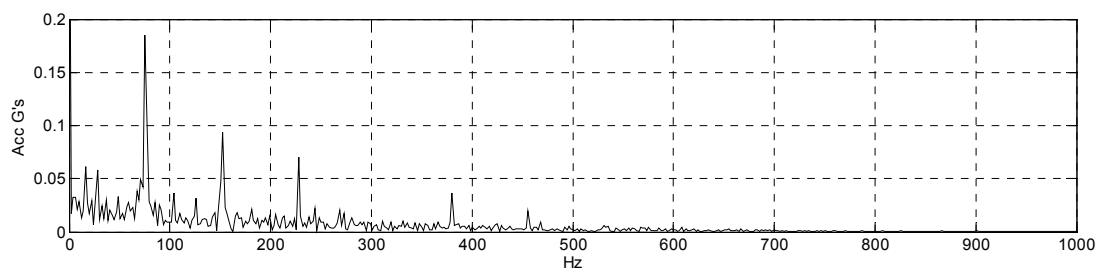
(b)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 2-7: Σήμα κραδασμών Περίπτωσης I, Σήμα ένσφαιρου τριβέα με βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο: (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα, (ε) Φάσμα της Περιβάλλουσας του σήματος.

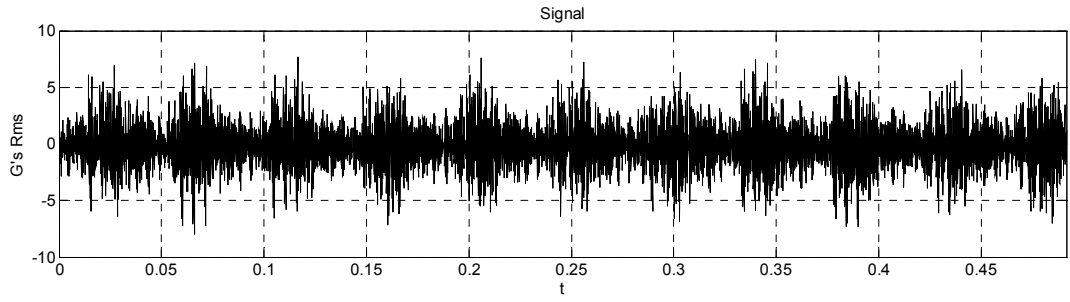
Η εφαρμογή του αλγορίθμου αποδιαμόρφωσης οδηγεί στον υπολογισμό της περιβάλλουσας του χρονικού σήματος που φαίνεται στο Σχήμα 2-8 (γ). Εξετάζοντας το χρονικό σήμα είναι εμφανείς οι κρουστικοί παλμοί με περίοδο επανάληψης που αντιστοιχεί στον αντίστροφο της χαρακτηριστικής συχνότητας BPF1 του εδράνου. Η Στιγμαία Συχνότητα του σήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-8 (δ). Εξετάζοντας την μορφή της στιγμιαίας συχνότητας, παρατηρείται μια ευθύγραμμη συμπεριφορά που αντιστοιχεί σε υπολογισμένη στιγμιαία συχνότητα γύρω στα 1924 Hz. Η τιμή αυτή επιβεβαιώνεται και από την μορφή του φάσματος του σήματος (Σχήμα 2-8 (β)) όπου η κεντρική συχνότητα εκτιμάται γύρω στα 1850 Hz.

Το φάσμα της περιβάλλουσας του σήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-8 (ε). Το φάσμα του αποδιαμορφωμένου σήματος αποκαλύπτει αιχμές σε συχνότητες ίσες με την συχνότητα περιστροφής του άξονα f_{shaft} και με την χαρακτηριστική Συχνότητα Διέλευσης από τον Εσωτερικό Δακτύλιο BPF1. Επιπλέον είναι ευδιάκριτη η παρουσία πλευρικών αιχμών γύρω από τις αρμονικές της BPF1 σε αποστάσεις ίσες με την συχνότητα περιστροφής του άξονα, γεγονός που υπογραμμίζει και αναδεικνύει τον τύπο της βλάβης.

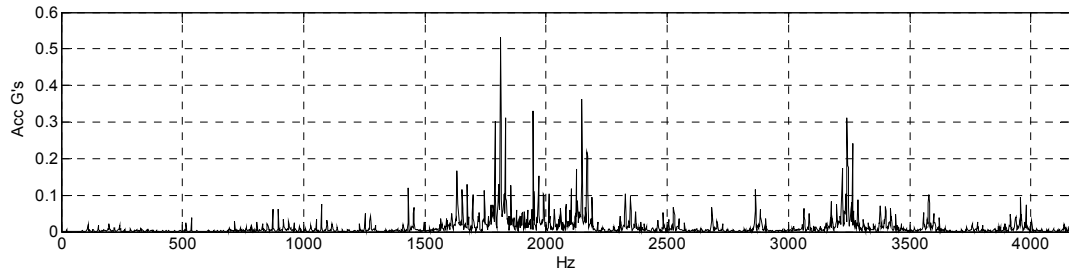
Η μέτρηση της τρίτης περίπτωσης πραγματοποιήθηκε σε ένσφαιρο τριβέα ενός συμπιεστή, που παρουσιάζει φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα κατά την διάρκεια των μετρήσεων ήταν γύρω στις 1,350 Σ.Α.Λ. (rpm), δηλαδή 22.5 Hz. Το ελεγχόμενο έδρανο είναι τύπου 22228 cck/w33 της εταιρίας SKF και παρουσιάζει Συχνότητα Διέλευσης Σφαιρών στον Εξωτερικό δακτύλιο BPF0 ίση με 8.22 επί την συχνότητα περιστροφής του άξονα, οδηγώντας σε μια θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης συχνότητας BPF0 γύρω στα 185 Hz. Το σήμα έχει μήκος 4,096 δείγματα και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με 8.33 KHz.

Το μετρούμενο χρονικό σήμα και το αντίστοιχο φάσμα παρουσιάζονται στα Σχήματα 2-9 (α) και (β), αντίστοιχα. Παρατηρώντας την κυματομορφή του χρονικού σήματος στο Σχήμα 2-9 (α), μια ακολουθία κρουστικών παλμών είναι ευδιάκριτη. Η χειροτέρευση της κατάστασης λειτουργίας του ένσφαιρου τριβέα συνοδεύεται από σταδιακή και σταθερή αύξηση του πλάτους των κρούσεων. Το φάσμα της μέτρησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-9 (β), οδηγεί στον εντοπισμό και την ταυτοποίηση του τύπου της βλάβης, που είναι ύπαρξη φθοράς στον εξωτερικό δακτύλιο. Η ανάπτυξη της φθοράς αυτής στον εξωτερικό δακτύλιο, διεγείρει μια ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 1,300 and 2,500 Hz, καθώς οι περιστρεφόμενες σφαίρες συγκρούονται με την φθορά. Κατά συνέπεια, πλευρικές αιχμές αναπτύσσονται γύρω από τις διεγερμένες ιδιοσυχνότητες της κατασκευής σε απόσταση ίση με την συχνότητα BPF0 της βλάβης.

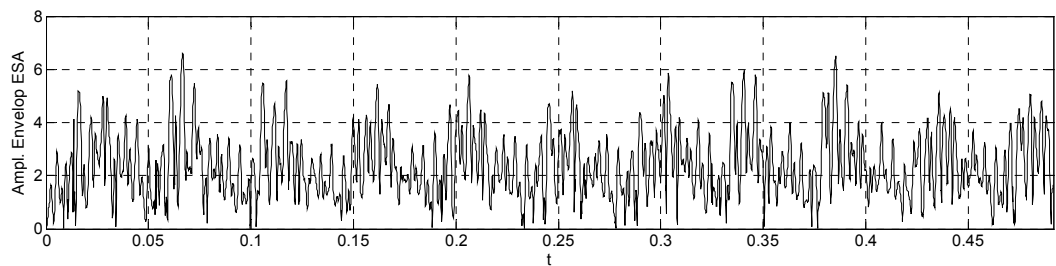
Η υπολογισμένη Στιγμαία Συχνότητα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-9 (δ) και εκτιμάται περίπου ίση με 2000Hz. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί επιπλέον από το φάσμα του σήματος του Σχήματος 2-9 (β). Η περιβάλλουσα του σήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 2-9 (γ). Στο φάσμα της περιβάλλουσας του σήματος, εμφανίζονται χαρακτηριστικές αιχμές στην συχνότητα περιστροφής του άξονα f_{shaft} , στην Χαρακτηριστική Συχνότητα Διέλευσης Σφαιρών στον Εξωτερικό Δακτύλιο καθώς επίσης και στη δεύτερη, τρίτη και τέταρτη αρμονική της.



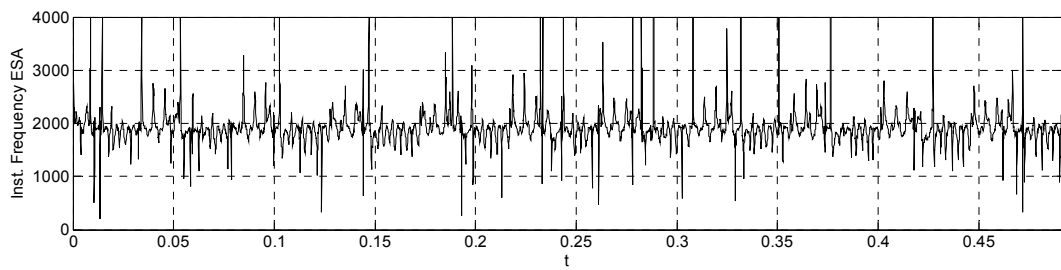
(α)



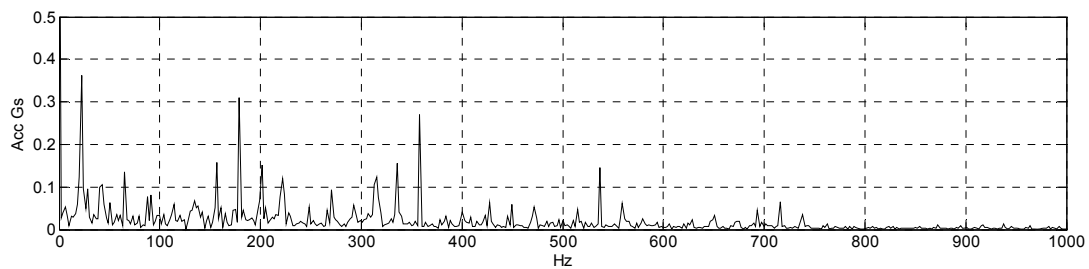
(β)



(γ)



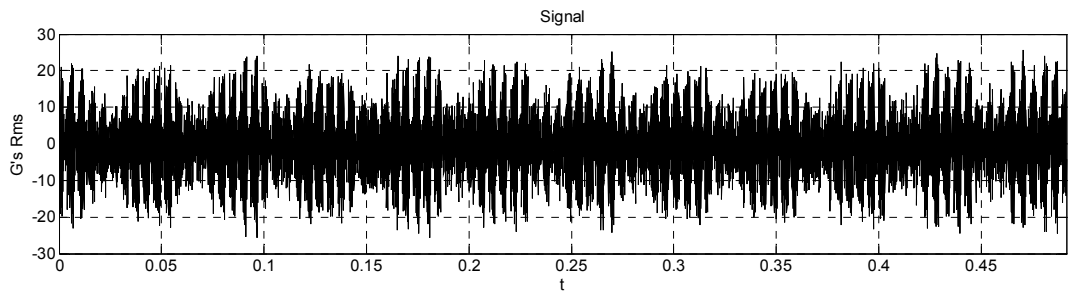
(δ)



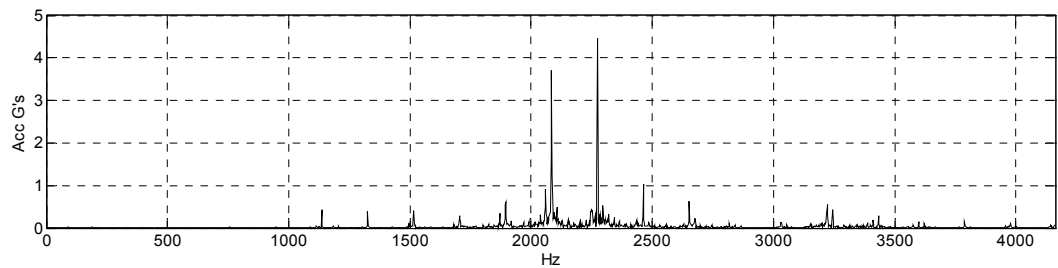
(ε)

Σχήμα 2-8: Σήμα κραδασμών Περίπτωσης Π, Σήμα ένσφαιρου τριβέα με βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο: (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα, (ε) Φάσμα της Περιβάλλουσας του σήματος.

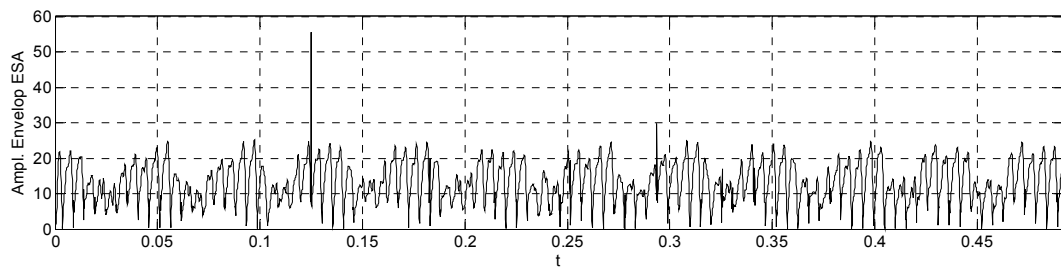
Μέθοδοι Αποδιαμόρφωσης Δυναμικής Απόκρισης Μηχανολογικού Εξοπλισμού



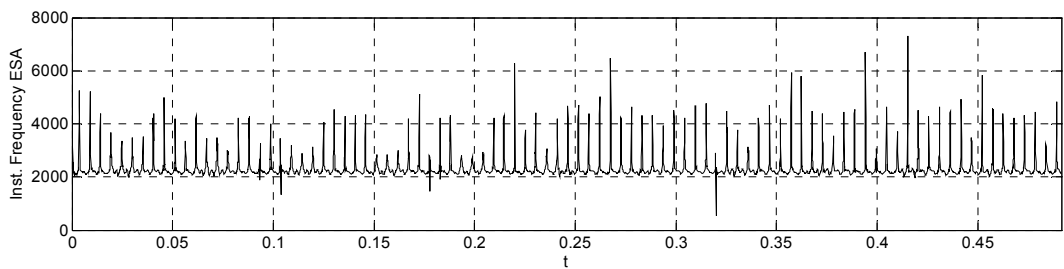
(α)



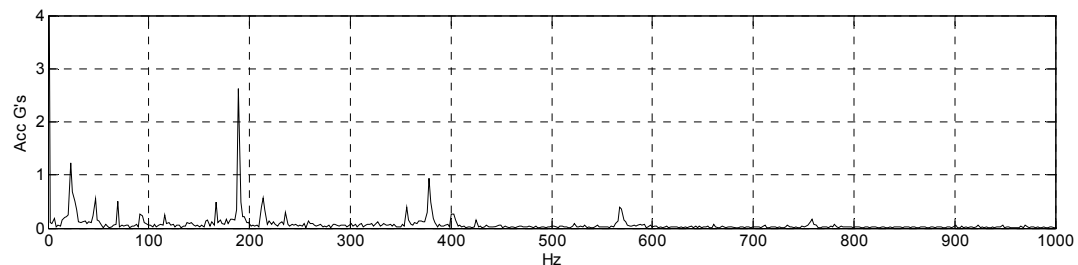
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 2-9: Σήμα κραδασμών Περίπτωσης III, Σήμα ένσφαιρου τριβέα με βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο: (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα, (ε) Φάσμα της Περιβάλλουσας του σήματος.

2.1.7 Συμπεράσματα

Ο αλγόριθμος EOSA προσφέρει ένα ενδιαφέρον εργαλείο για την ανάλυση δυναμικών αποκρίσεων μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων, που χαρακτηρίζονται από απότομες αλλαγές στις χρονικές κυματομορφές τους και κατά συνέπεια χρειάζονται αυξημένη ευκρίνεια στο πεδίο του χρόνου.

Εξετάζοντας τις περιπτώσεις δυναμικών συστημάτων που μελετήθηκαν, εξάγεται αβίαστα το συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος υπολογίζει αποτελεσματικά και με μεγάλη ακρίβεια και ευκρίνεια το στιγμιαίο πλάτος (περιβάλλουσα) της δυναμικής απόκρισης και ως έναν ικανοποιητικό βαθμό την στιγμιαία Συχνότητα. Όμως είναι απαραίτητες συγκεκριμένες βελτιώσεις με σκοπό την αύξηση της ομαλότητας των κυματομορφών της Στιγμιαίας Συχνότητας. Ο αλγόριθμος παρουσιάζει μικρή υπολογιστική πολυπλοκότητα και μπορεί να πραγματοποιηθεί εξαιρετικά εύκολα.

2.2 Αποδιαμόρφωση με χρήση Μετατοπιζόμενων Μιγαδικών Κυματιδίων Morlet

Ανάμεσα στις πολύμορφες και πολυάριθμες μεθόδους αποδιαμόρφωσης που έχουν προταθεί [Randall 1987], η πιο καλά καθιερωμένη είναι η μέθοδος που βασίζεται στον μετασχηματισμό Hilbert. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει δύο βασικά μειονεκτήματα: (i) Καθώς είναι μια μέθοδος που βασίζεται ολοκληρωτικά στην Ανάλυση Fourier, αγνοεί τα τοπικά χρονικά χαρακτηριστικά ενός σήματος και κατά συνέπεια την μεταβολή της κατανομής της ενέργειας στις αλλαγές της συχνότητας από την μια χρονική στιγμή στην άλλη, (ii) Απαιτεί ως ένα σημαντικό βαθμό χειροκίνητη παρέμβαση από έναν έμπειρο χρήστη ο οποίος επιλέγει τα χαρακτηριστικά της ζώνης διέγερσης που θα χρησιμοποιηθεί.

Με σκοπό να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα αυτά, μια μέθοδος αποδιαμόρφωσης που στηρίζεται στη χρήση Μιγαδικών Μετατοπισμένων Κυματιδίων Morlet (CSMW) έχει προταθεί [Nikolaou and Antoniadis 2002a] και στη συνέχεια εφαρμοστεί σε έναν αριθμό διαφορετικών περιπτώσεων [Zhang et al. 2006]. Τα Μιγαδικά Μετατοπισμένα Κυματίδια Morlet παρουσιάζουν έναν αριθμό πλεονεκτημάτων έναντι των άλλων παρόμοιων μεθόδων.

Πρώτον, καθώς τα Κυματίδια Morlet είναι διαμορφωμένα στο πεδίο του χρόνου από ένα Κανονικού (Gaussian) σχήματος χρονικό παράθυρο (και για το λόγο αυτό είναι επίσης γνωστά ως κυματίδια Gabor), παρουσιάζουν την βέλτιστη ευκρίνεια (resolution) ταυτόχρονα στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας [Mallat 1998].

Δεύτερον, συγκρινόμενα με τον Διακριτό Κυματιδιακό Μετασχηματισμό (Discrete Wavelet Transform - DWT), επιτρέπουν τον συνεχή (και κατά συνέπεια και πιο ακριβή) υπολογισμό τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Επιπλέον, δεν σχετίζονται με φαινόμενα φασματικής διαρροής [Peng et al. 2009]. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ ο Συνεχής Κυματιδιακός Μετασχηματισμός (Continuous Wavelet Transform – CWT) θεωρείται υπολογιστικά πιο απαιτητικός σε σχέση με τον Διακριτό Κυματιδιακό Μετασχηματισμό [Nikolaou and Antoniadis 2002b], [Wang et al. 2009] σχετικοί αλγόριθμοι [Büssow 2007] μπορούν να ξεπεράσουν το μειονέκτημα αυτό ως έναν αξιοσημείωτο βαθμό.

Τρίτον, σε αντίθεση με την κλασική αναπαράσταση πραγματικών αριθμών του Κυματιδιακού Μετασχηματισμού Morlet [Lin and Qu 2000], τα Μιγαδικά Μετατοπισμένα Κυματίδια Morlet οδηγούν σε μιγαδικούς κυματιδιακούς συντελεστές στο πεδίο του χρόνου, επιτρέποντας κατά συνέπεια τον απευθείας υπολογισμό της περιβάλλουσας του σήματος από το πλάτος των κυματιδιακών συντελεστών, με τρόπο παρόμοιο με τον κλασικό Μετασχηματισμό Hilbert.

Τέλος, σε αντίθεση με την κλασική αρχή της κλιμάκωσης του κυματιδίου στο πεδίο του χρόνου ή της συχνότητας, το οποίο επιτρέπει την αναγνώριση μόνο μίας παραμέτρου, της κυματιδιακής κλίμακας [Hong and Liang 2009], η αρχή της μετατόπισης του κυματιδίου Morlet στο πεδίο της συχνότητας [Staszewski 1997], [Nikolaou and Antoniadis 2002a] επιτρέπει την ταυτόχρονη βέλτιστη επιλογή και των δύο κυματιδιακών παραμέτρων που είναι απαραίτητες για την αναγνώριση του ως ένα κατάλληλο φίλτρο στο πεδίο της συχνότητας: Την Κεντρική Συχνότητα (Center Frequency) και το Εύρος (Bandwidth).

Σχετικά με την βέλτιστη επιλογή των δύο προαναφερθεισών παραμέτρων, ένας αριθμός προσεγγίσεων έχει προταθεί. Μια προσέγγιση για την επιλογή του Συντελεστή Σχήματος (Shape Factor) του κυματιδίου Morlet (που σχετίζεται άμεσα με το εύρος του σήματος) ελαχιστοποιώντας με έναν τρόπο την Εντροπία του σήματος προτάθηκε στο [Lin and Qu 2000]. Συμπληρωματικά ή σε συνδυασμό με την εντροπία, ο Δείκτης Κορυφής προτείνεται επιπροσθέτως στο [Nikolaou and Antoniadis 2002a] για την επιλογή του εύρους στο πρώτο βήμα και ο αριθμός των αιχμών του κυματιδιακού πλάτους που ξεπερνούν ένα όριο προτείνεται διαδοχικά για την επιλογή της Κεντρικής Συχνότητας. Η μεγιστοποίηση της Κύρτωσης παρουσιάζεται στο [Lin and Zuo 2003] για την ταυτόχρονη βέλτιστη επιλογή της κυματιδιακής κλίμακας και του κυματιδιακού Συντελεστή Σχήματος (Shape Factor). Η ελαχιστοποίηση της Εντροπίας χρησιμοποιείται σε πρώτο βήμα ως κριτήριο για την επιλογή του Κυματιδιακού Συντελεστή Σχήματος (Wavelet Shape Factor) στο [Qiu et al. 2006]. Ένας Δείκτης Εξομάλυνσης (Smoothness Index factor) προτείνεται στο [Bozchalooi and Liang 2007] για την ταυτόχρονη βέλτιστη επιλογή των δύο παραμέτρων του φίλτρου. Μια προσέγγιση που συνδυάζει την Ενέργεια και την Κύρτωση χρησιμοποιήθηκε στο [Hong and Liang 2009] για την επιλογή της κυματιδιακής κλίμακας, ενώ η Πολυπλοκότητα (Complexity) Lempel-Ziv χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την εκτίμηση της σοβαρότητας της βλάβης. Ένας συνδυασμός της Τεχνικής Αφαίρεσης Φάσματος (Spectral Subtraction Technique) με τον Δείκτη Εξομάλυνσης της [Bozchalooi and Liang 2007] προτάθηκε στο [Bozchalooi and Liang 2008] για την διαδοχική επιλογή της Κλίμακας και του Εύρους.

Ωστόσο, η Κύρτωση (συνεπώς και η στενά συνδεδεμένη με αυτήν έννοια της Εντροπίας) έχει βρεθεί να είναι ευαίσθητη σε ακραίες τιμές [Bozchalooi and Liang 2007], ενώ τα Κριτήρια που βασίζονται στην Ενέργεια έχουν βρεθεί να είναι ευαίσθητα στις αλλαγές κλίμακας, όταν είναι μόνο η κλίμακα θεωρείται ως η παράμετρος του κυματιδίου που πρέπει να επιλεγεί [Hong and Liang 2009].

2.2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο Κυματιδιακού Μετασχηματισμού

2.2.1.1 Εισαγωγή

Οι κυματιδιακές απεικονίσεις προσφέρουν μια σημαντική δυνατότητα για σύλληψη τοπικών φαινομένων σε πολλά σήματα. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας απεικονίσεις μέσω διπλών ολοκληρωμάτων (συνεχείς μετασχηματισμοί) ή μέσω διπλών σειρών (διακριτοί μετασχηματισμοί). Γονιμοποιός σε αυτές τις απεικονίσεις είναι οι διαδικασίες της κλιμάκωσης και μετατόπισης μιας παραγόμενης (μητρικής) συνάρτησης. Για μια περίοδο κάποιων δεκαετιών, η κυματιδιακή ανάλυση έχει θέσει ένα αυστηρό μαθηματικό πλαίσιο και έχει εφαρμοστεί σε ποικίλα πεδία. Οι οικογένειες κυματιδίων συνδεδεμένες με συγκεκριμένες μητρικές συναρτήσεις έχουν αποδειχθεί κατάλληλες για μια ποικιλία προβλημάτων. Στο πλαίσιο αυτό, αλγόριθμοι ταχείας αποσύζευξης και ανακατασκευής εξασφαλίζουν υπολογιστική αποδοτικότητα και ανταγωνίζονται τους αλγορίθμους κλασικής φασματικής ανάλυσης όπως ο Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform – FFT). Το πεδίο της ανάλυσης κραδασμών ωφελήθηκε από την αξιοσημείωτη αυτή ανάπτυξη σε συνδυασμό με την παρακολούθηση κραδασμών, την αναγνώριση συστημάτων, τον εντοπισμό βλαβών και άλλες εργασίες.

2.2.1.2 Ανάλυση Χρόνου – Συχνότητας

Μια βολική προσέγγιση για την εισαγωγή του κυματιδιακού μετασχηματισμού είναι μέσω της αρχής της αναπαράστασης χρόνου-συχνότητας σημάτων. Στην κλασική θεωρία Fourier, ένα σήμα μπορεί να αναπαρασταθεί είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο συχνότητας και οι συντελεστές Fourier ορίζουν το μέσο φασματικό περιεχόμενο σε όλη την χρονική διάρκεια του σήματος. Η απεικόνιση Fourier είναι αποτελεσματική για σήματα, που είναι στάσιμα, εξετάζοντας τις παραμέτρους που θεωρούνται σημαντικές για το εξεταζόμενο πρόβλημα, όμως καθίστανται ανεπαρκείς για μη στάσιμα σήματα όπου οι παράμετροι αυτοί μπορεί να αναπτυχθούν ταχύτατα στον χρόνο.

Η ανάγκη για χρονοσυχνοτική απεικόνιση είναι προφανής σε ένα ευρύ φάσμα φυσικών προβλημάτων, όπως ακουστικής, επεξεργασίας εικόνας, σεισμών και ανέμου και σε μια πληθώρα άλλων. Μεταξύ των χρονικών-συχνοτικών απεικονίσεων που είναι διαθέσιμες μέχρι σήμερα, ο κυματιδιακός μετασχηματισμός έχει μοναδικά χαρακτηριστικά με όρους αποδοτικότητας και ευελιξίας. Σε μαθηματικούς όρους, εμπλέκει την έννοια της κλίμακας ως υποκατάστατο της έννοιας της συχνότητας στην θεωρία Fourier. Κατά συνέπεια, ορίζεται ως απεικόνιση χρόνου-κλίμακας. Η διατύπωσή της απορρέει από μια γενίκευση της προηγούμενης χρονοσυχνοτικής απεικόνισης, γνωστή ως μετασχηματισμός Gabor. Για πληρότητα και για υπογράμμιση των αξιοσημείωτων πλεονεκτημάτων που επιτυγχάνονται από την ανάπτυξη του κυματιδιακού μετασχηματισμού, ο μετασχηματισμός Gabor περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω.

2.2.1.3 Μετασχηματισμός Gabor

Τα πρώτα βήματα στην ανάλυση χρόνου-συχνότητας ανατρέχουν στην εργασία του Gabor [Gabor 1946] που εφήρμοσε για επεξεργασία σήματος θεμελιώδεις έννοιες που

αναπτύχθηκαν στην κβαντική μηχανική από τον Wigner [Wigner 1932] μια δεκαετία νωρίτερα. Δεδομένης μιας συνάρτησης $f(t)$ που ανήκει στο χώρο των πεπερασμένης ενέργειας μονοδιάστατων συναρτήσεων, με σύμβολο $L^2(\mathbb{R})$ ο Gabor εισήγαγε τον μετασχηματισμό

$$G_f(\omega, t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{g(t-t_0)} e^{-i\omega(t-t_0)} dt \quad (2.19)$$

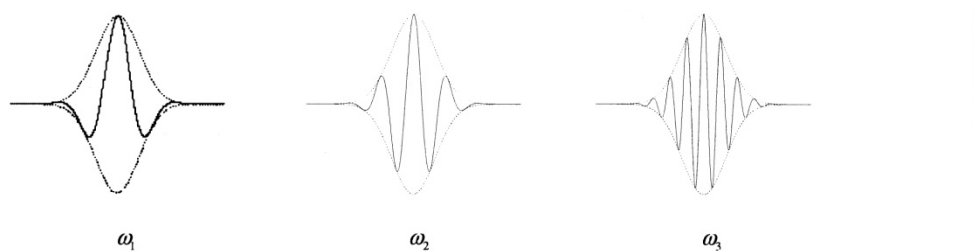
όπου $g(t)$ είναι ένα παράθυρο και η μπάρα (-) υποδηλώνει συζυγή μιγαδικό αριθμό. Ο μετασχηματισμός αυτός, που γενικά αναφέρεται ως συνεχής μετασχηματισμός Gabor (Continuous Gabor transform – CGT) ή Σύντομου Χρόνου Μετασχηματισμός Fourier (Short-Time Fourier Transform) της $f(t)$, είναι μια πλήρης απεικόνιση της $f(t)$. Κατά συνέπεια, η αρχική συνάρτηση $f(t)$ μπορεί να ανακατασκευαστεί ως:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi \|g\|^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_f(\omega, t_0) g(t-t_0) e^{i\omega(t-t_0)} d\omega dt_0 \quad (2.20)$$

όπου $\|g\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |g(t)|^2 dt$. Ο μετασχηματισμός Gabor μπορεί να θεωρηθεί ως μια προβολή της $f(t)$ σε μια οικογένεια $\{g_{(\omega, t_0)}(t); \omega, t_0 \in \mathbb{R}\}$ των μετατοπισμένων και διαμορφωμένων αντιγράφων (ατόμων) της $g(t)$ και εκφράζεται στη μορφή:

$$g_{(\omega, t_0)}(t) = e^{i\omega(t-t_0)} g(t-t_0) \quad (2.21)$$

Αυτά τα άτομα χρόνου-συχνότητας, που αναφέρονται και ως συναρτήσεις Gabor, παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-10 για 3 διαφορετικές τιμές της ω . Ξεκάθαρα, εάν η $g(t)$ είναι μια κατάλληλη συνάρτηση παραθύρου, η σχέση (2.19) μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ο καθιερωμένος μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης $f(t)$, εντοπισμένος στην χρονική στιγμή t_0 . Υπό το πρίσμα αυτό, t_0 είναι η παράμετρος του χρόνου, που δίνει το κέντρο του παραθύρου και ω είναι η παράμετρος συχνότητας, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού Fourier του “παραθυροποιημένου” σήματος.



Σχήμα 2-10: Γραφική Παράσταση της Συνάρτησης Gabor $g(\omega, t_0)$ συναρτήσεως της ανεξάρτητης μεταβλητής t για τρεις (3) τιμές της συχνότητας ω .

Όπως υπογορεύει η διαίσθηση, η ακρίβεια της απεικόνισης του CGT (σχέση (2.20)) της $f(t)$ εξαρτάται από την συνάρτηση παραθύρου $g(t)$, η οποία μπορεί να επιδείξει καλές ιδιότητες εντοπισμού τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Όπως συζητήθηκε στον Cohen [Cohen 1995], ένα μέτρο των ιδιοτήτων εντοπισμού μπορεί να

αποκτηθεί από την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της πυκνότητας $|g(t)|^2$ στο πεδίο του χρόνου, δηλαδή:

$$\langle t \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} t |g(t)|^2 dt \quad (2.22)$$

και

$$\sigma_t^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (t - \langle t \rangle)^2 |g(t)|^2 dt \quad (2.23)$$

Οι αντίστοιχες των εξισώσεων (2.22) και (2.23) στο πεδίο της συχνότητας είναι:

$$\langle \omega \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \omega |\hat{G}(\omega)|^2 d\omega \quad (2.24)$$

όπου $\hat{G}(\omega)$ υποδηλώνει τον μετασχηματισμό Fourier της $g(t)$ που δίνεται από την σχέση:

$$\hat{G}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.25)$$

Η διάσημη αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg είναι στην πραγματικότητα μια μαθηματική αποδειγμένη ιδιότητα και δηλώνει ότι οι τιμές σ_t και σ_ω δεν μπορεί να είναι ανεξάρτητα μικρές [Cohen 1995]. Συγκεκριμένα, για ένα τυχαίο κανονικοποιημένο παράθυρο έτσι ώστε $|g|^2 = 1$ μπορεί να δειχθεί ότι

$$\sigma_t \sigma_\omega \geq 1/2 \quad (2.26)$$

Κατά συνέπεια, υψηλή ανάλυση (resolution) στο πεδίο του χρόνου (μικρή τιμή της σ_t) μπορεί γενικά να επιτευχθεί μόνο με την επιβάρυνση μιας φτωχής ανάλυσης (μεγαλύτερη από μια ελάχιστη τιμή σ_ω) στο πεδίο συχνότητας και αντιστρόφως. Πρέπει να σημειωθεί ότι η βέλτιστη χρονοσυχνοτική ανάλυση, δηλαδή $\sigma_t \sigma_\omega = 1/2$ μπορεί να επιτευχθεί εφόσον επιλεγθεί ένα Κανονικό (Gaussian) παράθυρο

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{2\pi\sigma_t^2}} \exp\left(-\frac{t^2}{4\sigma_t^2}\right) \quad (2.27)$$

Σαφώς, καθώς είναι μια χρονοσυχνοτική απεικόνιση, ο μετασχηματισμός Gabor παρουσιάζει αξιοσημείωτους περιορισμούς. Η υποστήριξη χρόνου, που καθορίζεται από την συνάρτηση παραθύρου $g(t)$, είναι ίση για όλες τις συναρτήσεις Gabor (2.21) για όλες τις συχνότητες. Για να επιτευχθεί καλός εντοπισμός συνιστωσών υψηλών συχνοτήτων, στενά παράθυρα απαιτούνται. Ως αποτέλεσμα, οι χαμηλής συχνότητας συνιστώσες απεικονίζονται ανεπαρκώς. Κατά συνέπεια μια πιο ευέλικτη απεικόνιση για μη σταθερή “παραθυροποίηση”

είναι επιθυμητή για να ενισχυθεί η ανάλυση χρόνου για σύντομα υψηλής συχνότητας φαινόμενα και η ανάλυση συχνότητας για μεγάλης διάρκειας χαμηλόσυχνα φαινόμενα.

2.2.1.4 Κυματιδιακός μετασχηματισμός

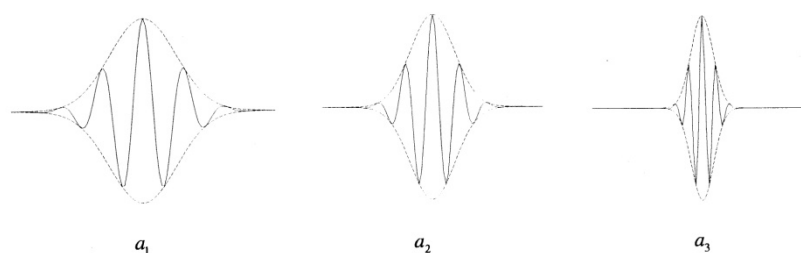
Τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα του μετασχηματισμού Gabor έχουν αντιμετωπιστεί με επιτυχία με αξιοσημείωτη αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα από την απεικόνιση βασιζόμενη στα κυματίδια.

- **Συνεχής Κυματιδιακός Μετασχηματισμός**

Η αρχή του κυματιδιακού μετασχηματισμού εισήχθη πρώτα από τον Goupillaud [Goupillaud et al. 1984] και τους Grossmann και Morlet [Grossmann and Morlet 1984] για ανάλυση σεισμικών δεδομένων. Σε αναλογία με τον μετασχηματισμό Gabor, η ιδέα συνίσταται στην αποσύζευξη μιας συνάρτησης $f(x)$ σε μια διπαραμετρική οικογένεια στοιχειωδών συναρτήσεων, η κάθε μία εκ των οποίων υπολογίζεται από ένα βασικό ή μητρικό κυματίδιο, $\psi(x)$. Η πρώτη παράμετρος a , αντιστοιχεί σε μια διαστολή ή συμπίεση του μητρικού κυματιδίου, που γενικά αναφέρεται ως κλίμακα. Η δεύτερη παράμετρος b , καθορίζει μια μετατόπιση του μητρικού κυματιδίου κατά μήκος του x -πεδίου. Σε μαθηματικούς όρους,

$$W_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} dx \quad (2.28)$$

όπου $a \in \mathbb{R}^+, b \in \mathbb{R}$. Στη βιβλιογραφία, η σχέση (2.28) γενικά αναφέρεται ως συνεχής κυματιδιακός μετασχηματισμός (Continuous Wavelet Transform – CWT). Ο συντελεστής $a^{-1/2}$ είναι ένας συντελεστής κανονικοποίησης και περιλαμβάνεται για να εξασφαλιστεί ότι το μητρικό κυματίδιο και κάθε διεσταλμένο κυματίδιο $a^{-1/2}\psi(x/a)$ έχουν την ίδια συνολική ενέργεια [Goupillaud et al. 1984]. Σαφώς, άλλες κανονικοποιήσεις-ομαλοποιήσεις μπορούν επίσης να επιλεγθούν [Carmona et al. 1998].



Σχήμα 2-11: Γραφική παράσταση κυματιδιακών συναρτήσεων που αντιστοιχούν σε τρεις (3) διαφορετικές τιμές της κλίμακας a της ίδιας μητρικής συνάρτησης συναρτήσεως της ανεξάρτητης μεταβλητής x .

Ένα παράδειγμα κυματιδιακών συναρτήσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-11, για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου κλίμακας a . Εξαιτίας της κλιμάκωσης, όλες οι συναρτήσεις κυματιδίων παρουσιάζουν τον ίδιο αριθμό κύκλων στην x -υποστήριξη του μητρικού κυματιδίου. Προφανώς, οι χωρικές και συχνοτικές ιδιότητες εντοπισμού του

κυματιδιακού μετασχηματισμού εξαρτώνται από την τιμή της παραμέτρου a . Καθώς η a προσεγγίζει το μηδέν, το διεσταλμένο κυματίδιο $a^{-1/2}\psi(x/a)$ είναι ιδιαίτερα συγκεντρωμένο στο σημείο $x=0$. Ο κυματιδιακός μετασχηματισμός $W_f(a,b)$, μετά δίνει αυξανόμενη αιχμηρότερη χωρική ανάλυση παρουσιάζοντας τα χαρακτηριστικά μικρής κλίμακας / υψηλής συχνότητας της συνάρτησης $f(x)$, σε διάφορες θέσεις b . Βέβαια, καθώς η a προσεγγίζει το $+\infty$, ο κυματιδιακός μετασχηματισμός $W_f(a,b)$, δίνει αυξανόμενα χονδρική χωρική ανάλυση, παρουσιάζοντας τα χαρακτηριστικά μεγάλης κλίμακας / χαμηλής συχνότητας της συνάρτησης $f(x)$.

Για να είναι η συνάρτηση $f(x)$ ανακατασκευαζόμενη από ένα σύνολο συντελεστών (2.28) θα πρέπει να είναι της μορφής:

$$f(x) = \frac{1}{\pi c} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_f(a,b) \psi_{a,b}(x) \frac{da}{a^2} db \quad (2.29)$$

όπου

$$\psi_{a,b}(x) = a^{-1/2} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (2.30)$$

η κυματιδιακή συνάρτηση $\psi(\bullet)$ που πρέπει να ικανοποιεί την συνθήκη αποδοχής

$$c_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (2.31)$$

όπου $\hat{\Psi}(\omega)$ συμβολίζει τον μετασχηματισμό Fourier της $\psi(x)$. Η συνθήκη αποδοχής διασφαλίζει την ισχύ του θεωρήματος του Parseval και του αντίστροφου μετασχηματισμού. Καθώς τονίζεται στην παραπομπή [Goupillaud et al. 1984], η συνθήκη (2.31) εισάγει ένα σύνολο υποσυνθηκών, έτσι ώστε:

- (i) το υπό ανάλυση κυματίδιο $\psi(\bullet)$ να είναι απόλυτα ολοκληρώσιμο και τετραγωνικά ολοκληρώσιμο, δηλαδή:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)| dx < \infty \quad (2.32)$$

και

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)|^2 dx < \infty \quad (2.33)$$

- (ii) Ο μετασχηματισμός Fourier $\hat{\Psi}(\omega)$ πρέπει να είναι ικανοποιητικά μικρός στην περιοχή της αρχής $\omega=0$, ή σε μαθηματικούς όρους

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (2.34)$$

Έτσι, η υποσυνθήκη (ii) υποδηλώνει ότι $\hat{\Psi}(0) = 0$ δηλαδή $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0$

Από την εξίσωση ανακατασκευής μπορεί να δειχθεί ότι:

$$\|f\|^2 = \frac{1}{\pi c_{\psi}} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a,b)|^2 \frac{da}{a^2} db \quad (2.35)$$

Με βάση την παραπάνω σχέση, η απόλυτη τετραγωνική τιμή του κυματιδιακού μετασχηματισμού συχνά λαμβάνεται ως η πυκνότητα ενέργειας σε ένα πεδίο χώρου – κλίμακας. Εκτεταμένη χρήση της έννοιας αυτής έχει πραγματοποιηθεί για σκοπούς εκτίμησης φάσματος.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η ανακατασκευή κυματιδίου στην σχέση μπορεί να είναι διαφορετική από το αναλυόμενο κυματίδιο που χρησιμοποιήθηκε. Δηλαδή, κάτω από μερικές συνθήκες αποδοχής στο $X(x)$ [Carmona et al. 1998], η αρχική συνάρτηση $f(x)$ μπορεί να ανακατασκευαστεί ως:

$$f(x) = \frac{1}{c_{\psi X}} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_f(a,b) X_{a,b}(x) \frac{da}{a^2} db \quad (2.36)$$

όπου

$$X_{a,b}(x) = a^{-1/2} X\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (2.37)$$

και $c_{\psi X}$ είναι μια σταθερή παράμετρος που εξαρτάται από τους μετασχηματισμούς Fourier και του $\psi(x)$ και $X(x)$. Η ιδιότητα αυτή, που αναφέρεται ως πλεονασμός σε μαθηματικούς όρους, μπορεί να είναι ανταγωνιστική σε μερικές εφαρμογές για την μείωση του λάθους εξαιτίας του θορύβου στην ανακατασκευή του σήματος [Holschneider and Tchamitchian 1991], [Cohen and Kovacevic 1996], όμως είναι έντονα ανεπιθύμητη για κωδικοποίηση σήματος ή για σκοπούς συμπίεσης [Carmona et al. 1998]. Επιπλέον, κάτω από ιδιαίτερες συνθήκες [Carmona et al. 1998], η παρακάτω απλοποιημένη σχέση ανακατασκευής ισχύει:

$$f(x) = \frac{1}{k_{\psi}} \int_0^{\infty} W_f(a,x) \frac{da}{a^{3/2}} \quad (2.38)$$

όπου k_{ψ} είναι μια σταθερή παράμετρος που δίνεται από:

$$k_{\psi} = \sqrt{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\overline{\hat{\psi}(\omega)}}{\omega} d\omega \quad (2.39)$$

Χρήση της σχέσης αυτής έχει γίνει, σε μια διακριτή μορφή, στην θεωρία προσέγγισης λειτουργικών χώρων καθώς και σε εφαρμογές αναγνώρισης κατασκευών.

- **Οικογένειες Κυματιδίων**

Ένας μεγάλος αριθμός οικογενειών κυματιδίων με διάφορες ιδιότητες είναι διαθέσιμος. Η επιλογή της βέλτιστης οικογένειας για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα δεν είναι γενικά μια εύκολη διαδικασία και υπάρχουν ιδιότητες που αποδεικνύονται πιο σημαντικές σε συγκεκριμένα πεδία της εφαρμογής. Για παράδειγμα, η συμμετρία (symmetry) μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη για να εμποδίζει την απώλεια φάσης (dephasing) στην επεξεργασία σήματος, ενώ η κανονικότητα (regularity) είναι κρίσιμη για την κατασκευή ομαλών ανακατασκευασμένων σημάτων ή ακριβείς εκτιμήσεις μη γραμμικής παλινδρόμησης. Συμπαγώς δομημένα κυματίδια, είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο της συχνότητας, μπορεί να είναι προτιμητέα για την ενίσχυση της χρονικής ή συχνοτικής ευκρίνειας (resolution). Ο αριθμός των εξαφανιζόμενων ροπών M , δηλαδή ο μέγιστος ακέραιος m για τον οποίο η σχέση:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^m \psi(x) dx = 0, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2.40)$$

ισχύει, είναι σημαντικός στην επεξεργασία σήματος για συμπίεση, για εντοπισμό βλάβης και για ενίσχυση των ιδιομορφιών (singularities) στις ιδιομορφές ταλάντωσης. Επίσης, σε μερικές περιπτώσεις τα κυματίδια μπορεί να απαιτείται να είναι προοδευτικά – εξελισσόμενα (progressive). Σε μαθηματικούς όρους, αυτό σημαίνει ότι οι μετασχηματισμοί τους Fourier ορίζονται μόνο για θετικές συχνότητες. Δηλαδή:

$$\hat{\Psi}(\omega) = 0, \quad \text{για } \omega < 0 \quad (2.41)$$

Ο προοδευτικός κυματιδιακός μετασχηματισμός ενός σήματος πραγματικών τιμών $f(x)$ και το αντίστοιχο αναλυτικό σήμα:

$$z_f(x) = f(x) + iH[f(x)] \quad (2.42)$$

συνδέονται με τη σχέση

$$W_f(a, b) = \frac{1}{2} W_{z_f}(a, b) \quad (2.43)$$

όπου $H[\bullet]$ συμβολίζει τον τελεστή του μετασχηματισμού Hilbert [Carmona et al. 1997]. Η σχέση (2.43) είναι πολύ χρήσιμη για αναγνώριση κατασκευών. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι αξιοσημείωτη μείωση του υπολογιστικού κόστους επιτυγχάνεται γενικά εάν χρησιμοποιηθούν ορθογώνια κυματίδια στο πεδίο συχνότητας ή στο x -πεδίο.

Οι οικογένειες κυματιδίων μπορούν να χωριστούν σε δυο βασικές κατηγορίες, τις πραγματικές (real) και τις μιγαδικές (complex). Βασικές πραγματικές οικογένειες κυματιδίων είναι τα Ορθοκανονικά Κυματίδια Daubechies, τα Κυματίδια Meyer, τα Κυματίδια “Μεξικάνικου Καπέλου” (Mexican Hat), τα Διορθογώνια (Biorthogonal) Κυματίδια. Πολυχρησιμοποιούμενες οικογένειες μιγαδικών κυματιδίων είναι τα Αρμονικά (Harmonic) Κυματίδια, τα Μιγαδικά Κανονικά Κυματίδια (Complex Gaussian) και τα Μιγαδικά Κυματίδια Morlet.

• **Μιγαδικά Κυματίδια Morlet**

Τα μιγαδικά κυματίδια Morlet αποτελούν οικογένειες κυματιδίων [Haase and Widjajakusuma 2003], η καθεμία εκ των οποίων αποκτάται ως η παράγωγος του κλασικού κυματιδίου Morlet $\psi_0(x) = e^{-x^2/2} e^{i\omega_0 x}$, δηλαδή

$$\psi_p(x) = \frac{d^p}{dx^p} \left(e^{-x^2/2} e^{i\omega_0 x} \right), \quad p = 1, 2, \dots, K. \quad (2.44)$$

Εκτός από το $\psi_0(x)$, το οποίο δεν ικανοποιεί την συνθήκης αποδοχής (2.31) με την αυστηρή έννοια, όλα τα υπόλοιπα μέλη της οικογένειας είναι κανονικά κυματίδια. Για πρακτικούς λόγους βέβαια, το κυματίδιο $\psi_0(x)$ γενικά θεωρείται αποδεκτό για $\omega_0 \geq 5$. Τα Μιγαδικά κυματίδια Morlet υποστηρίζουν μόνο τον Συνεχή Κυματιδιακό Μετασχηματισμό (Continuous Wavelet Transform - CWT) και δεν είναι ορθογώνια. Βέβαια, είναι όλα προοδευτικά, δηλαδή ικανοποιούν την ιδιότητα που τέθηκε στην σχέση (2.41). Επιπλέον, για το κυματίδιο Morlet $\psi_0(x)$, υπάρχει μια σχέση μεταξύ της παραμέτρου κλίμακας a και της συχνότητας ω στην οποία ο μετασχηματισμός Fourier επικεντρώνεται, δηλαδή

$$a = \frac{\omega_0}{\omega} \quad (2.45)$$

2.2.2 Εφαρμογή Μιγαδικών Κυματιδίων Morlet (Complex Morlet Wavelet – CMW)

Το Μιγαδικό Κυματίδιο Morlet ορίζεται στο Πεδίο του Χρόνου ως ένα αρμονικό κύμα με συχνότητα f_c πολλαπλασιασμένο με ένα Κανονικό Χρονικό Παραθύρο (Gaussian time domain window) που εκφράζεται μαθηματικά από μία συνάρτηση Gauss:

$$\psi(t) = c e^{-\sigma^2 t^2} e^{i 2\pi f_c t} = G(t) e^{i 2\pi f_c t} \quad (2.46)$$

όπου c είναι μια θετική παράμετρος. Η παράμετρος c τυπικά επιλέγεται ως:

$$c = \sigma / \sqrt{\pi} \quad (2.47)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω επιλογή του c , ο μετασχηματισμός Fourier του Κυματιδίου Morlet δίνεται από την σχέση:

$$\Psi(f) = \Psi^*(f) = e^{-\frac{\pi^2}{\sigma^2} (f-f_c)^2} \quad (2.48)$$

όπου $\Psi^*(f)$ είναι το μιγαδικό συζυγές της συνάρτησης $\Psi(f)$ και $\Psi(f)=\Psi^*(f)$, δεδομένου ότι η $\Psi(f)$ είναι πραγματική συνάρτηση. Το Κυματίδιο αυτό παρουσιάζει το σχήμα ενός Κανονικού (Gaussian) Παραθύρου στο Πεδίο Συχνότητας. Η κεντρική συχνότητα του παραθύρου ορίζεται από την συχνότητα f_c της αρμονικής συνιστώσας και το εύρος (bandwidth) f_B του παραθύρου καθορίζεται από την παράμετρο σ :

$$f_B = \sigma \quad (2.49)$$

Κατά συνέπεια, η παράμετρος f_c ελέγχει τη θέση του Κυματιδίου στο Πεδίο του Χρόνου και η παράμετρος $f_B = \sigma$, (η παράμετρος σχήματος κυματιδίου - “wavelet shape

factor”) ελέγχει το βασικό σχήμα του κυματιδίου, ισοσταθμίζοντας το πλάτος του παραθύρου του κυματιδίου στο Πεδίο του Χρόνου και της Συχνότητας. Αυξάνοντας την τιμή της παραμέτρου σ , ο ρυθμός απόσβεσης του κυματιδίου στο πεδίο του χρόνου και το πλάτος του αντίστοιχου Κανονικού (Gaussian) παραθύρου στο πεδίο συχνότητας αυξάνονται.

2.2.2.1 Κυματίδια Κλιμάκωσης έναντι Μετατοπιζόμενων Κυματιδίων

Παραδοσιακά η συνάρτηση κλίμακας (scaling function) εφαρμόζεται στο μητρικό κυματίδιο. Τα κυματίδια κλιμάκωσης αποκτώνται από το μητρικό κυματίδιο με μετάθεση (translation) και διαστολή (dilation):

$$\psi_{(\alpha,\tau)}(t) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \psi\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) \quad (2.50)$$

όπου α είναι η παράμετρος κλίμακας (scaling parameter) που συντελεί στην μετάθεση και τ είναι η παράμετρος χρονικού εντοπισμού που συντελεί στην διαστολή. Η παράμετρος της μετάθεσης ανήκει στο πλήθος των πραγματικών αριθμών ($\tau \in \mathbb{R}$) ενώ η παράμετρος της διαστολής α ανήκει στο πλήθος των θετικών αριθμών. Οι παράμετροι α και τ μπορούν να λαμβάνουν είτε συνεχείς είτε διακριτές τιμές.

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2.46), (2.48) και (2.50), ο μετασχηματισμός Fourier των κλιμακούμενων κυματιδίων δίνεται από την σχέση:

$$\Psi_{\alpha,\tau}(f) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} e^{-i2\pi f\tau} e^{-\frac{\pi^2}{\sigma^2}(\alpha f - f_c)^2} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} e^{-i2\pi f\tau} e^{-\frac{\pi^2}{\sigma_a^2}(f - f_{ca})^2} \quad (2.51)$$

Κατά συνέπεια κλιμακώνοντας το μητρικό κυματίδιο όχι μόνο μετατοπίζεται η θέση (location) μετατοπίζοντας την κεντρική συχνότητα από f_c σε f_{ca} αλλά ταυτόχρονα επηρεάζεται το ύψος του παραθύρου καθώς βέβαια και το εύρος του $f_{Ba} = \sigma_a$. Με αυτόν τον τρόπο το εύρος του κυματιδίου δεν μπορεί να επιλεγθεί ανεξάρτητα από την κεντρική συχνότητα.

Για τον λόγο αυτό [Nikolaou and Antoniadis 2002a] αντί για κλιμάκωση των κυματιδίων προτάθηκε η απλή μετατόπισή τους, οδηγώντας στον ορισμό μιας νέα οικογένειας κυματιδίων, των Μιγαδικών Μετατοπιζόμενων Κυματιδίων Morlet (Complex Shifted Morlet Wavelets – C.S.M.W.). Ο μετασχηματισμός Fourier των κυματιδίων αυτών δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Psi_{(f_{Ci}, f_{Bi})}(f) = \Psi_{(f_{Ci}, f_{Bi})}^*(f) = e^{-\frac{\pi^2}{f_{Bi}^2}(f - f_{Ci})^2} \quad (2.52)$$

Με τον τρόπο αυτό, τόσο η κεντρική συχνότητα f_{Ci} όσο και το εύρος f_{Bi} είναι ελεύθερα να μεταβάλλονται ταυτόχρονα, είτε με συνεχή είτε με διακριτό τρόπο. Για μια συγκεκριμένη επιλογή τιμών κεντρικής συχνότητας και εύρους, οι κυματιδιακοί συντελεστές του χρονικού σήματος $x(t)$ υπολογίζονται στο πεδίο του χρόνου χρησιμοποιώντας την σχέση που ακολουθεί:

$$W_{(f_{Ci}, f_{Bi})}(\tau) = F^{-1} \left\{ X(f) \Psi_{(f_{Ci}, f_{Bi})}^*(f) \right\} \quad (2.53)$$

όπου $X(f)$ είναι ο Μετασχηματισμός Fourier του σήματος $x(t)$. Ο συμβολισμός $F\{\}$ υποδηλώνει τον Ευθύ Μετασχηματισμό Fourier μιας συνάρτησης ενώ ο συμβολισμός $F^{-1}\{\}$ υποδηλώνει αντίστοιχα τον Αντίστροφο Μετασχηματισμό Fourier.

Εφόσον οι κυματιδιακοί συντελεστές της εξίσωσης (2.53), είναι μιγαδικοί, τα μιγαδικά πλάτη τους μπορούν να οδηγήσουν στον απευθείας ορισμό της περιβάλλουσας ενός σήματος $E(\tau)$, με τρόπο πανομοιότυπο με τον κλασικό μετασχηματισμό Hilbert:

$$E_{(f_{Ci}, f_{Bi})}(\tau) = \left\| W_{(f_{Ci}, f_{Bi})}(\tau) \right\| \quad (2.54)$$

όπου ο συμβολισμός $\|W\|$ υποδηλώνει το πλάτος της μιγαδικής μεταβλητής W .

2.2.2.2 Κριτήρια Επιλογής Παραμέτρων Κυματιδίου

Εφόσον τα Μιγαδικά Μετατοπιζόμενα Κυματίδια Morlet (CSMW) επιτρέπουν την ταυτόχρονη επιλογή της κεντρικής συχνότητας και του εύρους του κυματιδίου, η επιλογή τους μπορεί να πραγματοποιηθεί βελτιστοποιώντας το κατάλληλο κριτήριο – δείκτη, που χαρακτηρίζει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας αποδιαμόρφωσης του σήματος.

Η εμφάνιση τοπικού σφάλματος σε κάποια επιφάνεια ενός ένσφαιρου τριβέα οδηγεί στην παραγωγή κρούσεων κάθε φορά που κάποια κυλιόμενη επιφάνεια προσκρούει πάνω του. Οι κρούσεις αυτές επαναλαμβάνονται περιοδικά καθώς ο τριβέας περιστρέφεται και διεγείρονται συχνότητες συντονισμού της κατασκευής. Στόχος της διαδικασίας αποδιαμόρφωσης είναι η ανακατασκευή, από την περιβάλλουσα $E(\tau)$ της σχέσης (2.54), της αρχικής ακολουθίας κρουστικών παλμών. Το μέτρο $\|W_{(f_{Ci}, f_{Bi})}(\tau)\|$ παριστάνει την περιβάλλουσα του φιλτραρισμένου σήματος σε μια περιοχή συχνοτήτων γύρω από την κεντρική συχνότητα f_{Ci} και περιέχει σημαντικές διαγνωστικές πληροφορίες όταν η f_{Ci} βρίσκεται κοντά σε μια συχνότητα συντονισμού και κατά συνέπεια το παράθυρο καλύπτει ένα τμήμα της διεγερμένης περιοχής συχνοτήτων. Το εύρος του παραθύρου – φίλτρου μπορεί να ποικίλει. Σύμφωνα με τον McFadden [McFadden and Smith 1984b] το εύρος πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με το διπλάσιο της χαρακτηριστικής συχνότητας βλάβης ένσφαιρου τριβέα έτσι ώστε να περιλαμβάνονται τουλάχιστον ένα ζεύγος πλευρικών διαμορφώσεων.

Η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας αποδιαμόρφωσης μπορεί να εκτιμηθεί από την αποτελεσματικότητα με την οποία η περιβάλλουσα $\|W_{(f_{Ci}, f_{Bi})}(\tau)\|$ μπορεί να ανακατασκευάσει την αρχική ακολουθία των κρουστικών παλμών, σχηματίζοντας με αυτόν τον τρόπο μια κρουστικού τύπου χρονική κυματομορφή.

Πολυάριθμοι Δείκτες έχουν προταθεί με στόχο την ανίχνευση και την παρακολούθηση της εξέλιξης βλαβών ένσφαιρων τριβέων και κιβωτίων ταχυτήτων, μέσω της επεξεργασίας της χρονικής κυματομορφής. Οι βαθμωτοί αυτοί Δείκτες επιχειρούν να μετρήσουν κάποιο χαρακτηριστικό που επηρεάζεται από την εμφάνιση της βλάβης. Πολλοί από αυτούς τους

δείκτες, που πρακτικά αποτελούν μέτρο της “αιχμηρότητας” (“spikiness”) ή της “κρουστικότητα” μιας κυματομορφής, έχουν προταθεί και εφαρμοστεί ήδη με στόχο την βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων του κυματιδίου Morlet.

Δύο σημαντικοί Δείκτες που έχουν προταθεί είναι ο Δείκτης Κορυφής και η Κύρτωση. Οι δείκτες αυτοί γενικά είναι εύκολα προσαρμοζόμενοι στην ανίχνευση κρούσεων σε μια χρονική κυματομορφή και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται στη διάγνωση βλαβών ένσφαιρων τριβέων.

Αρχικά θεωρείται ένα σύνολο S_N με N αριθμό δειγμάτων $x(n)$ ενός σήματος $x(t)$ και ορίζονται οι παρακάτω ιδιότητες:

$$x_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \quad \text{Μέση Τιμή} \quad (2.55)$$

$$x_G = \left[\prod_{n=1}^N x(n) \right]^{1/N} \quad \text{Γεωμετρική Μέση Τιμή} \quad (2.56)$$

$$x_{RMS} = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Μέση Τετραγωνική Τιμή} \quad (2.57)$$

$$x_{MAX} = \sup \{x(n) / n = 1, \dots, N\} \quad \text{Μέγιστη Τιμή} \quad (2.58)$$

$$\sigma_{\text{var}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - x_m)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Διακύμανση} \quad (2.59)$$

$$S_p = \{x_p / x_p \in S_N \wedge x_p \geq Thr\} \quad (2.60)$$

Το σύνολο των δειγμάτων με τιμή που υπερβαίνει το όριο αναφοράς T_{hr}

Ο Δείκτης Κορυφής (Crest Factor) αντιστοιχεί στο λόγο της Μέγιστης Τιμής του σήματος (η μέγιστη απόλυτη τιμή της συνάρτησης που αναπαριστά το σήμα κατά την διάρκεια της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου) προς την Μέση Τετραγωνική Τιμή (RMS) του, αφαιρούμενης της Μέσης Τιμής του:

$$CF = \frac{\sup |x(n)| - x_m}{x_{RMS}} \quad (2.61)$$

Η αποτελεσματικότητα του Δείκτη Κορυφής εξαρτάται από την μορφή της κυματομορφής του σήματος. Η Μέση Τετραγωνική Τιμή του σήματος υποδεικνύει το επίπεδο ισχύος της χρονικής ακολουθίας.

Η Μέγιστη Τιμή αντιδρά στην ανάπτυξη ενός σφάλματος πιο γρήγορα από την Μέση Τετραγωνική Τιμή (RMS). Ωστόσο, καθώς η σοβαρότητα της βλάβης αυξάνεται, η Τιμή RMS αρχίζει να αυξάνεται και στα τελευταία στάδια της αστοχίας αντισταθμίζει το αποτέλεσμα της αύξησης της Μέγιστης Τιμής η οποία τυπικά φτάνει σε ένα όριο. Κατά συνέπεια ο Δείκτης Κορυφής επιστρέφει προς την αρχική του τιμή. Ο Crest Factor είναι πολύ πιο ευαίσθητος από την τιμή RMS σε αλλαγές στην αιχμηρή (spiky) φύση του σήματος κραδασμών. Βέβαια, είναι λιγότερο πιθανόν να δώσει ξαφνικά ψευδείς συναγερούς από την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται μόνο η Μέγιστη Τιμή. Επίσης διαιρώντας την Μέγιστη

Τιμή με την RMS εισάγεται μια μορφή κανονικοποίησης που λαμβάνει υπ' όψιν μεταβολές στο συνολικό επίπεδο κραδασμών.

Ο Δείκτης Κορυφής ενός τέλει αρμονικού σήματος είναι ίσος με 1.414. Η κατανομή των στιγμιαίων πλατών ενός τυχαίου σήματος είναι Κανονική (Gaussian) και σύμφωνα με το διάστημα ασφαλείας, το πλάτος αιχμών ενός τέτοιου σήματος στατιστικά βρίσκεται μεταξύ των τιμών τρεις (3) έως πέντε φορές (5) την Μέση Τετραγωνική Τιμή (RMS) [Pachaud et al. 1997]. Κατά συνέπεια ο Δείκτης Κορυφής ενός τέτοιου σήματος βρίσκεται μεταξύ των τιμών τρία (3) και πέντε (5) (έξι (6) κατά άλλους ερευνητές [Campagna-Varenne 1985]). Ο Δείκτης Κορυφών ως εργαλείο – δείκτης παραγόμενων περιοδικών κρουστικών λοιπόν μπορεί να είναι ικανός να ανιχνεύσει ελαττώματα σε ένσφαιρους τριβείς μόνο αν η τιμή του είναι μεγαλύτερη του πέντε (5).

Η Κύρτωση είναι μια στατιστική παράμετρος που επιτρέπει την ανάλυση της κατανομής των πλατών κραδασμών που περιλαμβάνονται σε μια χρονική κυματομορφή. Αντιστοιχεί στην στατιστική ροπή τέταρτης τάξης και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την διάγνωση βλαβών ένσφαιρων τριβέων. Ορίζεται ως:

$$Kurt = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n) - x_m]^4}{\sigma_{var}^4} \quad (2.62)$$

Η κύρτωση ενός σήματος, του οποίου τα στιγμιαία πλάτη ακολουθούν την Κανονική (Gaussian) κατανομή, είναι ίση με τρία (3). Στην πράξη, η Κύρτωση ως δείκτης βλαβών που παράγουν κρουστικά χτυπήματα, είναι ικανή να αναγνωρίζει τον τύπο της βλάβης μόνο αν η τιμή της είναι μεγαλύτερη του τρεισήμισι (3.5). Παράλληλα, η τιμή της Κύρτωσης που παρακολουθεί την πρόοδο της βλάβης ενός ένσφαιρου τριβέα, τελικά φθίνει όταν η βλάβη εξελιχθεί σε σημαντικό βαθμό, γεγονός που περιορίζει την αξιοπιστία της.

Ο Δείκτης Κορυφής και η Κύρτωση χρησιμοποιούνται εύκολα, όμως είναι σημαντικό να ληφθεί υπ' όψιν η κινηματική και η πολυπλοκότητα των μηχανισμών, που μπορεί να προκαλέσουν σοβαρά σφάλματα ερμηνείας. Μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για την επίδραση συγκεκριμένων παραμέτρων στην τιμή του Δείκτη Κορυφής και της Κύρτωσης. Στην πραγματικότητα, οι δύο αυτοί δείκτες είναι περισσότερο ή λιγότερο ευαίσθητοι σε παραμέτρους όπως οι μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής των αξόνων, το ζωνοπερατό (band-pass) φιλτράρισμα, η συχνότητα συντονισμού του αισθητήρα ή ο θόρυβος του περιβάλλοντος. Καθώς υπολογίζονται σε μια ευρεία ζώνη συχνοτήτων (βαθμωτοί δείκτες ευρείας ζώνης), παρουσιάζουν μια αξιοπιστία που μπορεί να περιοριστεί από αίτια όπως η κάλυψη των κρουστικών παλμών από την διέγερση πολυάρθρων ιδιοσυχνοτήτων, από την λειτουργία άλλων εξαρτημάτων της ίδιας μηχανής, από την μη εξασθένιση των ιδιοσυχνοτήτων μεταξύ δύο διαδοχικών διεγέρσεων ή από τον θόρυβο του περιβάλλοντος που παράγεται από τυχαίες κρουστικές διεγέρσεις (φθορά των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή, κακή λίπανση, σπηλαίωση κλπ.).

Ο Δείκτης Σχήματος (Shape Factor – S.F.) και ο Κρουστικός Δείκτης (Impulse Factor – I.F.) έχουν επίσης προταθεί για τον χαρακτηρισμό βλαβών ένσφαιρων τριβέων. Ο Δείκτης Σχήματος ορίζεται ως:

$$S.F. = \frac{x_{RMS}}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n)|} \quad (2.63)$$

Αντίστοιχα ο Κρουστικός Δείκτης ορίζεται ως:

$$I.F. = \frac{\sup |x(t)|}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n)|} \quad (2.64)$$

Ο Lin πρότεινε ως κριτήριο την χρήση της Κυματιδιακής Εντροπίας (Wavelet Entropy). Η “αραιότητα” χρησιμοποιείται συχνά ως κανόνας για τον υπολογισμό της βάσης των κυματιδίων. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το κυματίδιο που αντιστοιχεί στους λιγότερους συντελεστές κυματιδιακού μετασχηματισμού ενός σήματος είναι το βέλτιστο. Κατά συνέπεια, οι βέλτιστες παράμετροι του μιγαδικού κυματιδίου Morlet μπορεί να καθοριστούν με κριτήριο την “αραιότητα” των κυματιδιακών συντελεστών. Η ποικιλία (“diversity”) μιας σειράς πιθανότητας μπορεί να μετρηθεί με την χρήση της Εντροπίας Shannon. Κατά συνέπεια, η “αραιότητα” των κυματιδιακών συντελεστών μπορεί να μετρηθεί με τον υπολογισμό της Εντροπίας τους που στην περίπτωση αυτή αποκαλείται Κυματιδιακή Εντροπία. Αν $\{c_i\}, i=1, \dots, M$ είναι το σύνολο των συντελεστών και κανονικοποιηθούν με βάση το $\sum_{i=1}^M c_i$, τότε το σύνολο $\{d_i\}, i=1, \dots, M$ ορίζεται ως:

$$d_j = \frac{c_j}{\sum_{i=1}^M c_i} \quad (2.65)$$

Η Κυματιδιακή Εντροπία ορίζεται ως:

$$En = -\sum_{i=1}^M d_i \log d_i \quad (2.66)$$

Γενίκευση της Εντροπίας Shannon αποτελεί η Εντροπία Rényi [Tao et al. 2007]. Αντί για τον αριθμητικό μέσο χρησιμοποιείται ο μέσος Kolmogorov – Nagumo συνοδευόμενος από την συνάρτηση $f(x) = c_1 b^{(1-a)x} + c_2$, όπου οι c_1 και c_2 είναι σταθερές, b είναι ένας πραγματικός αριθμός μεγαλύτερος της μονάδας και a είναι μια μη μηδενική παράμετρος. Αξίζει να σημειωθεί για $a \rightarrow 1$ η Εντροπία Rényi συγκλίνει στην Εντροπία Shannon.

Ορίζεται αντίστοιχα ως:

$$H_a^R(p) = \frac{1}{1-a} \log \frac{\sum_{i=1}^M d_i^a}{\sum_{i=1}^M d_i}, a > 0, a \neq 1 \quad (2.67)$$

Έτερος δείκτης που έχει προταθεί [Bozchalooi and Liang 2007] για την επιλογή των παραμέτρων του κυματιδίου Morlet είναι ο Δείκτης Εξομάλυνσης (Smoothness Index). Χρησιμοποιώντας τον ορισμό της Γεωμετρικής Μέσης Τιμής και της Αριθμητικής Μέσης Τιμής για μια θετική χρονοσειρά $x(n)$, ο Δείκτης Εξομάλυνσης ορίζεται ως:

$$SI = \frac{x_G}{x_m} \quad (2.68)$$

καθώς ισχύει $\bar{x}_A \geq \bar{x}_G$ (η ισότητα ισχύει μόνο όταν $x(n)=x(m)$ για όλα τα m και n), ο Δείκτης εξομάλυνσης λαμβάνει τιμές μεταξύ του μηδέν (0) και της μονάδας (1) για μια θετική χρονοσειρά. Αν η γεωμετρική μέση τιμή εκφραστεί ως:

$$x_G = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \ln(x(n))\right) \quad (2.69)$$

τότε για μια συνεχή χρονική συνάρτηση ο Δείκτης Εξομάλυνσης ορίζεται ως:

$$SI = \frac{\exp\left(\frac{1}{T} \int_0^T \ln(f(t)) dt\right)}{\frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt} \quad (2.70)$$

όπου η συνάρτηση $f(t)$ ορίζεται στο διάστημα $[0, T]$.

Μια σημαντική ιδιότητα του Δείκτη Εξομάλυνσης είναι ότι προσεγγίζει την μονάδα για επίπεδες συναρτήσεις και το μηδέν για αιχμηρές συναρτήσεις. Στις ακραίες περιπτώσεις, ο Δείκτης ισούται με τη μονάδα αν ισχύει $f(t)=\text{σταθερά}$ και με το μηδέν αν η $f(t)$ παρουσιάζει εξαιρετικά κρουστική φύση. Ο Δείκτης αυτός χρησιμοποιήθηκε αρχικά ως μέτρο της φασματικής επιπεδότητας (spectral flatness) στην επεξεργασία σημάτων ομιλίας [Kay 1979]. Ένα άλλο κριτήριο που πρότεινε είναι το πλήθος n_{th} των στοιχείων του συνόλου S_p που υπερβαίνουν ένα όριο αναφοράς T_{hr} . Το κριτήριο αυτό μαθηματικά ορίζεται ως:

$$N_p = \text{card}(S_p) = n(S_p) \quad (2.71)$$

Η τιμή του ορίου αναφοράς T_{hr} τυπικά ορίζεται ως εξής:

$$Thr = x_m + \varepsilon \sigma_{var} \quad (2.72)$$

με $\varepsilon=2$.

Ο Nikolaou [Nikolaou and Antoniadis 2002a] πρότεινε τον συνδυασμό δύο κριτηρίων για την βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων του μιγαδικού κυματιδίου. Για την επιλογή του εύρους του παραθύρου χρησιμοποιείται ο συντελεστής μεγέθυνσης c_r όλων των στοιχείων του πίνακα C_w και υπολογίζεται από την σχέση:

$$c_r = \frac{MxN \max(C_w(i, j))}{\sqrt{\sum_{i, j} C_w(i, j)^2}} \quad (2.73)$$

όπου MxN είναι το πλήθος των στοιχείων του πίνακα C_w .

Για την επιλογή της κεντρικής συχνότητας χρησιμοποιείται ένα κριτήριο ορίου, σύμφωνα με το οποίο υπολογίζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του συνόλου όλων των στοιχείων του πίνακα. Για κάθε σειρά i του πίνακα C_w , το πλήθος $n_{th}(i)$ των στοιχείων που είναι μεγαλύτερα από ένα όριο υπολογίζεται ως εξής:

$$n_{th} = \{x_p / x_p \in S_N \wedge x_p \geq Thr\} \quad (2.74)$$

$$Thr = x_m + \varepsilon \sigma_{var} \quad (2.75)$$

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνεται η χρήση ενός νέου Δείκτη για την βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων των μιγαδικών κυματιδίων Morlet. Ο Δείκτης Ενέργειας Αιχμών ορίζεται ως εξής:

$$P_E = \left[\frac{1}{N_P} \sum_{n=1}^{N_P} x_p^2(n) \right]^{1/2}, \quad x_p \in S_P \quad (2.76)$$

και

$$S_P = \{x_p / x_p \in S_N \wedge x_p \geq Thr\} \quad (2.77)$$

Ο δείκτης αυτός, πρακτικά μετράει την ενέργεια μόνο των αιχμών εκείνων που το πλάτος τους υπερβαίνει ένα όριο αναφοράς. Πρακτικά λοιπόν συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των “Ενεργειακών” Δεικτών (π.χ. x_{RMS}) με τα πλεονεκτήματα των Δεικτών “Σχήματος” (π.χ. CF, Kurt, S.I.) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση κρουστικών σημάτων.

2.2.2.3 Αξιολόγηση Επίδοσης Δεικτών Επιλογής Βέλτιστων Παραμέτρων

Αρχικά η σχέση (2.53) εφαρμόζεται σε ένα διακριτό σήμα $x(k)$, $j=1, \dots, K$, όπου K είναι το πλήθος των δειγμάτων του σήματος, όπου τα f_c και f_B δίνονται από τις σχέσεις:

$$f_{Ci} = f_{Cmin} + (i-1)f_h, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.78)$$

$$f_{Bj} = f_{Bmin} + (j-1)f_b, \quad j = 1, \dots, M \quad (2.79)$$

όπου N είναι ο αριθμός των διαθέσιμων κεντρικών συχνοτήτων f_c , M ο αριθμός των διαθέσεων ευρών f_B , f_h το βήμα αναζήτησης κεντρικής συχνότητας και f_b το βήμα αναζήτησης εύρους και σχηματίζονται M πίνακες με μιγαδικά στοιχεία:

$$W(i, j)(\tau) = F^{-1} \{X(f)\Psi_i^*(f)\} \quad (2.80)$$

Οι παράμετροι f_c , f_B , f_h και f_b επιλέγονται κατάλληλα έτσι ώστε οι κεντρικές συχνότητες του πρώτου και του τελευταίου κυματιδίου να συμφωνούν αντίστοιχα με τις τιμές $0.2x_{f_{Nyq}}$ και $0.9x_{f_{Nyq}}$, όπου f_{Nyq} είναι η συχνότητα Nyquist. Η περιοχή συχνοτήτων $[0.2x_{f_{Nyq}}, 0.9x_{f_{Nyq}}]$ σαρώνεται σε διαστήματα που καθορίζονται από την επιλογή του N . Το χαμηλότερο όριο της περιοχής αυτής πρέπει να επιλέγεται αρκούντως υψηλό ώστε να αποκόπτει τις χαμηλές συχνότητες που μπορεί να εμφανίζονται στο φάσμα του σήματος λόγω κακής ευθυγράμμισης ή αζυγοσταθμίας. Παράλληλα, το άνω όριο της περιοχής αυτής, δηλαδή η κεντρική συχνότητα του τελευταίου παραθύρου πρέπει να είναι ελαφρώς χαμηλότερη από τη συχνότητα Nyquist έτσι ώστε σε οποιαδήποτε περίπτωση να αποκόπτεται το πολύ μόνο ένα μικρό μέρος του τελευταίου παραθύρου.

Αντίστοιχα επιλέγεται ένας αριθμός διαθέσιμου εύρους παραθύρου. Το εύρος του παραθύρου – φίλτρου μπορεί να ποικίλει. Το φάσμα ενός σήματος που προκαλείται από μια περιοδική κρουστική ακολουθία αποτελείται από μια ακολουθία αρμονικών συνιστωσών που απέχουν φασματικές αποστάσεις ίσες με την χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης, με μέγιστο πλάτος γύρω από την περιοχή ιδιοσυχνοτήτων. Οι φασματικές αυτές περιοχές εάν υπάρχει διαμόρφωση πλάτους λόγω της ζώνης φόρτισης, περιστοιχίζονται από πλευρικές συχνότητες που απέχουν φασματικές αποστάσεις ίσες με τη συχνότητα περιστροφής. Σύμφωνα με τον McFadden [McFadden and Smith 1984b] το εύρος πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με το διπλάσιο της χαρακτηριστικής συχνότητας βλάβης ένσφαιρου τριβέα έτσι ώστε να περιλαμβάνονται τουλάχιστον ένα ζεύγος πλευρικών διαμορφώσεων. Η μεταβολή της τιμής της παραμέτρου f_B έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή του εύρους του παραθύρου Gauss και συνεπώς την μεταβολή του πλήθους των αρμονικών της χαρακτηριστικής συχνότητας που θα περιέχονται στο φάσμα της περιβάλλουσας που αντιστοιχεί σε κάθε ζώνη συχνοτήτων. Η εμπειρία δείχνει ότι όσο καλύτερα εντοπιστεί η ζώνη διέγερσης με την βέλτιστη επιλογή του εύρους του παραθύρου και της κεντρικής συχνότητας, τόσο καλύτερο είναι το αποτέλεσμα της αποδιαμόρφωσης.

Σύμφωνα με τον παραπάνω αλγόριθμο, παράγονται M πίνακες διαστάσεων $K \times N$ με μιγαδικά στοιχεία όπου κάθε γραμμή i αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη κεντρική συχνότητα f_i ενώ κάθε στήλη j αντιστοιχεί σε μια διαφορετική χρονική στιγμή. Κάθε πίνακας M αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο εύρος παραθύρου. Ακολούθως σχηματίζονται M πίνακες C_w , με τα μέτρα των στοιχείων του πίνακα W :

$$C_w(i, j) = |W(i, j)| \quad (2.81)$$

Τα στοιχεία του πίνακα C_w αντιστοιχούν στις τιμές της περιβάλλουσας του σήματος σε κάθε χρονική στιγμή j και κάθε ζώνη συχνοτήτων i . Οι μεγάλες τιμές των στοιχείων του πίνακα C_w προέρχονται κυρίως από τα κρουστικά στοιχεία του σήματος.

Στη συνέχεια εξετάζεται η απόδοση των κριτηρίων που περιγράφηκαν παραπάνω με την εφαρμογή τους σε πραγματικά σήματα κραδασμών από βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Για την επιλογή της βέλτιστης κεντρικής συχνότητας f_c και του βέλτιστου εύρους f_B χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα κριτήρια:

- (i) Μεγιστοποίηση του Δείκτη Κορυφής (Crest Factor).
- (ii) Ελαχιστοποίηση της Shannon Κυματιδιακής Εντροπίας (Shannon Wavelet Entropy).
- (iii) Ελαχιστοποίηση της Rényi Κυματιδιακής Εντροπίας (Rényi Wavelet Entropy).
- (iv) Μεγιστοποίηση της Κύρτωσης (Kurtosis).
- (v) Μεγιστοποίηση του Δείκτη Σχήματος (Shape Factor).
- (vi) Μεγιστοποίηση του Κρουστικού Δείκτη (Impulse Factor).
- (vii) Μεγιστοποίηση του αριθμού των στοιχείων του C_w που βρίσκονται πάνω από ένα όριο T_{hr} .
- (viii) Επιλογή του εύρους του παραθύρου με μεγιστοποίηση του Συντελεστή Μεγέθυνσης και επιλογή της κεντρικής συχνότητας με μεγιστοποίηση του αριθμού των στοιχείων του C_w που βρίσκονται πάνω από ένα όριο T_{hr} .
- (ix) Ελαχιστοποίηση του Δείκτη Εξομάλυνσης.
- (x) Μεγιστοποίηση του Δείκτη Ενέργειας Αιχμών.

Στην πρώτη εξεταζόμενη περίπτωση το σήμα προέρχεται από μετρήσεις σε έδρανο βιομηχανικού ανεμιστήρα τροφοδοσίας αέρα λέβητα που παρουσιάζει σφάλμα στον εξωτερικό δακτύλιο. Ο κινητήρας έχει υποδύναμη 180 KW. Η πτερωτή αποτελείται από 12 πτερύγια. Ο άξονας του κινητήρα συνδέεται με μεταλλικό σύνδεσμο με τον άξονα της πτερωτής. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα κατά την διάρκεια των μετρήσεων είναι ίση κατά προσέγγιση με 1,200 ΣΑΛ (rpm), δηλαδή ίση με 20 Hz. Το υπό παρακολούθηση έδρανο είναι τύπου 2312 της εταιρίας SKF και παρουσιάζει χαρακτηριστική Συχνότητα Διέλευσης Σφαιρών στον Εξωτερικό δακτύλιο BPFO ίση με 4.72 επί την συχνότητα περιστροφής του άξονα, οδηγώντας σε μια θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης συχνότητας BPFO κατά προσέγγιση ίση με 94 Hz. Κάθε σήμα έχει μήκος 4,096 δείγματα και καταγράφηκε με συχνότητα δειματοληψίας ίση με 8.33 KHz.

Εξετάζονται δύο (2) σήματα μετρήσεων. Τα δύο σήματα παρουσιάζονται αντίστοιχα στα Σχήματα 2-12 (α) και (β). Η δεύτερη μέτρηση πραγματοποιήθηκε στην ίδια θέση μέτρησης και κατά την ίδια κατεύθυνση με την πρώτη τέσσερις μήνες αργότερα. Μια ακολουθία κρουστικών αιχμών είναι εμφανής στις χρονικές κυματομορφές. Τα φάσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στα Σχήματα 2-13 (α) και (β) αντίστοιχα. Μια κοινή στα δύο σήματα διεγερμένη ζώνη συχνοτήτων είναι εμφανής μεταξύ 1000 και 2500 Hz.

Στη συνέχεια τα σήματα μετασχηματίζονται κυματιδιακά χρησιμοποιώντας Μιγαδικά Μετατοπισμένα Κυματίδια Morlet. Οι βέλτιστες τιμές της κεντρικής συχνότητας f_C και του εύρους του παραθύρου f_B επιλέγονται με βάση τα δέκα (10) κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η τιμή της κεντρικής συχνότητας αναζητείται στο διάστημα τιμών $[0.2xf_{Nyq} \leq f_C < 0.9xf_{Nyq}]$ (όπου η f_{Nyq} ισούται με το $\frac{1}{2}$ της συχνότητας δειματοληψίας) που αντιστοιχεί σε εύρος συχνοτήτων $[833 \text{ Hz}, 3748.5 \text{ Hz}]$. Το εύρος του κυματιδιακού παραθύρου επιλέγεται αρχικά στο διάστημα συχνοτήτων $2xf_{BPFO} \leq f_B \leq 10xf_{BPFO}$, έτσι ώστε να επιτρέπεται από το παράθυρο να καλύπτονται αρκετές πλευρικές αιχμές συχνοτικών αποστάσεων ίσων με την συχνότητα της βλάβης που μπορεί να εμφανίζονται γύρω από μια διεγερμένη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής. Οι περιβάλλουσες των σημάτων για κάθε ένα από τα δέκα κριτήρια και τα αντίστοιχα φάσματα παρουσιάζονται για την πρώτη μέτρηση στα Σχήματα 2-14 και 2-15 ενώ για την δεύτερη μέτρηση στα Σχήματα 2-16 και 2-17. Οι βέλτιστες τιμές της Κεντρικής Συχνότητας f_C και του Εύρους του παραθύρου f_B που επιλέχθηκαν με βάση τα δέκα (10) προαναφερθέντα κριτήρια παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-1.

Εξετάζοντας την περιβάλλουσα του Σχήματος 2-14 (α) και του Σχήματος 2-16 (α) διαπιστώνεται και επιβεβαιώνεται από τα αντίστοιχα φάσματα των Σχημάτων 2-15 (α) και 2-17 (α), ότι ο Δείκτης Κορυφής αποτυγχάνει να επιλέξει ορθά και αποτελεσματικά το κατάλληλο ζεύγος της Κεντρικής Συχνότητας και του Εύρους. Στην περίπτωση της πρώτης μέτρησης διαπιστώνεται με βάση και τα αποτελέσματα του Πίνακα 2-1 ότι αν και το εύρος αυξάνεται, η βέλτιστη Κεντρική Συχνότητα που επιλέγεται οδηγεί στην επιλογή μιας ζώνης συχνοτήτων προς αποδιαμόρφωση η οποία δεν έχει καμία φυσική ερμηνεία. Αντίθετα στην περίπτωση της δεύτερης μέτρησης, το κριτήριο φαίνεται να επιλέγει σωστά την Κεντρική Συχνότητα του κυματιδίου. Όμως η ταυτόχρονη επιλογή της στενότερης διαθέσιμης ζώνης συχνοτήτων προς αποδιαμόρφωση (που ισούται με $2xf_{BPFO}$) οδηγεί και πάλι σε

αναποτελεσματική αποδιαμόρφωση και σε συμπεράσματα που δεν υποδεικνύουν την ύπαρξη και το είδος της βλάβης.

Στη συνέχεια εξετάζεται το κριτήριο της Εντροπίας Shannon. Παρατηρώντας τις περιβάλλουσες των Σχημάτων 2-14 (β) και 2-16 (β) γίνεται αντιληπτό ότι το κριτήριο της Εντροπίας Shannon αδυνατεί να επιλέξει ορθά την ζώνης προς αποδιαμόρφωση. Για την πρώτη μέτρηση, το φάσμα του Σχήματος 2-15 (β) σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα του Πίνακα 2-1 υποδεικνύει ότι το κριτήριο επιλέγει την στενότερη διαθέσιμα ζώνη συχνοτήτων και μια κεντρική συχνότητα η οποία δεν σχετίζεται σε καμία περίπτωση με την διεγερμένη περιοχή του εξεταζόμενου σήματος. Συνεπώς η αποδιαμόρφωση του σήματος είναι ανεπιτυχής. Στη δεύτερη μέτρηση, όμοια με τον Δείκτη Κορυφής, το κριτήριο της Εντροπίας Shannon επιλέγει σωστά την Κεντρική Συχνότητα αλλά ταυτόχρονα επιλέγει το στενότερο διαθέσιμο εύρος παραθύρου με αποτέλεσμα να οδηγούν σε μια αναποτελεσματική αποδιαμόρφωση όπως διαπιστώνεται και από τα Σχήματα 2-16 (β) και 2-17 (β).

	<u>Measurement 1</u>		<u>Measurement 2</u>	
	f_c (Hz)	f_B (Hz)	f_c (Hz)	f_B (Hz)
Crest factor	3583,0	264,3	1494,8	188,8
Shannon Entropy	3742,8	188,8	1489,1	188,8
Rényi Entropy	2481,9	188,8	1494,8	198,2
Kurtosis	1660,3	188,8	1494,8	188,8
Shape Factor	2481,9	188,8	1489,1	188,8
Impulse Factor	3583,0	273,8	1494,8	198,2
n_{th}	1346,5	207,7	1232,4	188,8
Amplification Factor	1352,2	188,8	872,9	830,7
Smoothness Index	3742,8	188,8	1232,4	188,8
Peak Energy	1871,4	944,0	1403,5	925,1

Πίνακας 2-1: Τιμές Βέλτιστων ζευγών Κεντρικής Συχνότητας f_c και εύρους f_B που επιλέχθηκαν με βάση τα δέκα (10) κριτήρια για την Περίπτωση Ι (Υπαρξη φθοράς εξωτερικού δακτυλίου).

Το κριτήριο της Εντροπίας Rényi παρουσιάζει παρόμοια αποτελέσματα με την Εντροπία Shannon. Στις δύο μετρήσεις επιλέγεται στενή ζώνη αποδιαμόρφωσης που πρακτικά καθιστά αναποτελεσματική την αποδιαμόρφωση. Στην πρώτη μέτρηση, το κριτήριο φαίνεται να επιλέγει μια μικρή διεγερμένη περιοχή η οποία όμως δεν είναι ικανή να προσφέρει τις απαραίτητες πληροφορίες. Στη δεύτερη μέτρηση, σε πλήρη αναλογία με τους προηγούμενους δύο Δείκτες, η Κεντρική Συχνότητα επιλέγεται σωστά, αλλά το μικρό εύρος δεν επιτρέπει στο παράθυρο να συμπεριλάβει περισσότερες αρμονικές της βλάβης γύρω από την διεγερμένη ιδιοσυχνότητα, γεγονός που θα ενίσχυε την αποτελεσματικότητα της αποδιαμόρφωσης.

Η Κύρτωση και στις δύο μετρήσεις οδηγεί στην επιλογή της στενότερης δυνατής ζώνης συχνοτήτων. Η Κύρτωση θεωρείται ευαίσθητη σε δομές σημάτων με αιχμηρές μεταβολές

όπως οι κρουστικοί παλμοί που προκαλούνται από την εμφάνιση μιας τοπικής ανωμαλίας σε έναν από τους δακτυλίους των ένσφαιρων τριβέων. Όμως η Κύρτωση φαίνεται να είναι ευαίσθητη και στην παρουσία ακραίων τιμών σε ένα χρονικό σήμα. Κατά συνέπεια πρέπει να τονιστεί ότι η μέγιστη τιμή της Κύρτωσης δεν αντιστοιχεί απαραίτητα σε υψηλή “κρουστικότητα” - “αιχμηρότητα” του ελεγχόμενου σήματος καθώς η υψηλή αυτή τιμή μπορεί να αντιστοιχεί είτε σε έντονη “κρουστικότητα” είτε στην ύπαρξη ασυνήθιστων ακραίων τιμών στο σήμα. Με βάση τον Πίνακα 2-1, και στις δύο μετρήσεις η Κεντρική Συχνότητα επιλέγεται ορθά σε αντίθεση με το Εύρος που παραμένει στο κατώτερο διαθέσιμο όριο.

Ο Δείκτης Σχήματος και ο Κρουστικός Δείκτης παρουσιάζουν ανάλογα αποτελέσματα. Στην πρώτη μέτρηση και οι δύο Δείκτες επιλέγουν κεντρικές συχνότητες χωρίς φυσική έννοια που αντιστοιχούν σε άσχετες με την διεγερμένη περιοχή ζώνες. Αντίθετα στον δεύτερο σήμα επιλέγουν ορθά την ζώνη διέγερσης. Η επιλογή όμως και από αυτούς τους δείκτες της μικρότερης διαθέσιμης ζώνης αποδιαμόρφωσης οδηγεί σε ανούσια και άχρηστα από διαγνωστικής πλευράς αποτελέσματα.

Ο Μέγιστος αριθμός των στοιχείων του πίνακα κυματιδιακών συντελεστών που είναι μεγαλύτεροι από ένα κατώτερο όριο επιλέγει ως Κεντρική Συχνότητα αιχμές που βρίσκονται στην αρχή της ζώνης διέγερσης. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το μικρό Εύρος οδηγούν σε αναποτελεσματική αποδιαμόρφωση όπως φαίνεται στις αντίστοιχες περιβάλλουσες και στα αντίστοιχα φάσματα των μετρήσεων.

Το κριτήριο που συνδυάζει την μεγιστοποίηση του Συντελεστή Μεγέθυνσης και του Πλήθους των στοιχείων του πίνακα κυματιδιακών συντελεστών που είναι μεγαλύτεροι από ένα κατώτερο όριο παρουσιάζει μια ενδιαφέρουσα συμπεριφορά. Στην πρώτη μέτρηση πρακτικά αντιλαμβάνεται την διεγερμένη ζώνη συχνοτήτων του εξεταζόμενου σήματος ως περισσότερες από μία. Κατά συνέπεια επιλέγει Κεντρική Συχνότητα παραθύρου πλησίον της κεντρικής αιχμής του φάσματος. Η επιλογή όμως της στενής ζώνης δεν επιτρέπει την εξαγωγή χρησιμων πληροφοριών για την ανίχνευση της βλάβης. Αντίθετα στην δεύτερη μέτρηση, το κριτήριο επιλέγει μια άνευ φυσικής σημασίας Κεντρική Συχνότητα. Η επιλογή όμως μιας ευρείας ζώνης οδηγεί στην εξαγωγή μιας ημιτονοειδούς περιβάλλουσας (Σχήμα 2-16 (η)) που αντιστοιχεί σύμφωνα και με το αντίστοιχο φάσμα του Σχήματος 2-17 (η) στην ταχύτητα περιστροφής του άξονα.

Ο Δείκτης Εξομάλυνσης στην περίπτωση της πρώτης μέτρησης οδηγείται στην επιλογή της στενότερης δυνατής ζώνης και σε μια Κεντρική Συχνότητα μακριά από την διεγερμένη περιοχή του σήματος. Στο δεύτερο σήμα ο Δείκτης επιλέγει την μικρότερη Κεντρική Συχνότητα. Η επιλογή όμως μια μεγάλης ζώνης συχνοτήτων επιτυγχάνει μια ορθή αποδιαμόρφωση του σήματος. Συνεπώς, μιας ενδιαφέρουσα περιβάλλουσα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-16 (θ). Στο αντίστοιχο φάσμα του Σχήματος 2-17 (θ), οι πρώτες δύο (2) αρμονικές της χαρακτηριστικής συχνότητας f_{BPFO} είναι εμφανείς.

Ο προτεινόμενος στην παρούσα διδακτορική διατριβή Δείκτης Ενέργειας Αιχμών και στις δύο μετρήσεις επιτυγχάνει να οδηγήσει στη επιλογή της κατάλληλης Κεντρικής Συχνότητας και ενός αρκετά πλατιού παραθύρου όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα του Πίνακα 2-1 και τις περιβάλλουσες των Σχημάτων 2-14 (ι) και 2-16 (ι) και επιβεβαιώνεται

από τα αντίστοιχα φάσματα. Στα φάσματα των περιβαλλουσών που παρουσιάζονται στα Σχήματα 2-15 (i) και 2-17 (i), οι πρώτες τρεις αρμονικές της χαρακτηριστικής συχνότητας διέλευσης στον εξωτερικό δακτύλιο BFO είναι εμφανείς, γεγονός που υποδηλώνει τη ορθή αποδιαμόρφωση του σήματος και την εξαγωγή των απαραίτητων χρήσιμων πληροφοριών για την ανίχνευση της ύπαρξης αλλά και του τύπου της βλάβης.

Στην δεύτερη εξεταζόμενη περίπτωση η μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε ένσφαιρο τριβέα αντλίας, που παρουσιάζει φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα κατά την διάρκεια των μετρήσεων ήταν περίπου ίση με 1,320 Σ.Α.Λ. (rpm), δηλαδή 22 Hz. Ο υπό παρακολούθηση ένσφαιρος τριβέας είναι τύπου 22205 EK και η Συχνότητα Διέλευσης Σφαιρών στον Εσωτερικό Δακτύλιο f_{BPF1} είναι ίση με 8.32 επί την συχνότητα περιστροφής του άξονα, οδηγώντας σε μια θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης χαρακτηριστικής συχνότητας f_{BPF1} περίπου ίση με 183 Hz. Τα σήματα έχουν μήκος 4,096 δείγματα και η συχνότητα δειγματοληψίας είναι ίση με 8.33 KHz. Πραγματοποιείται επεξεργασία δύο σημάτων. Οι χρονικές κυματομορφές των σημάτων και τα αντίστοιχα φάσματα τους παρουσιάζονται στα Σχήματα 2-20 και 2-21 αντίστοιχα. Η δεύτερη μέτρηση καταγράφηκε στη ίδια θέση και προς την ίδια κατεύθυνση περίπου 80 μέρες μετά την πρώτη μέτρηση. Μια ακολουθία κρουστικών παλμών είναι εμφανής στις χρονικές κυματομορφές. Εξετάζοντας το φάσμα του Σχήματος 2-21 (α) παρατηρείται η ύπαρξη μιας διεγερμένης ζώνης μεταξύ 1000 και 2500 Hz. Στην μέτρηση δύο η διεγερμένη περιοχή μετατοπίζεται υψηλότερα στο φάσμα συχνοτήτων και πλέον εμφανίζεται μεταξύ 2500 και 4000 Hz.

Τα σήματα στη συνέχεια μετασχηματίζονται κυματιδικά με την χρήση Μιγαδικών Μετατοπισμένων Κυματιδίων Morlet. Η κεντρική συχνότητα f_C των κυματιδίων αναζητείται στο διάστημα συχνοτήτων $0.2xf_{Nyq} \leq f_C \leq 0.9xf_{Nyq}$ (όπου η f_{Nyq} ισούται με το $\frac{1}{2}$ της συχνότητας δειγματοληψίας) που αντιστοιχεί στο διάστημα [833 Hz, 3748.5 Hz]. Το εύρος του κυματιδίου f_B επιλέγεται στο διάστημα $2xf_{BPF1} \leq f_B \leq 10xf_{BPF1}$ που ισούται ανάλογα με το διάστημα [388 Hz, 1940 Hz]. Οι βέλτιστες τιμές της Κεντρικής Συχνότητας f_C και του εύρους του παραθύρου f_B επιλέγονται στη συνέχεια με βάση τα δέκα (10) προαναφερθέντα κριτήρια. Οι περιβάλλουσες των σημάτων για τα δέκα (10) αυτά κριτήρια και τα αντίστοιχά τους φάσματα παρουσιάζονται διαδοχικά στα Σχήματα 2-22 και 2-23 για την πρώτη μέτρηση και στα Σχήματα 2-24 και 2-25 για την δεύτερη μέτρηση.

Οι βέλτιστες τιμές της Κεντρικής Συχνότητας f_C και του εύρους του παραθύρου f_B για κάθε ένα από τα δέκα (10) κριτήρια παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-2.

Αρχικά εξετάζεται το κριτήριο του Δείκτη Κορυφής (Crest Factor). Το κριτήριο αυτό, στην πρώτη μέτρηση επιλέγει μια Κεντρική Συχνότητα μέσα στην διεγερμένη περιοχή των 1500 Hz έως 2500 Hz. Όμως όπως παρατηρείται στο Σχήμα 2-22 (α), η επιλογή μιας στενής ζώνης (Πίνακας 2-2) εμποδίζει την επιτυχή εκτέλεση της διαδικασίας αποδιαμόρφωσης του σήματος. Εξετάζοντας το Σχήμα 2-23 (α) διαπιστώνεται ότι το φάσμα της περιβάλλουσας του σήματος περιλαμβάνει μόνο αρμονικές της ταχύτητας περιστροφής και όχι αρμονικές της συχνότητας της βλάβης f_{BPF1} . Στην δεύτερη μέτρηση, ως Κεντρική Συχνότητα επιλέγεται μια τιμή που δεν σχετίζεται με την έντονα διεγερμένη περιοχή. Το αντίστοιχο φάσμα αν και

περιλαμβάνει την πρώτη αρμονική της f_{BPF1} περιέχει έντονο χαμηλόσυχο θόρυβο. Ως αποτέλεσμα η αποδιαμόρφωση δεν κρίνεται ιδιαίτερω ικανοποιητική.

	<u>Measurement 1</u>		<u>Measurement 2</u>	
	f_c (Hz)	f_B (Hz)	f_c (Hz)	f_B (Hz)
Crest factor	2179,5	388,0	1226,7	388,0
Shannon Entropy	2926,9	543,2	1232,4	388,0
Rényi Entropy	2173,8	388,0	1226,7	388,0
Kurtosis	850,1	620,8	1226,7	388,0
Shape Factor	3685,7	388,0	1226,7	388,0
Impulse Factor	2179,5	388,0	1226,7	388,0
n_{th}	1694,5	388,0	3389,1	388,0
Amplification Factor	1694,5	388,0	3389,1	388,0
Smoothness Index	2926,9	543,2	3235,0	873,0
Peak Energy	1991,2	1940,0	3343,4	1940,0

Πίνακας 2-2: Τιμές Βέλτιστων ζευγών Κεντρικής Συχνότητας f_c και εύρους f_B που επιλέχθηκαν με βάση τα δέκα (10) κριτήρια για την Περίπτωση II (Υπαρξη φθοράς εσωτερικού δακτυλίου).

Η Εντροπία Shannon και στις δύο μετρήσεις επιλέγει ζώνες αποδιαμόρφωσης που βρίσκονται μακριά από την κυρίως διεγερμένη περιοχή. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τα στενά Εύρη παραθύρου που επιλέγονται οδηγούν σε μη χρήσιμα αποτελέσματα. Η Εντροπία Rényi παρουσιάζει ανάλογα αποτελέσματα με την Εντροπία Shannon.

Το κριτήριο της Κύρτωσης οδηγείται στην επιλογή μιας στενής ζώνης με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η εμφάνιση της συχνότητας της βλάβης στο αποδιαμορφωμένο φάσμα.

Ο Δείκτης Σχήματος και ο Κρουστικός Δείκτης παρουσιάζουν σχετικά όμοια αποτελέσματα. Ο Δείκτης Σχήματος επιλέγει και στις δύο μετρήσεις ως Κεντρική Συχνότητα μια τιμή που δεν σχετίζεται με την διεγερμένη κάθε φορά περιοχή. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την επιλογή της ελάχιστης ζώνης οδηγεί σε ανεπιτυχή αποδιαμόρφωση. Ο Κρουστικός Δείκτης αν και στην πρώτη μέτρηση εντοπίζει ορθά την διεγερμένη ζώνη, αποτυγχάνει να επιλέξει κάποιο ικανοποιητικό εύρος και για αυτό δεν αποδιαμορφώνει επιτυχώς το σήμα.

Ο Μέγιστος αριθμός των στοιχείων του πίνακα κυματιδιακών συντελεστών που είναι μεγαλύτεροι από ένα κατώτερο όριο και το κριτήριο που συνδυάζει την μεγιστοποίηση του Συντελεστή Μεγέθυνσης και του Πλήθους των στοιχείων του πίνακα κυματιδιακών συντελεστών που είναι μεγαλύτεροι από ένα κατώτερο όριο παρουσιάζουν τα ίδια αποτελέσματα. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2-2, επιλέγουν και στις δύο μετρήσεις σωστά την Κεντρική Συχνότητα του παραθύρου εντός της διεγερμένης ζώνης. Παρόλα αυτά, η ταυτόχρονη επιλογή του κατώτερου διαθέσιμου ορίου για το εύρος f_B εμποδίζει την

ικανοποιητική αποδιαμόρφωση. Στα φάσματα των περιβαλλουσών των σημάτων (Σχήματα 2-23 (ζ) και (η), Σχήματα 2-25 (ζ) και (η)) παρατηρείται η ύπαρξη αρμονικών της ταχύτητας περιστροφής, όχι όμως και της συχνότητας της βλάβης.

Ο Δείκτης Εξομάλυνσης στην πρώτη περίπτωση αποτυγχάνει να εντοπίσει σωστά την ζώνη διέγερσης και οδηγείται σε ανούσια από διαγνωστική πλευρά αποτελέσματα. Αντίθετα στη δεύτερη μέτρηση εντοπίζει με ακρίβεια την διεγερμένη ζώνη. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το μεγάλος εύρος του παραθύρου που επιλέγεται οδηγεί σε μια διαδικασία αποδιαμόρφωση που φαίνεται τόσο στην μορφή της περιβάλλουσας του σήματος (Σχήμα 2-23 (θ)) όσο και στο αντίστοιχο φάσμα (Σχήμα 2-25 (θ)) όπου είναι εμφανής η συχνότητα της βλάβης f_{BPFI} , συνοδευόμενη από πλευρικές αιχμές σε συχνοτικές αποστάσεις ίσες με την συχνότητα περιστροφής του άξονα.

Ο προτεινόμενος στην παρούσα διδακτορική διατριβή Δείκτης Ενέργειας Αιχμών και στις δύο μετρήσεις επιτυγχάνει να οδηγήσει στη επιλογή της κατάλληλης Κεντρικής Συχνότητας (Πίνακας 2-1). Παράλληλα η επιλογή του μεγαλύτερου Εύρους παραθύρου οδηγεί σε πολύ καλά αποτελέσματα όπως παρατηρείται στις περιβάλλουσες των Σχημάτων 2-22 (ι) και 2-24 (ι) και επιβεβαιώνεται από τα αντίστοιχα φάσματα. Στα φάσματα των περιβαλλουσών που παρουσιάζονται στα Σχήματα 2-23 (ι) και 2-25 (ι) οι πρώτες τρεις αρμονικές της χαρακτηριστικής συχνότητας διέλευσης στον Εξωτερικό Δακτύλιο f_{BPFO} είναι εμφανείς, γεγονός που υποδηλώνει τη ορθή αποδιαμόρφωση του σήματος και την εξαγωγή των απαραίτητων χρήσιμων πληροφοριών για την ανίχνευση της ύπαρξης αλλά και του τύπου της βλάβης.

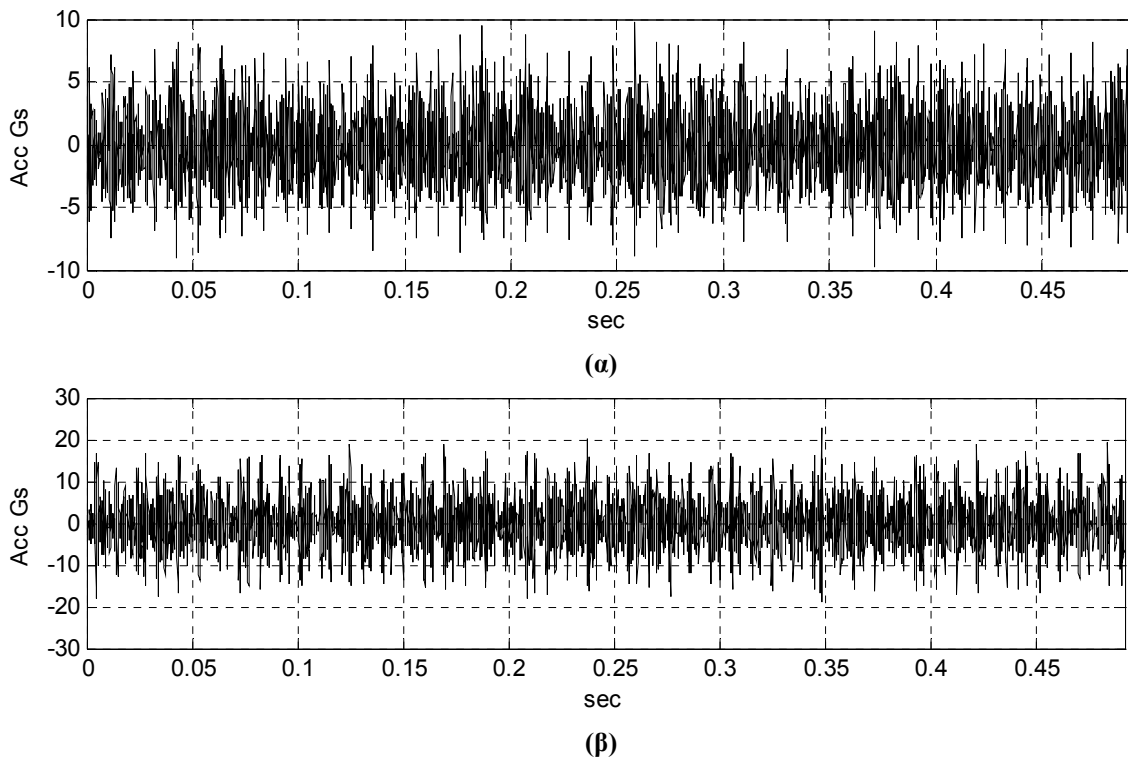
Μελετώντας τους Πίνακες 2-1 και 2-2 διαπιστώνεται ότι πολλοί δείκτες επιλέγουν το ελάχιστο Εύρος παραθύρου. Για τον λόγο αυτό στη συνέχεια το κάτω διαθέσιμο όριο τροποποιήθηκε και το διαθέσιμο πλέον εύρος αντιστοιχεί σε ζώνες $4xf_{BPFO} \leq f_B \leq 10xf_{BPFO}$ και $4xf_{BPFI} \leq f_B \leq 10xf_{BPFI}$ αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα για την πρώτη μέτρηση κάθε περίπτωσης παρουσιάζονται στους Πίνακες 2-3 και 2-4 και στα Σχήματα 2-18, 2-19 και 2-26, 2-27 αντίστοιχα. Η τροποποίηση του κάτω ορίου βελτιώνει τα αποτελέσματα μερικών δεικτών, είτε γιατί επιλέγουν πλατύτερη ζώνη αποδιαμόρφωσης, είτε γιατί εντοπίζουν καλύτερα την διεγερμένη περιοχή. Πάλι όμως αρκετοί από τους δείκτες επιλέγουν ως βέλτιστο πλάτος το ελάχιστο δυνατό. Το γεγονός αυτό δημιουργεί την υποψία ύπαρξης τοπικών ακροτάτων (μεγίστων και ελαχίστων ανάλογα με το κριτήριο) που επηρεάζουν θεμελιακά την απόδοσή τους. Αντίθετα ο προτεινόμενος δείκτης δεν μεταβάλλει τα αποτελέσματα του με την τροποποίηση του ορίου αποδεικνύοντας την ευρωστία και την αξιοπιστία του. Συνεπώς τα Μιγαδικά Μετατοπισμένα Κυματίδια Morlet, σε συνδυασμό με το κριτήριο της μεγιστοποίησης του Δείκτη Ενέργειας Αιχμών εμφανίζονται ικανά και αξιόπιστα να πραγματοποιήσουν με επιτυχία και με αυτόματα τρόπο την αποδιαμόρφωση ενός σήματος κραδασμών ένσφαιρου τριβέα που παρουσιάζει τοπική φθορά στους δακτυλίους του.

	Measurement 1	
	f_C (Hz)	f_B (Hz)
Crest factor	3583,0	377,6
Shannon Entropy	1523,4	877,9
Rényi Entropy	3571,6	377,6
Kurtosis	3588,7	377,6
Shape Factor	1523,4	849,6
Impulse Factor	3583,0	377,6
n_{th}	1352,2	377,6
Amplification Factor	1363,6	585,3
Smoothness Index	1523,4	896,8
Peak Energy	1871,4	944,0

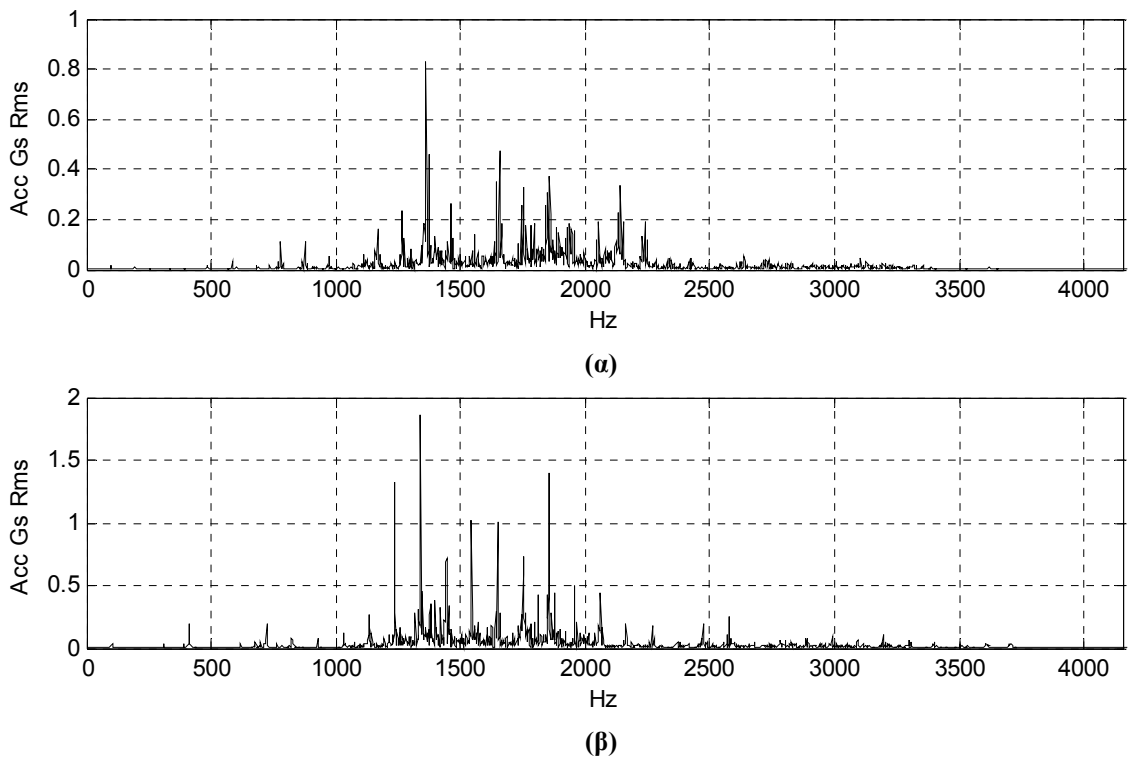
Πίνακας 2-3: Τιμές Βέλτιστων ζευγών Κεντρικής Συχνότητας f_C και εύρους f_B που επιλέχθηκαν με βάση τα δέκα (10) κριτήρια για την Περίπτωση I (Υπαρξη φθοράς εξωτερικού δακτυλίου) με $4xf_{BPFO} \leq f_B \leq 10xf_{BPFO}$.

	Measurement 1	
	f_C (Hz)	f_B (Hz)
Crest factor	2978,3	1940,0
Shannon Entropy	2926,9	776,0
Rényi Entropy	2921,2	1940,0
Kurtosis	844,4	776,0
Shape Factor	2926,9	776,0
Impulse Factor	2972,6	1940,0
n_{th}	1688,8	776,0
Amplification Factor	1688,8	776,0
Smoothness Index	2921,2	776,0
Peak Energy	1991,2	1940,0

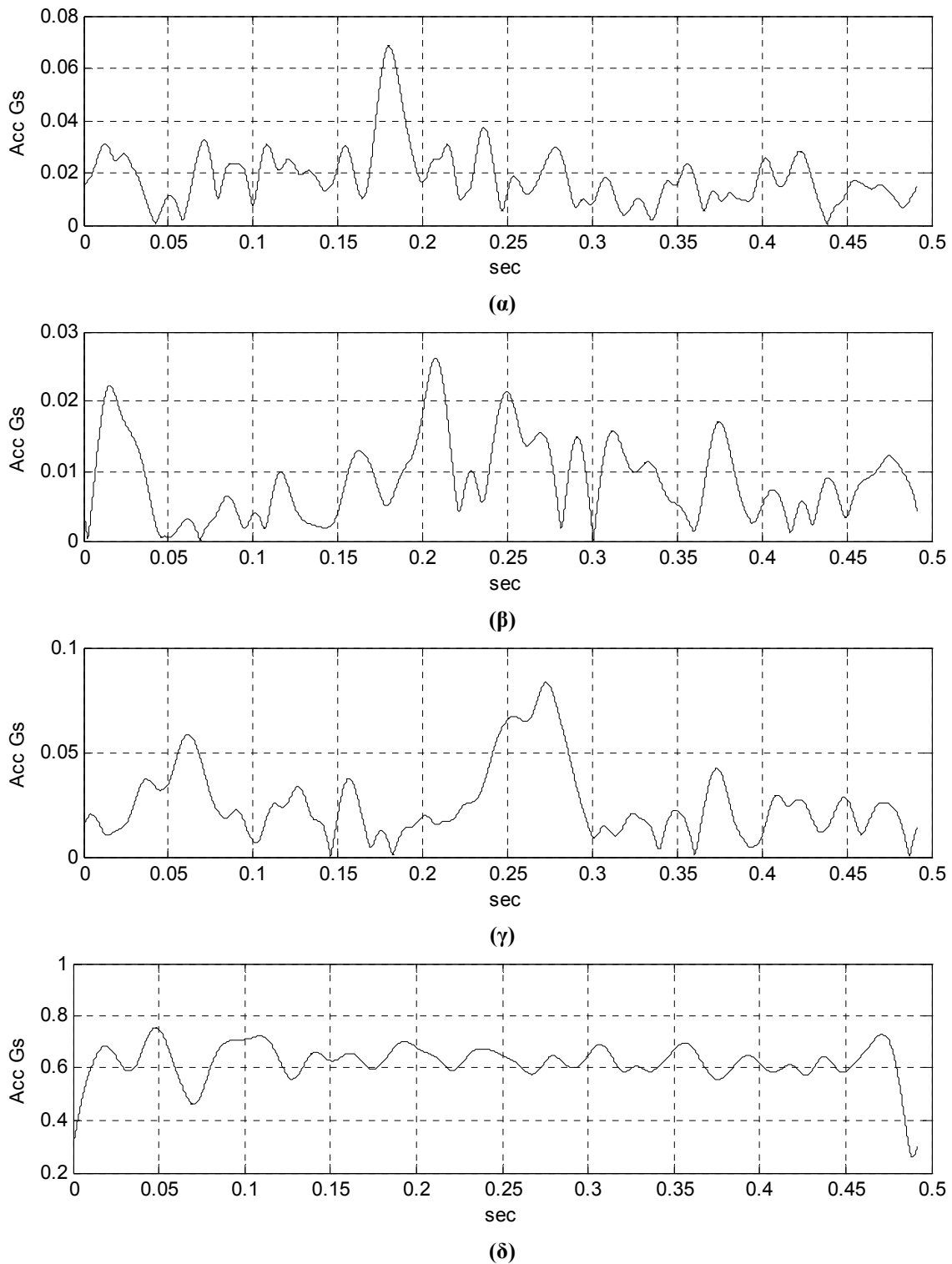
Πίνακας 2-4: Τιμές Βέλτιστων ζευγών Κεντρικής Συχνότητας f_C και εύρους f_B που επιλέχθηκαν με βάση τα δέκα (10) κριτήρια για την Περίπτωση II (Υπαρξη φθοράς εσωτερικού δακτυλίου) με $4xf_{BPFI} \leq f_B \leq 10xf_{BPFI}$.



Σχήμα 2-12: Χρονικές κυματομορφές σημάτων κραδασμών Περίπτωσης Ι (Υπαρξης σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου): (α) 1^η Μέτρηση, (β) 2^η Μέτρηση.

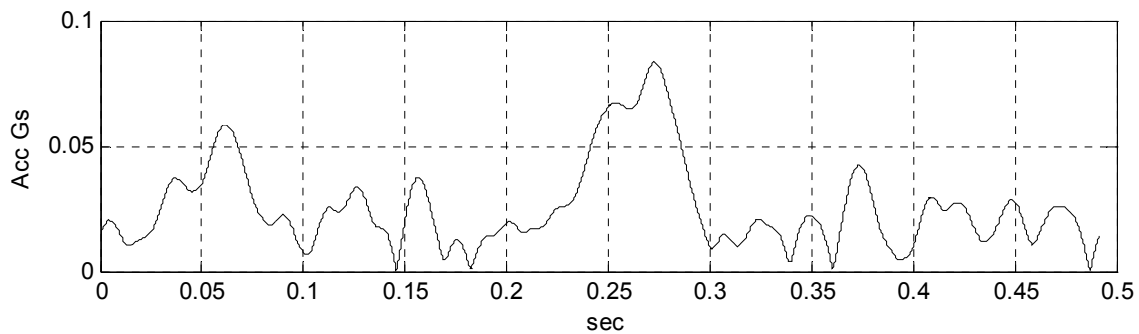


Σχήμα 2-13: Φάσματα σημάτων κραδασμών Περίπτωσης Ι (Υπαρξης σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου): (α) 1^η Μέτρηση, (β) 2^η Μέτρηση.

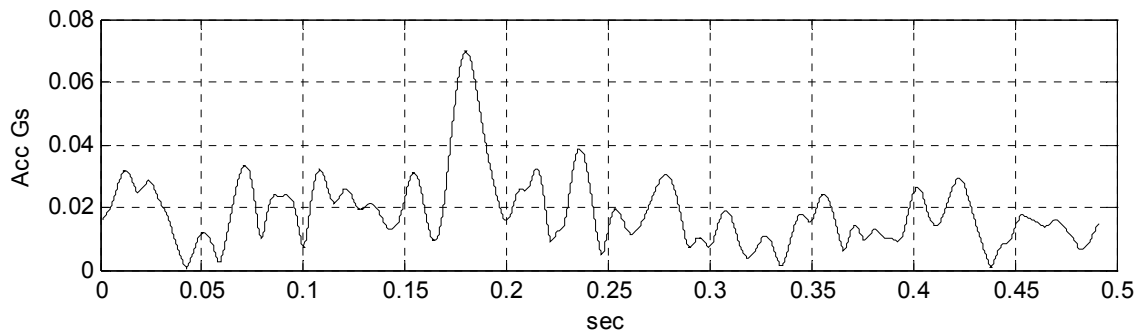


Σχήμα 2-14: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).

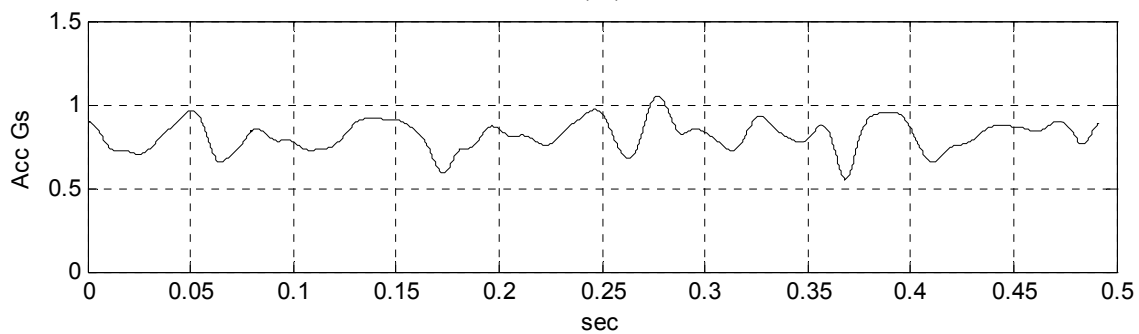
Μέθοδοι Αποδιαμόρφωσης Δυναμικής Απόκρισης Μηχανολογικού Εξοπλισμού



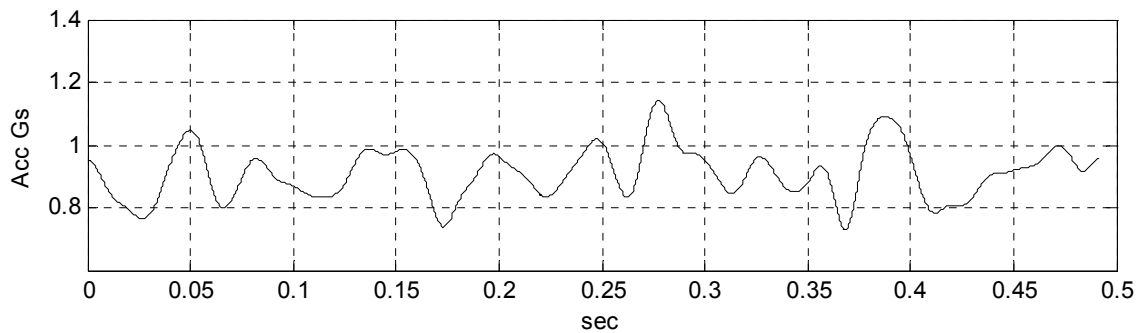
(ε)



(στ)

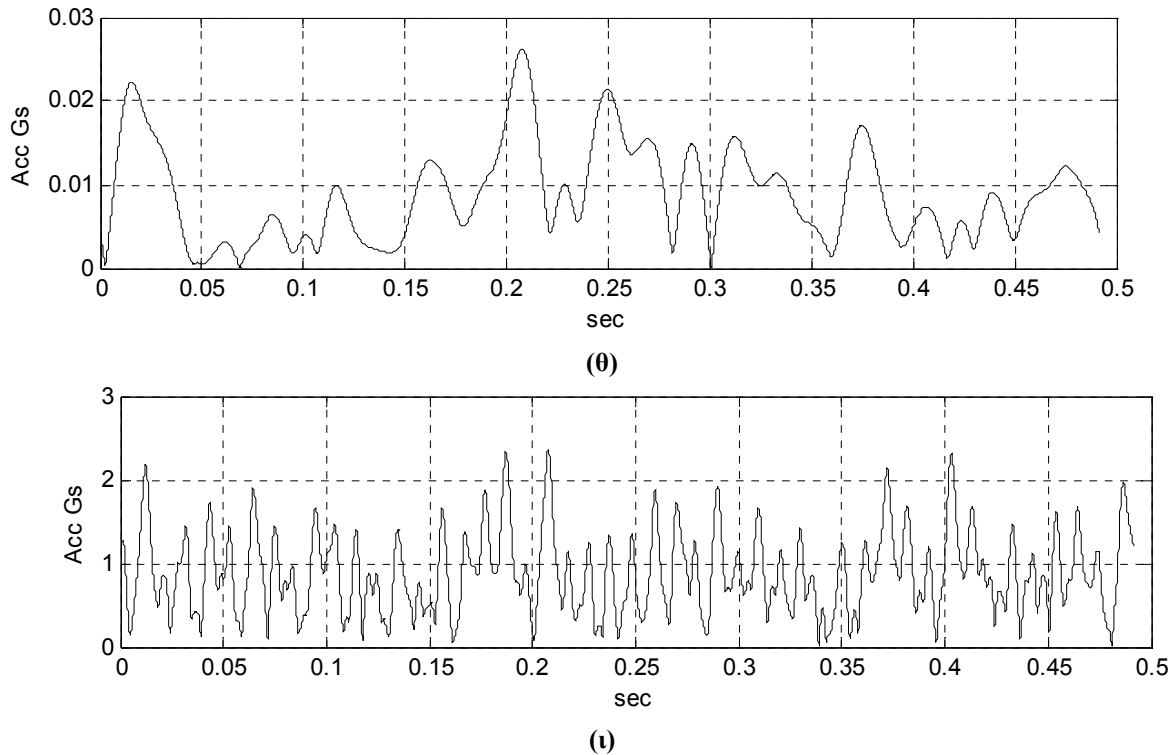


(ζ)



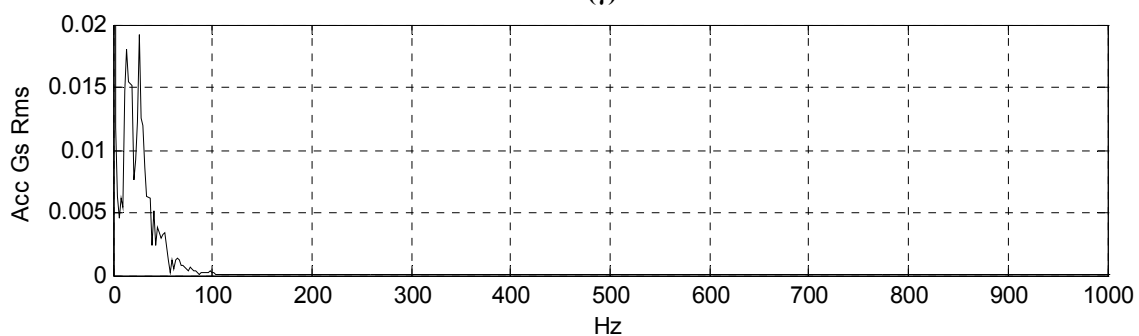
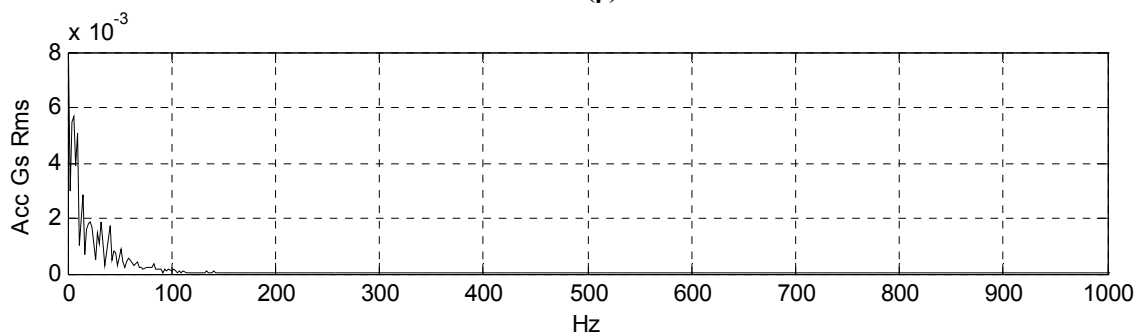
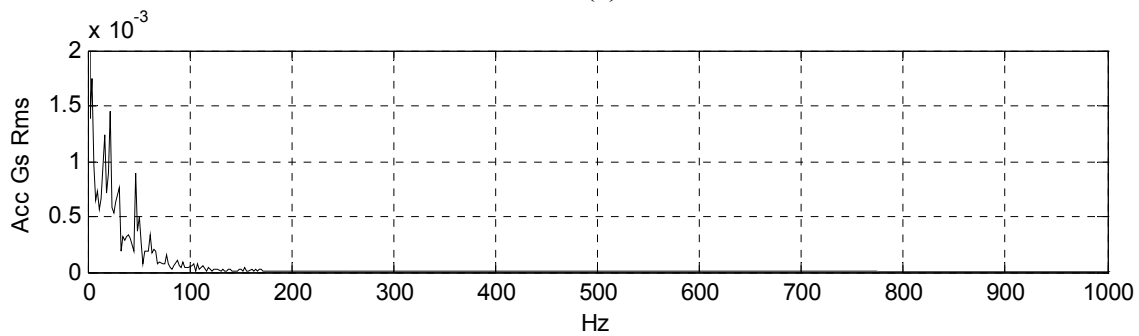
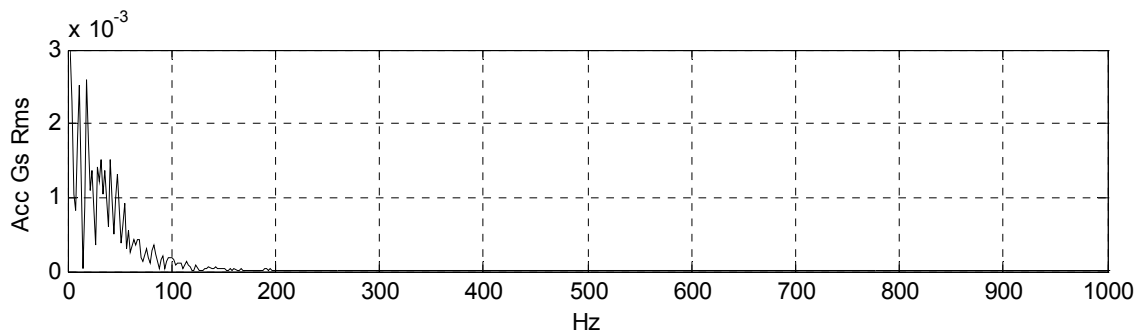
(η)

Σχήμα 2-14: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{BPF0}, 10x_{BPF0}]$: (ε) Μεγιστοποίηση Δείκτη Σχήματος (Shape Factor), (στ) Μεγιστοποίηση Κρουστικού Δείκτη (Impulse Factor), (ζ) Μεγιστοποίηση Πλήθους n_{th} , (η) Συνδυασμός Μεγιστοποίησης Συντελεστής Μεγέθυνσης και Πλήθους (συνεχίζεται).

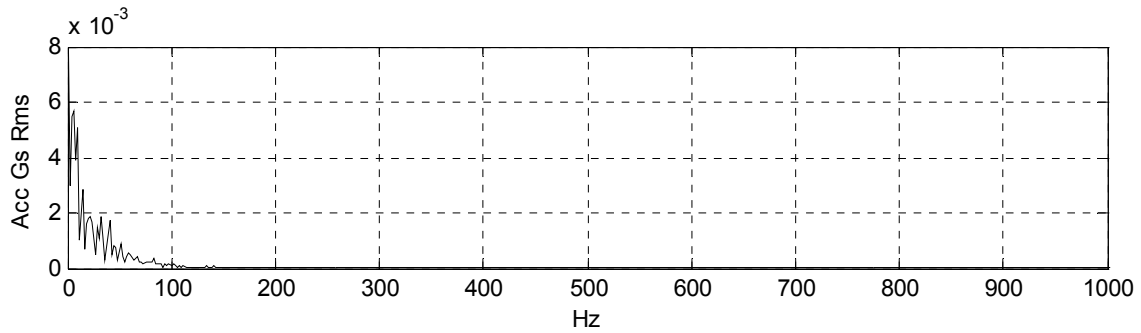


Σχήμα 2-14: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2xf_{BPF0}, 10xf_{BPF0}]$: (θ) Μεγιστοποίηση Δείκτη Εξομάλυνσης (Smoothness Index), (ι) Μεγιστοποίηση Δείκτη Ενέργειας Αιχμών (Peak Energy Index).

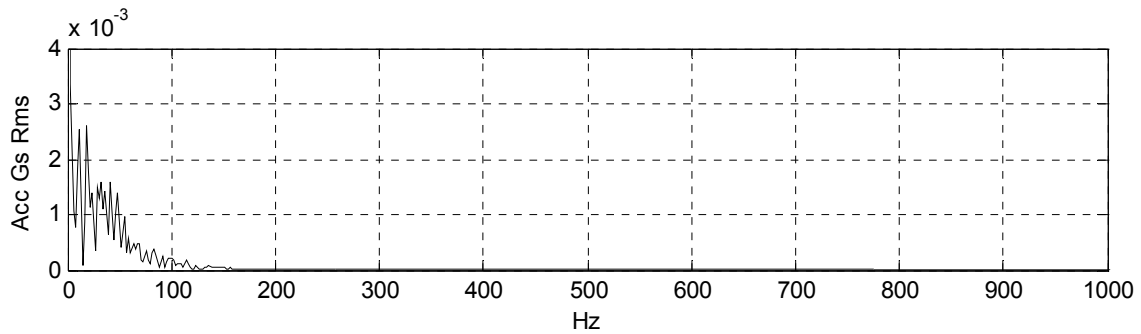
Μέθοδοι Αποδιαμόρφωσης Δυναμικής Απόκρισης Μηχανολογικού Εξοπλισμού



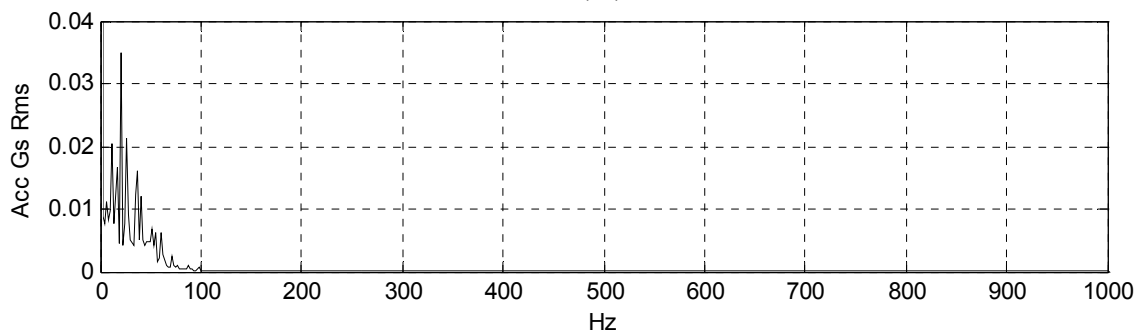
Σχήμα 2-15: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).



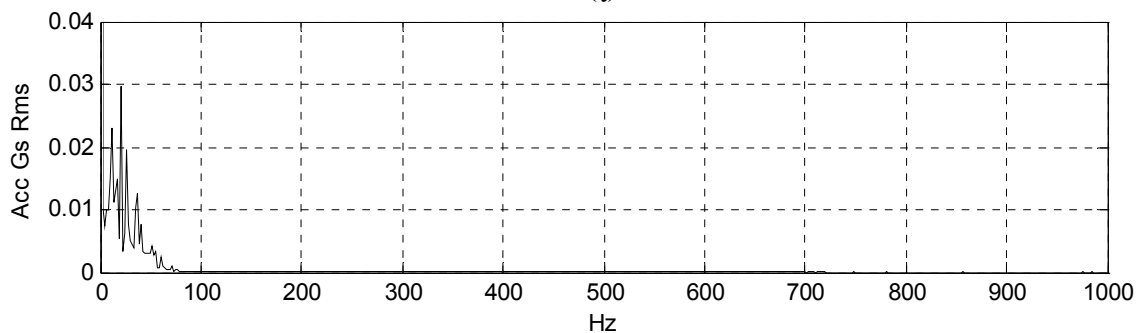
(ε)



(στ)

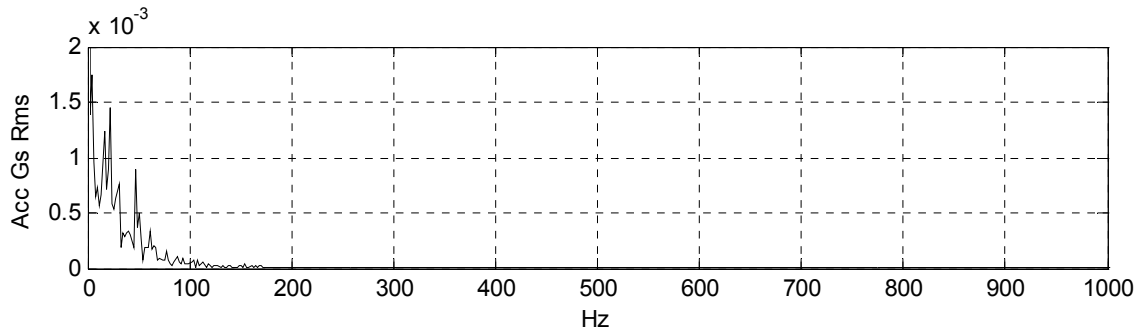


(ζ)

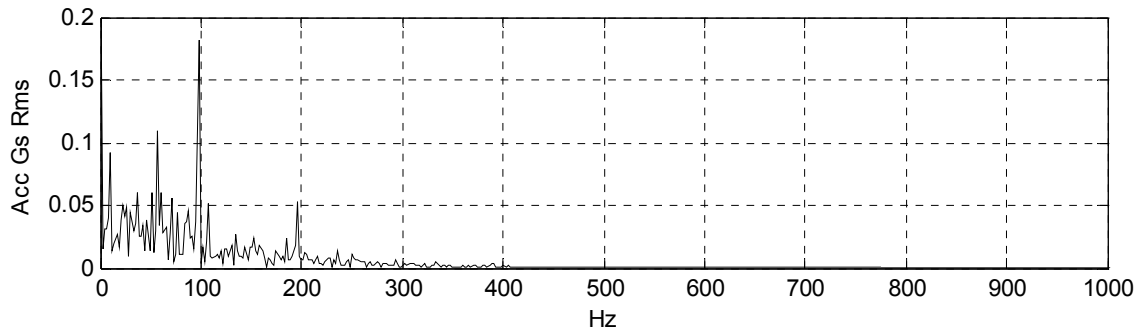


(η)

Σχήμα 2-15: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{\text{BPFO}}, 10x_{\text{BPFO}}]$: (ε) Μεγιστοποίηση Δείκτη Σχήματος (Shape Factor), (στ) Μεγιστοποίηση Κρουστικού Δείκτη (Impulse Factor), (ζ) Μεγιστοποίηση Πλήθους n_{th} , (η) Συνδυασμός Μεγιστοποίησης Συντελεστής Μεγέθυνσης και Πλήθους (συνεχίζεται).

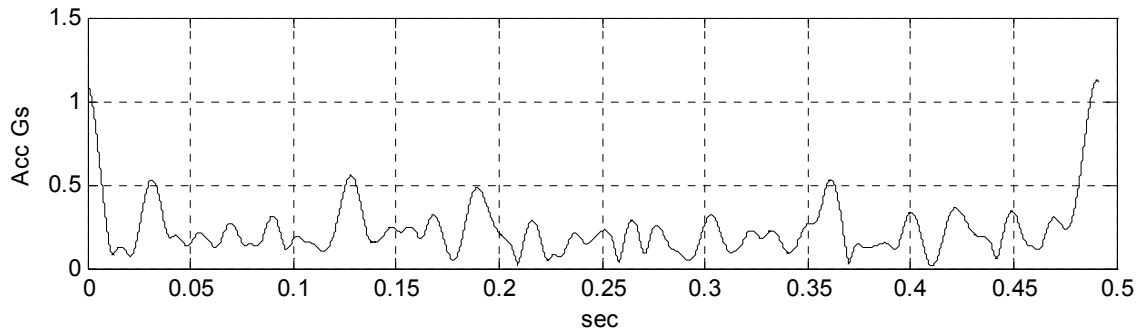


(θ)

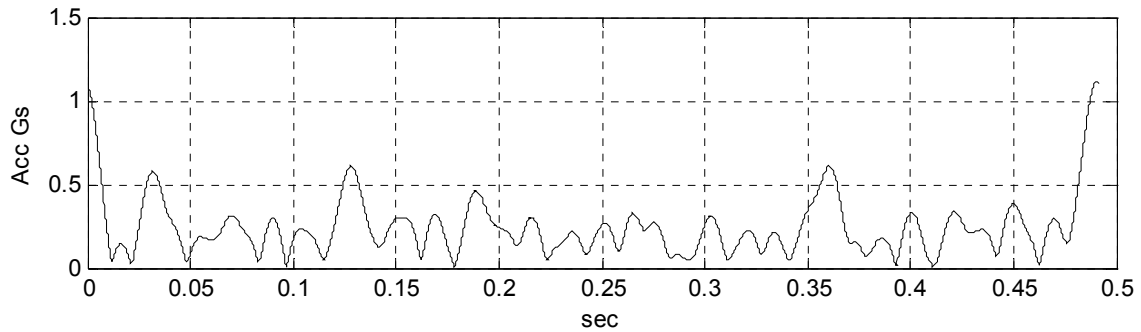


(ι)

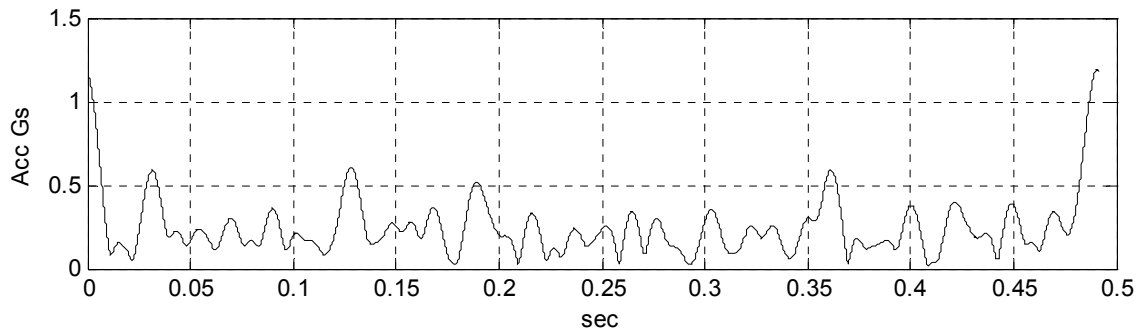
Σχήμα 2-15: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (θ) Μεγιστοποίηση Δείκτη Εξομάλυνσης (Smoothness Index), (ι) Μεγιστοποίηση Δείκτη Ενέργειας Αιχμών (Peak Energy Index).



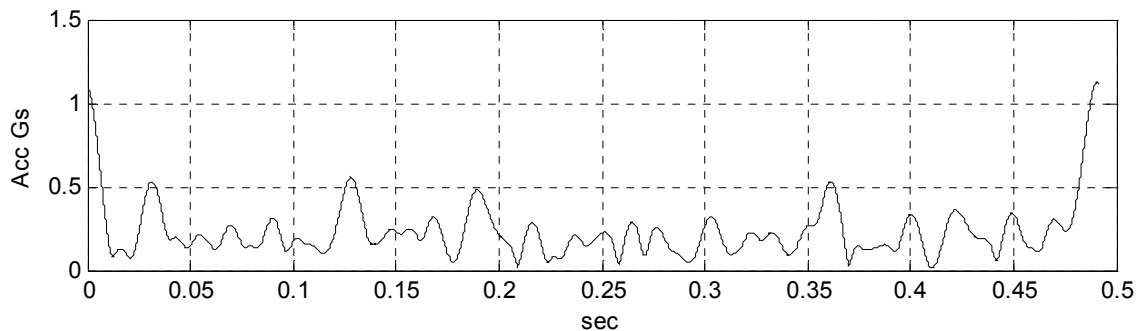
(α)



(β)



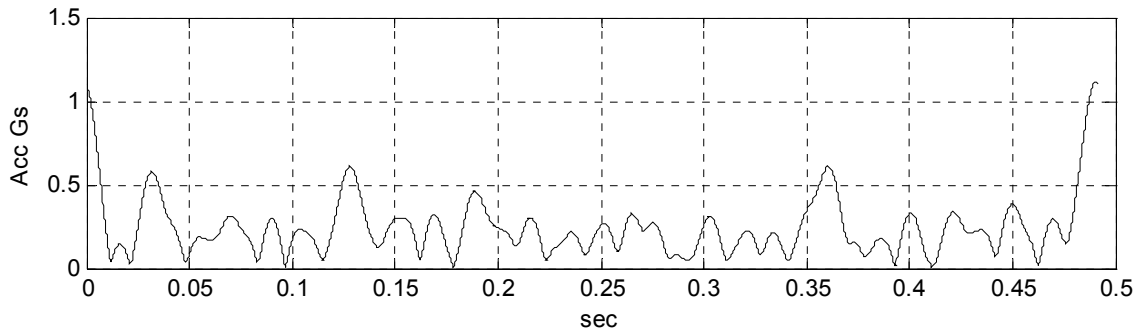
(γ)



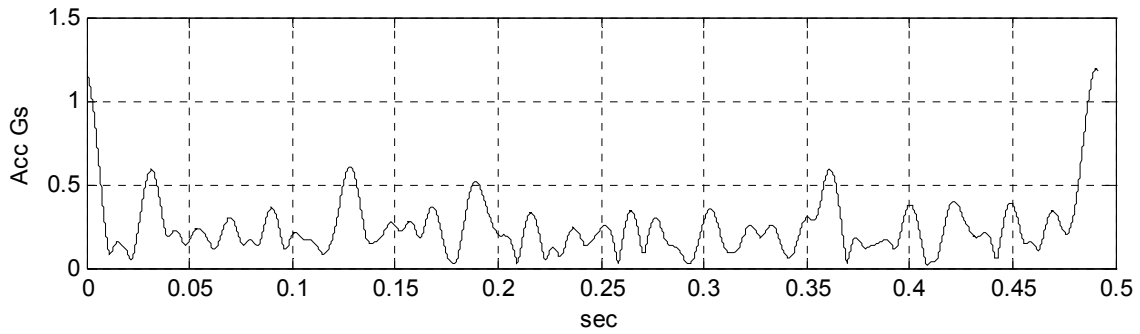
(δ)

Σχήμα 2-16: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 2 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).

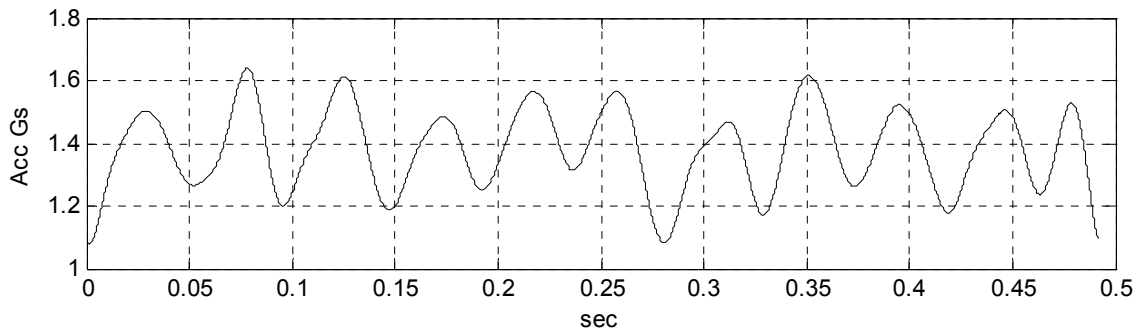
Μέθοδοι Αποδιαμόρφωσης Δυναμικής Απόκρισης Μηχανολογικού Εξοπλισμού



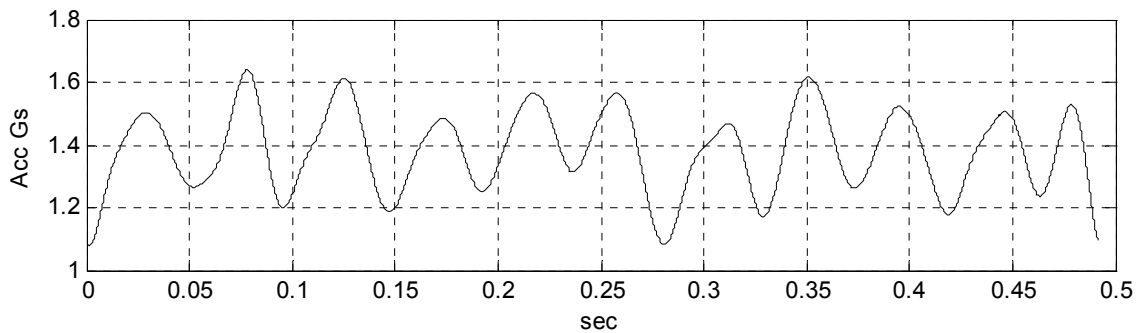
(ε)



(στ)

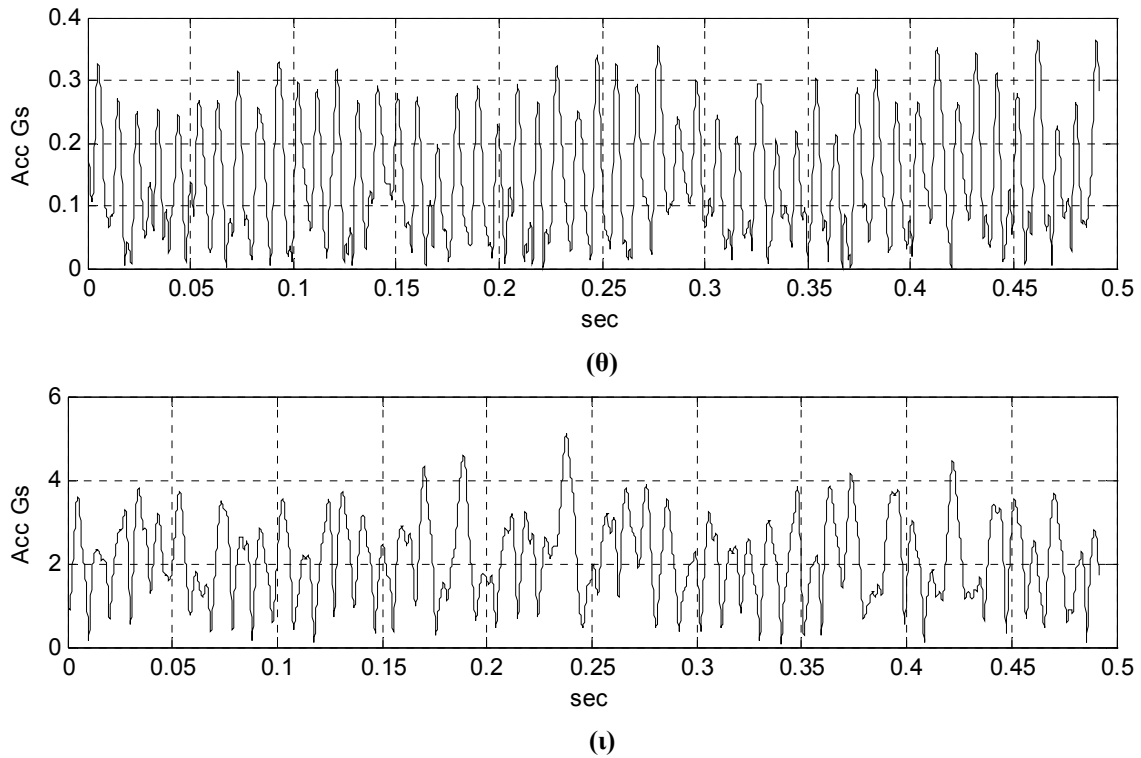


(ζ)

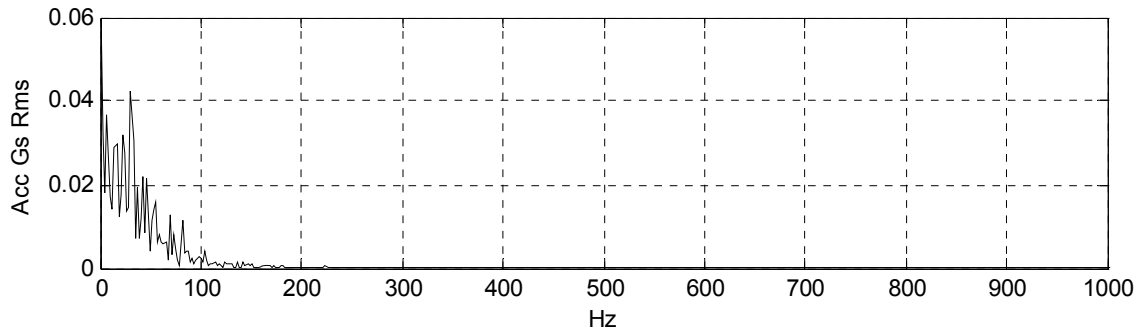


(η)

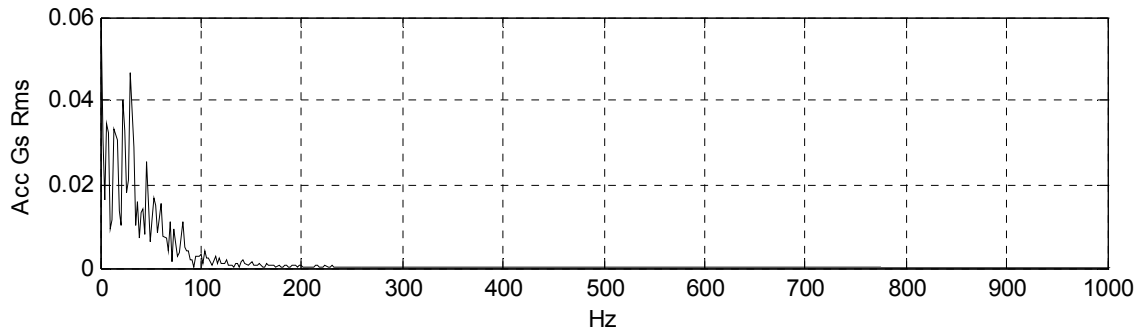
Σχήμα 2-16: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 2 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{BPF0}, 10x_{BPF0}]$: (ε) Μεγιστοποίηση Δείκτη Σχήματος (Shape Factor), (στ) Μεγιστοποίηση Κρουστικού Δείκτη (Impulse Factor), (ζ) Μεγιστοποίηση Πλήθους n_{th} , (η) Συνδυασμός Μεγιστοποίησης Συντελεστής Μεγέθυνσης και Πλήθους (συνεχίζεται).



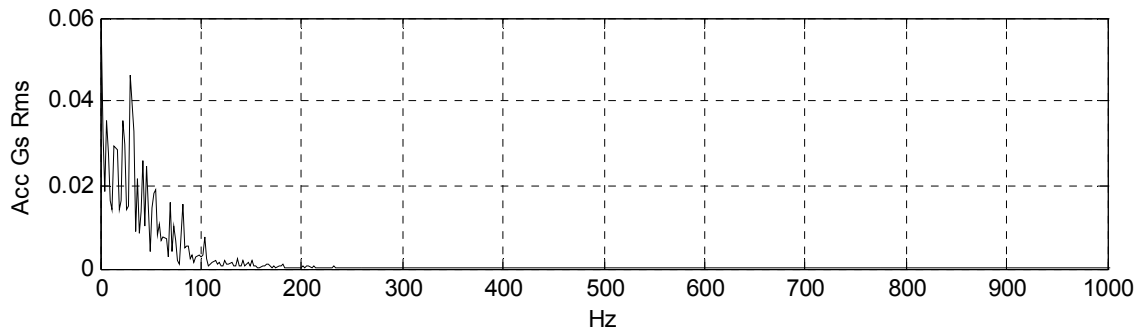
Σχήμα 2-16: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 2 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BFFO}}, 10x_{f_{BFFO}}]$: (θ) Μεγιστοποίηση Δείκτη Εξομάλυνσης (Smoothness Index), (ι) Μεγιστοποίηση Δείκτη Ενέργειας Αιχμών (Peak Energy Index).



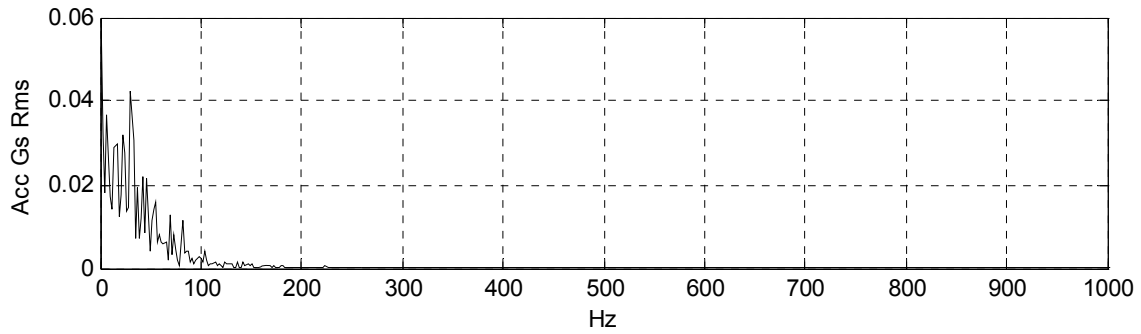
(α)



(β)

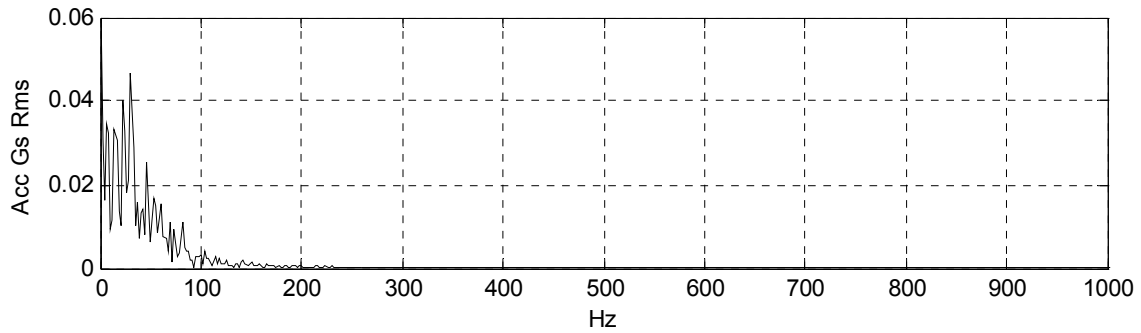


(γ)

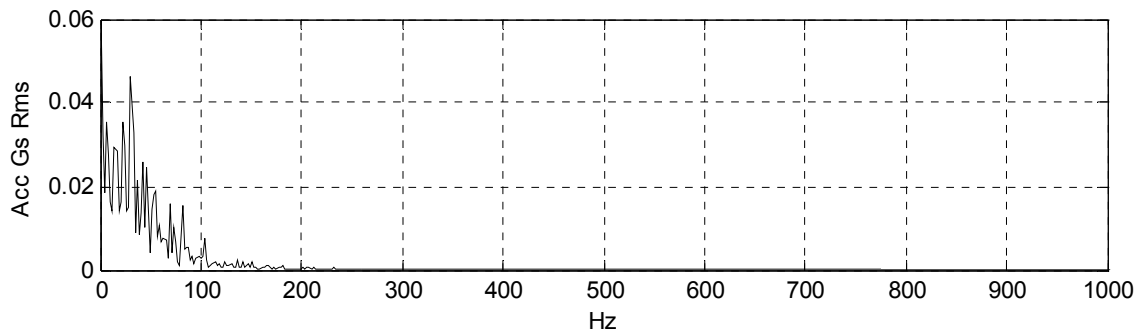


(δ)

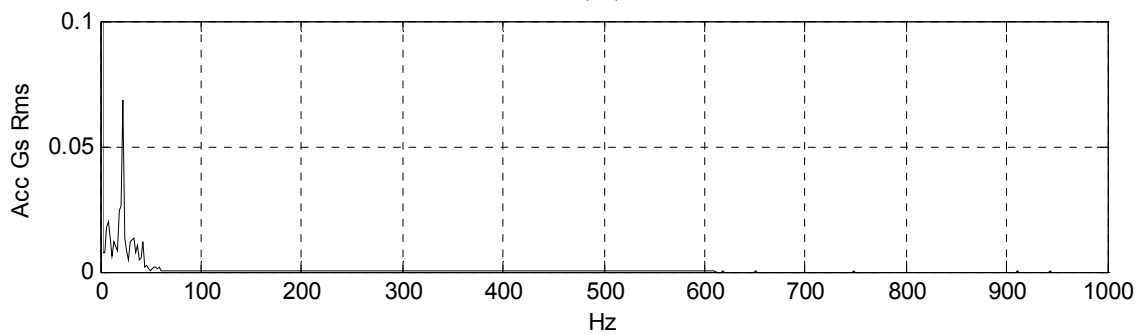
Σχήμα 2-17: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 2 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).



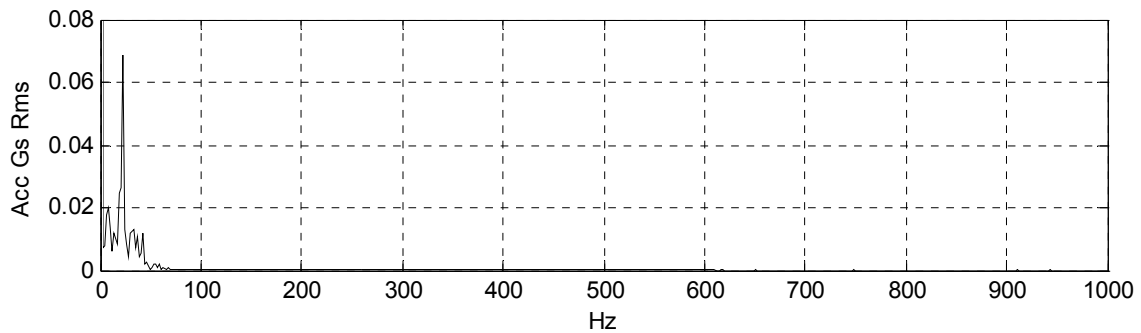
(ε)



(στ)

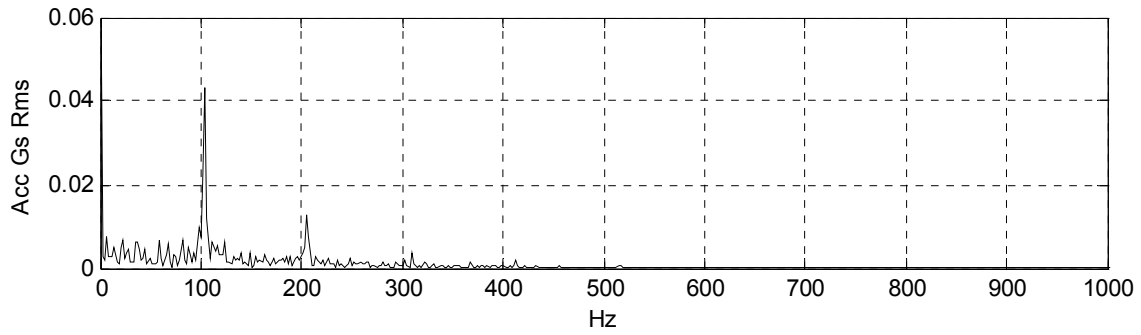


(ζ)

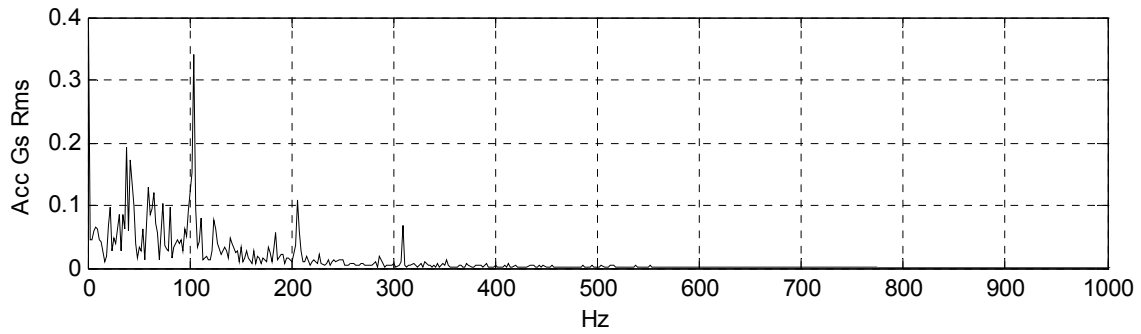


(η)

Σχήμα 2-17: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 2 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (ε) Μεγιστοποίηση Δείκτη Σχήματος (Shape Factor), (στ) Μεγιστοποίηση Κρουστικού Δείκτη (Impulse Factor), (ζ) Μεγιστοποίηση Πλήθους n_{th} (η) Συνδυασμός Μεγιστοποίησης Συντελεστής Μεγέθυνσης και Πλήθους (συνεχίζεται).

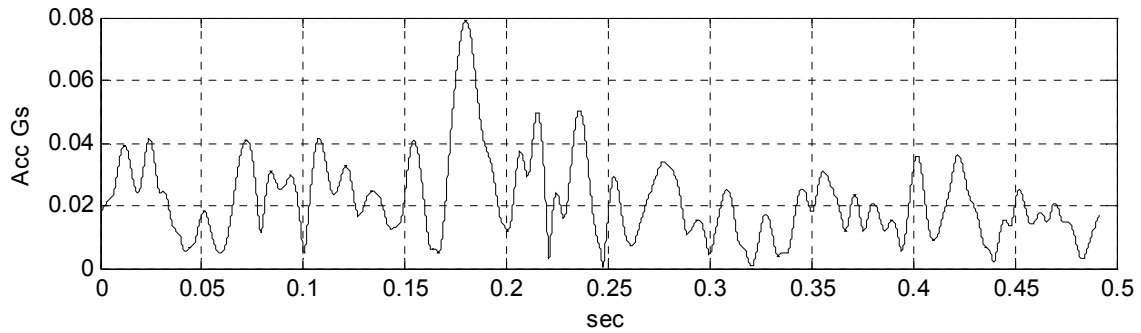


(θ)

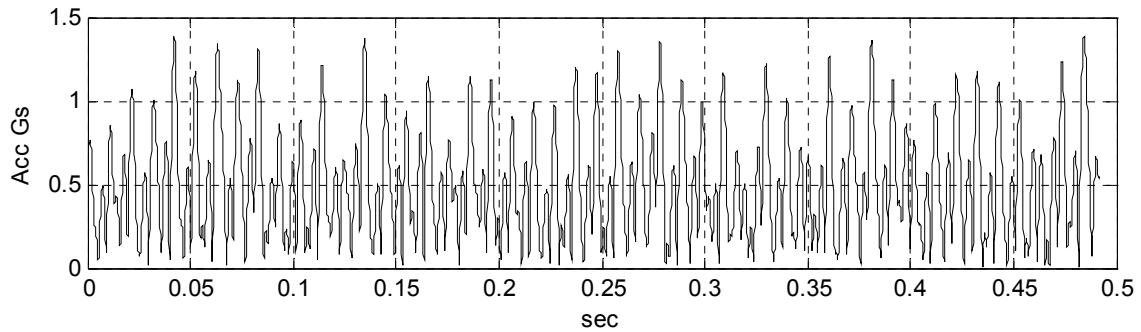


(ι)

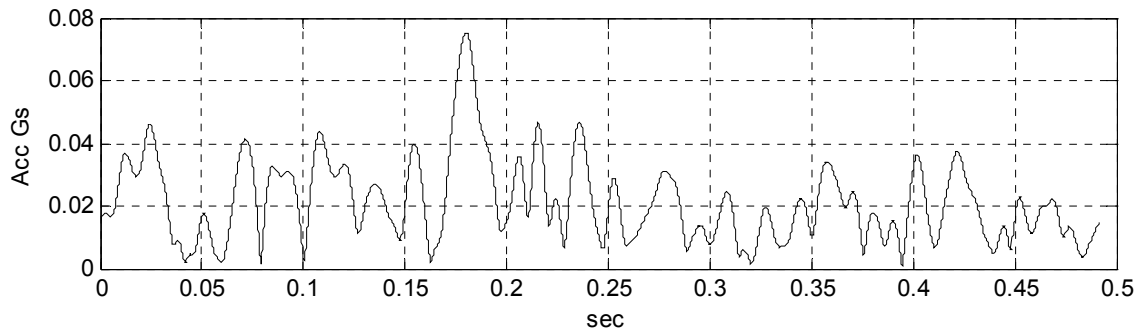
Σχήμα 2-17: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 2 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (θ) Μεγιστοποίηση Δείκτη Εξομάλυνσης (Smoothness Index), (ι) Μεγιστοποίηση Δείκτη Ενέργειας Αιχμών (Peak Energy Index).



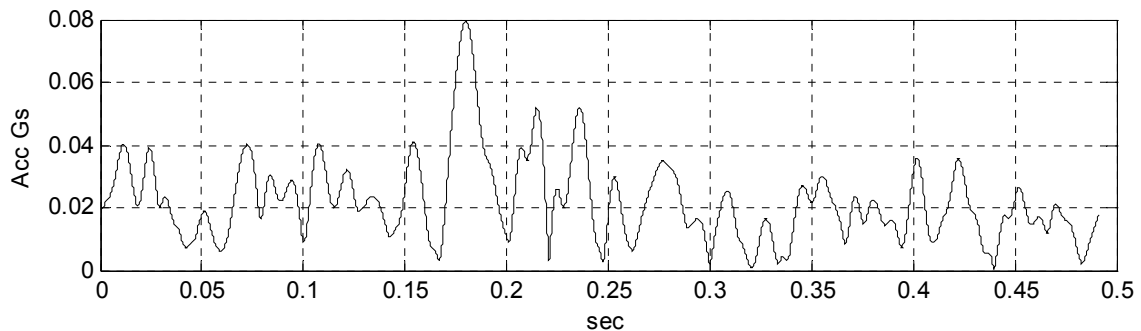
(α)



(β)



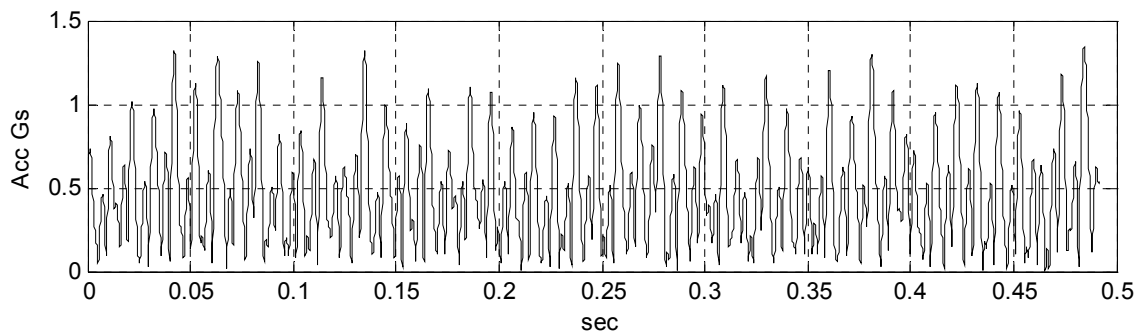
(γ)



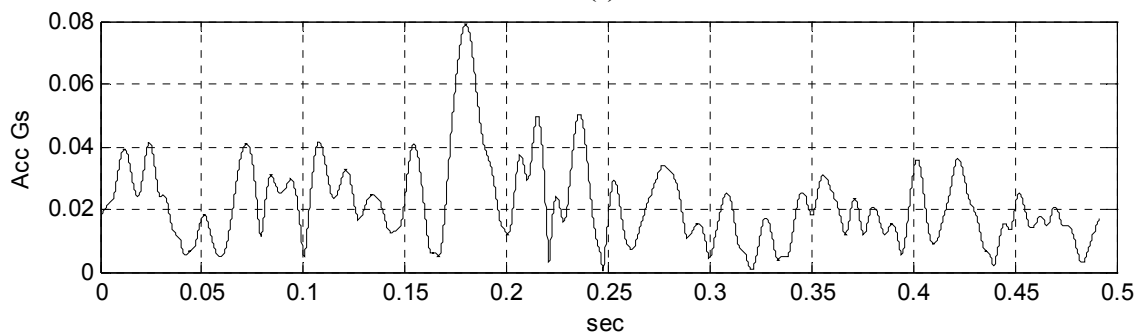
(δ)

Σχήμα 2-18: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[4x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).

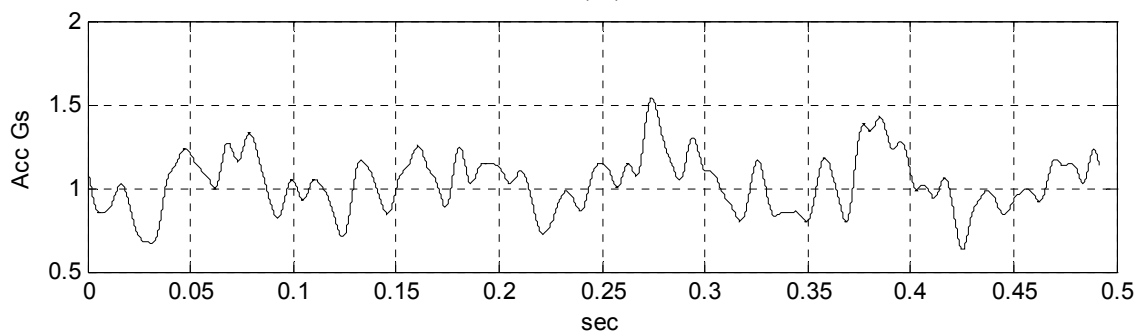
Μέθοδοι Αποδιαμόρφωσης Δυναμικής Απόκρισης Μηχανολογικού Εξοπλισμού



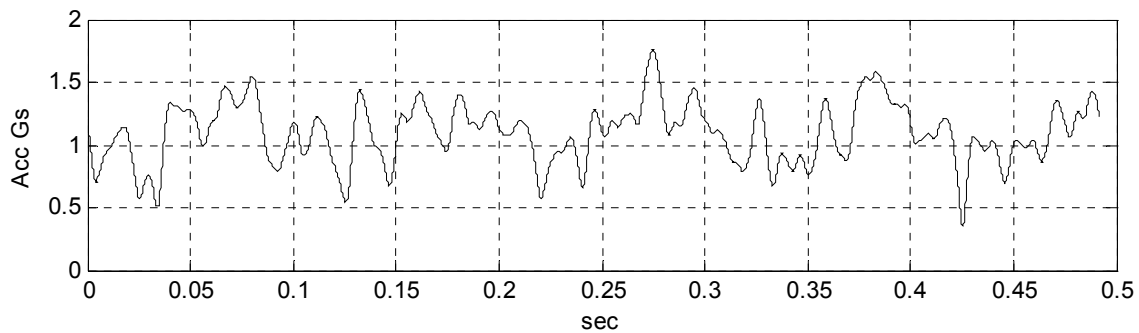
(ε)



(στ)

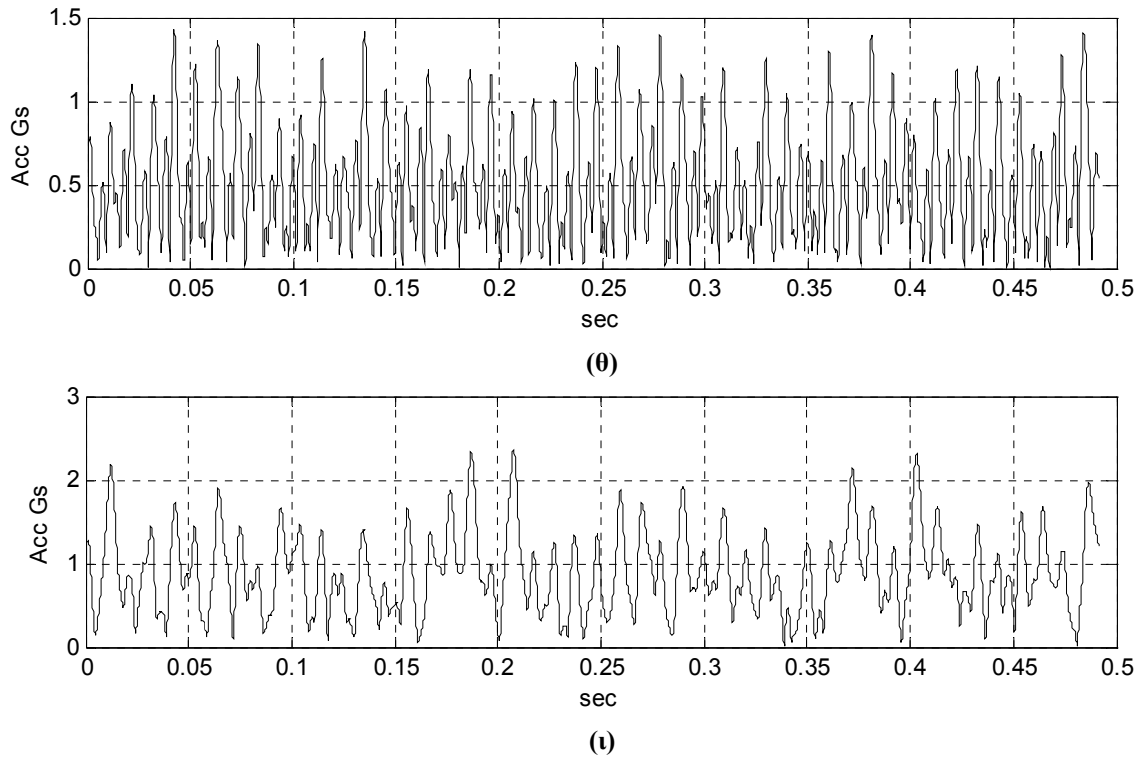


(ζ)



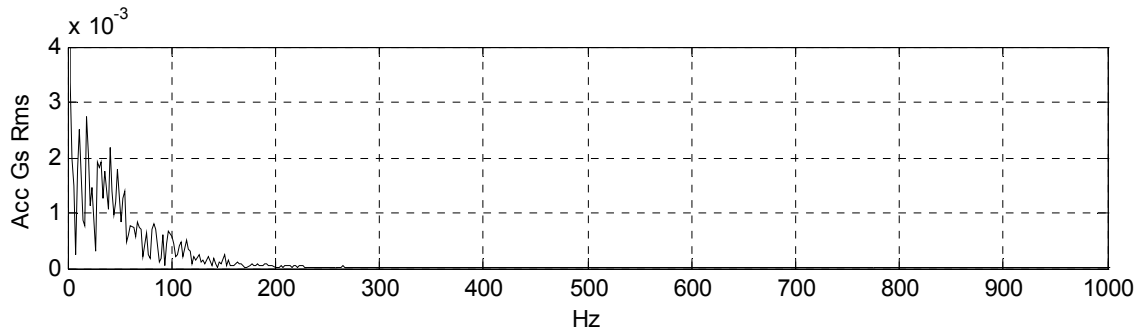
(η)

Σχήμα 2-18: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[4x_{BPF0}, 10x_{BPF0}]$: (ε) Μεγιστοποίηση Δείκτη Σχήματος (Shape Factor), (στ) Μεγιστοποίηση Κρουστικού Δείκτη (Impulse Factor), (ζ) Μεγιστοποίηση Πλήθους n_{th} , (η) Συνδυασμός Μεγιστοποίησης Συντελεστής Μεγέθυνσης και Πλήθους (συνεχίζεται).

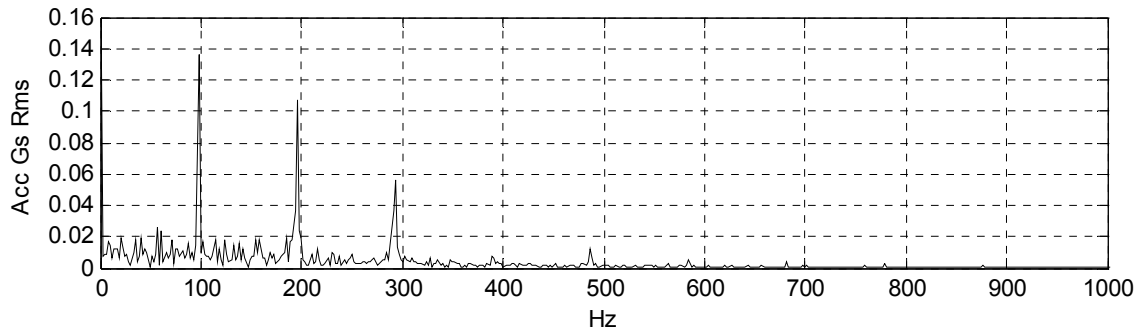


Σχήμα 2-18: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[4x_{BFFO}, 10x_{BFFO}]$: (θ) Μεγιστοποίηση Δείκτη Εξομάλυνσης (Smoothness Index), (ι) Μεγιστοποίηση Δείκτη Ενέργειας Αιχμών (Peak Energy Index).

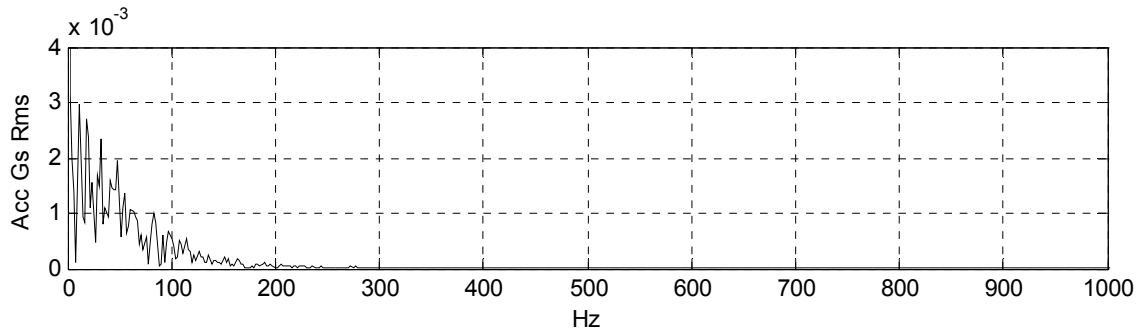
Μέθοδοι Αποδιαμόρφωσης Δυναμικής Απόκρισης Μηχανολογικού Εξοπλισμού



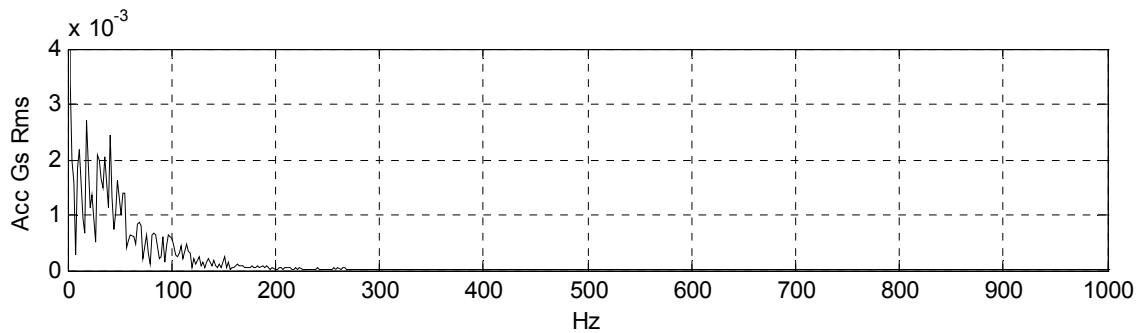
(α)



(β)

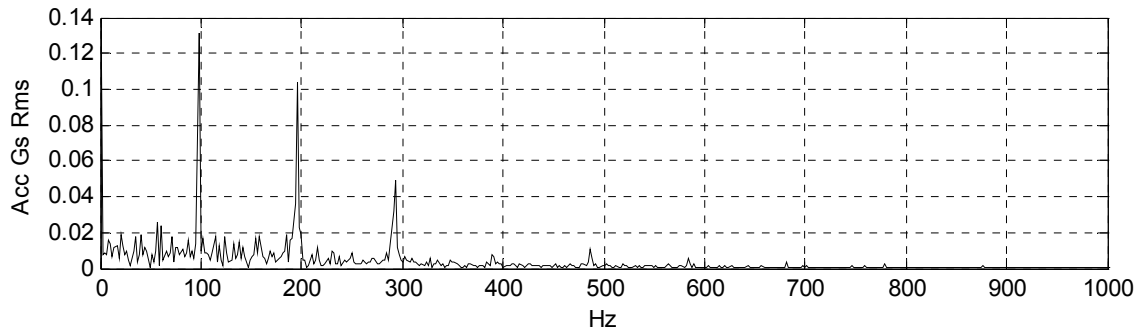


(γ)

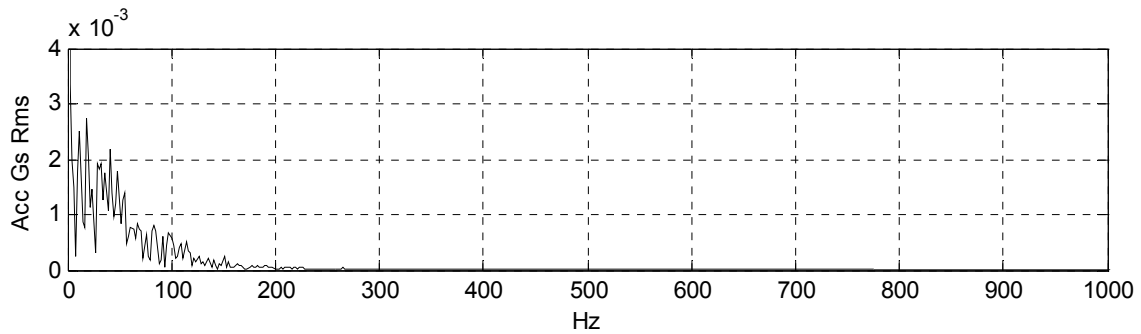


(δ)

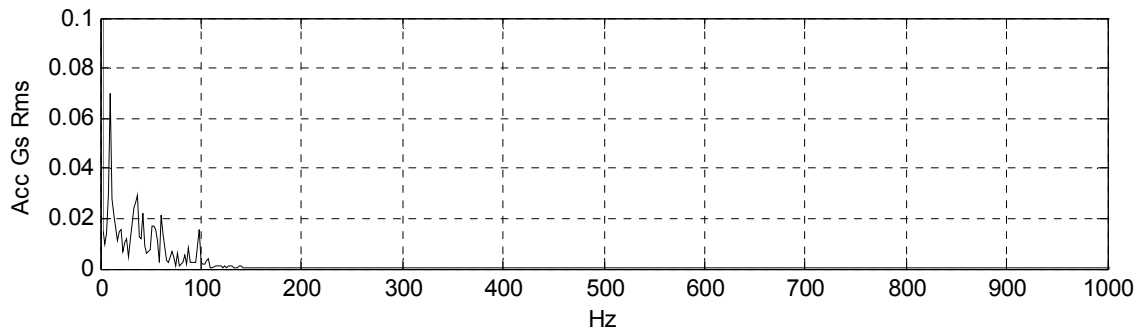
Σχήμα 2-19: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[4x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).



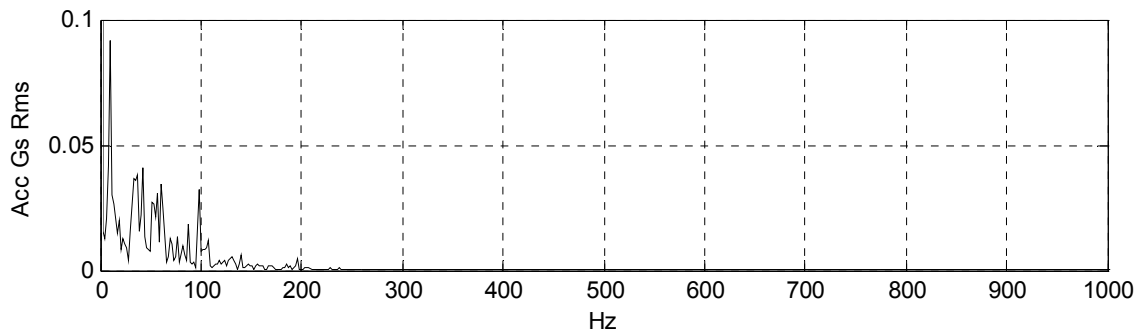
(ε)



(στ)

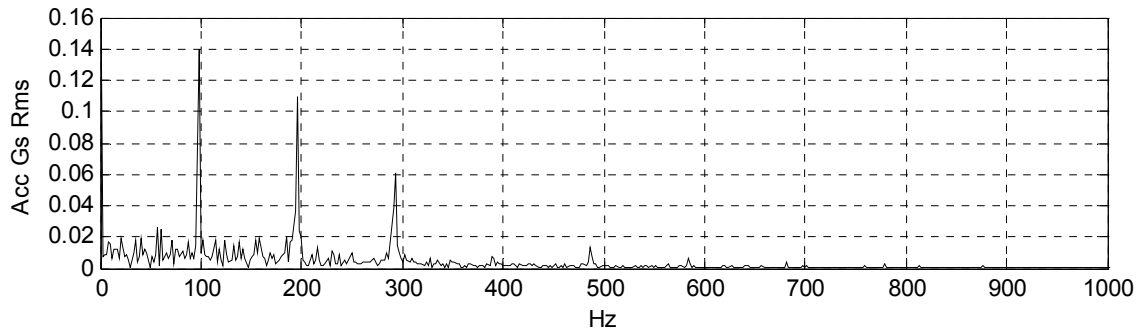


(ζ)

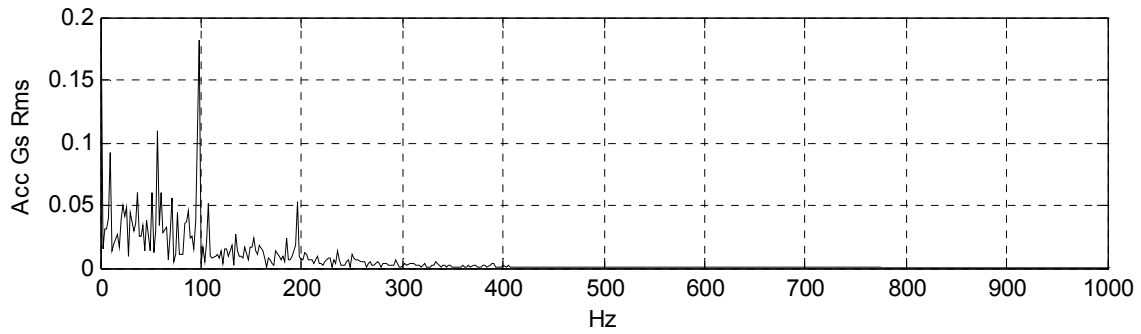


(η)

Σχήμα 2-19: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[4x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (ε) Μεγιστοποίηση Δείκτη Σχήματος (Shape Factor), (στ) Μεγιστοποίηση Κρουστικού Δείκτη (Impulse Factor), (ζ) Μεγιστοποίηση Πλήθους n_{th} , (η) Συνδυασμός Μεγιστοποίησης Συντελεστής Μεγέθυνσης και Πλήθους (συνεχίζεται).

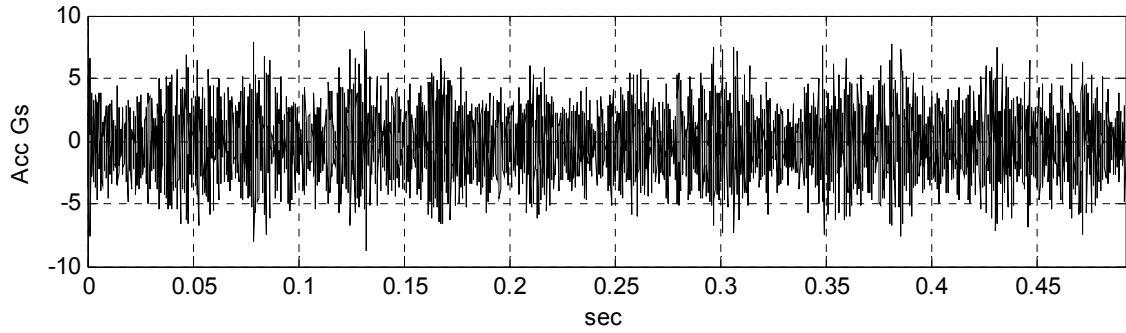


(θ)

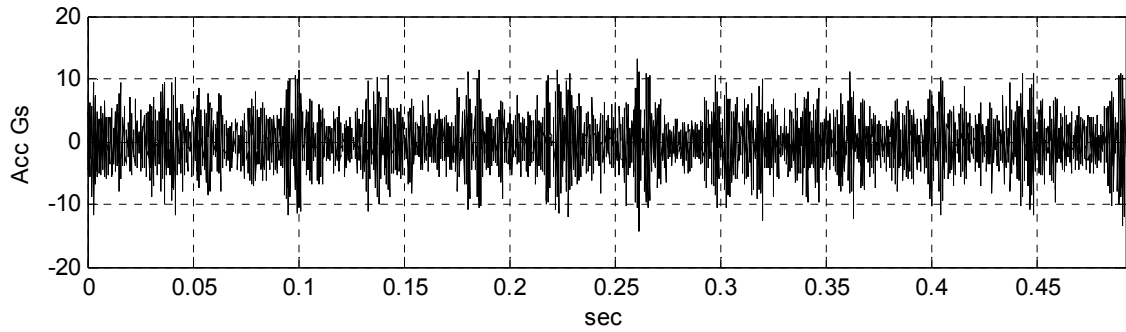


(ι)

Σχήμα 2-19: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[4x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (θ) Μεγιστοποίηση Δείκτη Εξομάλυνσης (Smoothness Index), (ι) Μεγιστοποίηση Δείκτη Ενέργειας Αιχμών (Peak Energy Index).

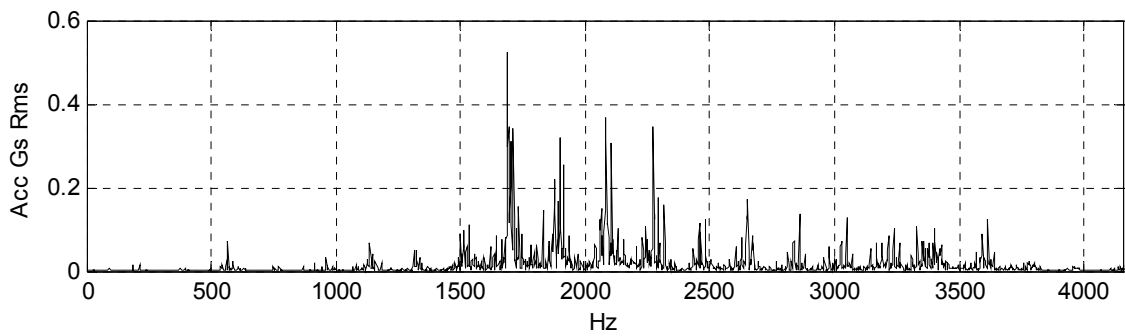


(α)

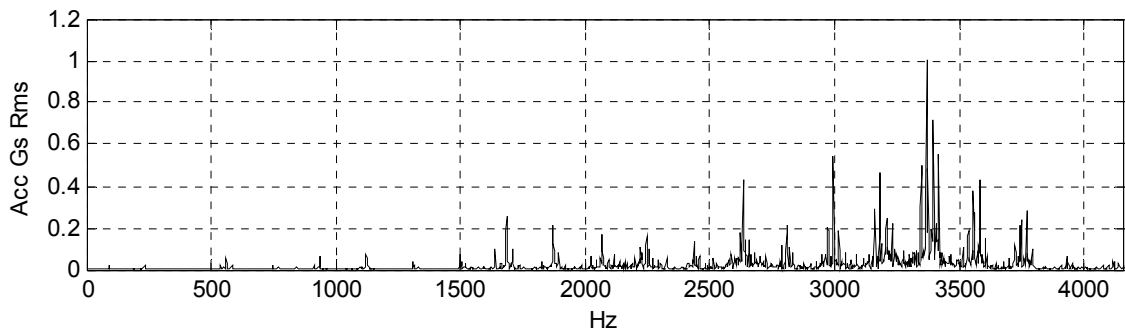


(β)

Σχήμα 2-10: Χρονικές κυματομορφές σημάτων κραδασμών Περίπτωσης II (Υπαρξης σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου): (α) 1^η Μέτρηση, (β) 2^η Μέτρηση.

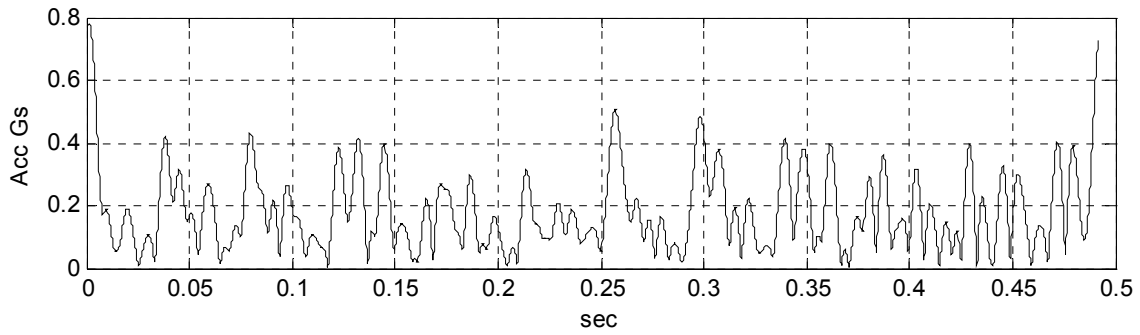


(α)

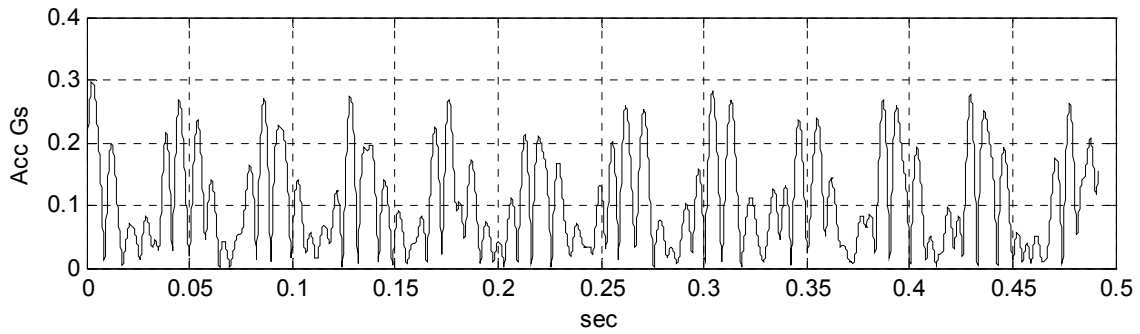


(β)

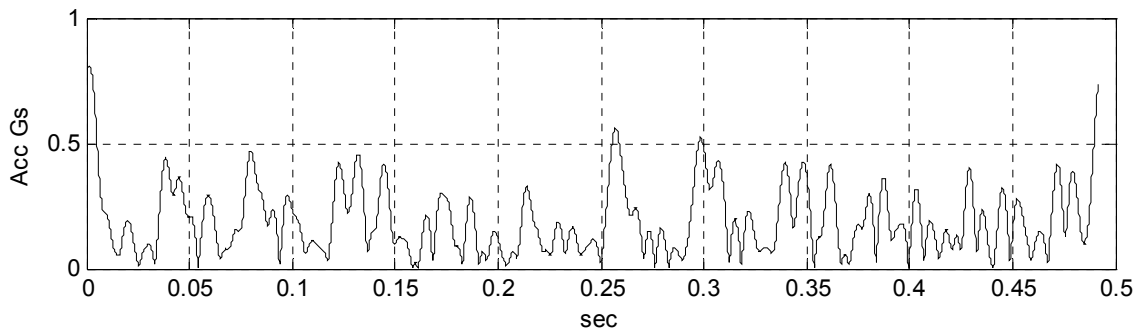
Σχήμα 2-21: Φάσματα σημάτων κραδασμών περίπτωσης II (Υπαρξης σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου): (α) 1^η Μέτρηση, (β) 2^η Μέτρηση.



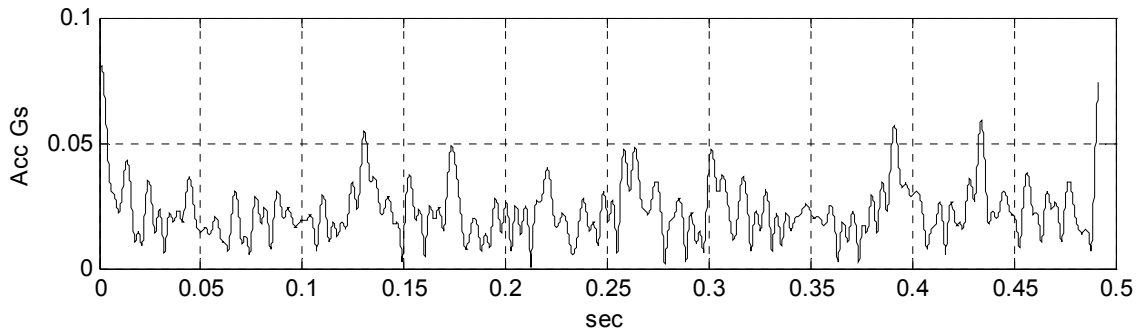
(α)



(β)

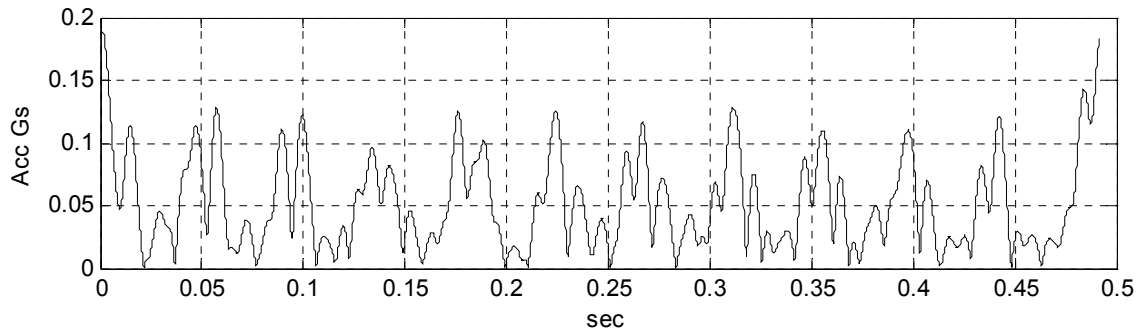


(γ)

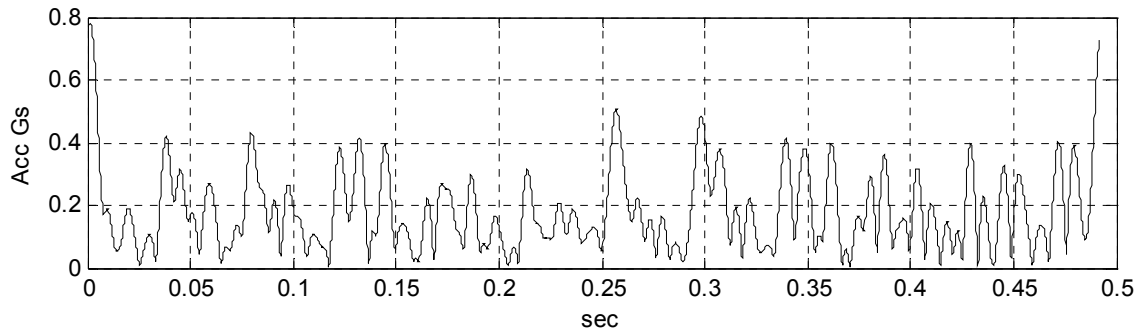


(δ)

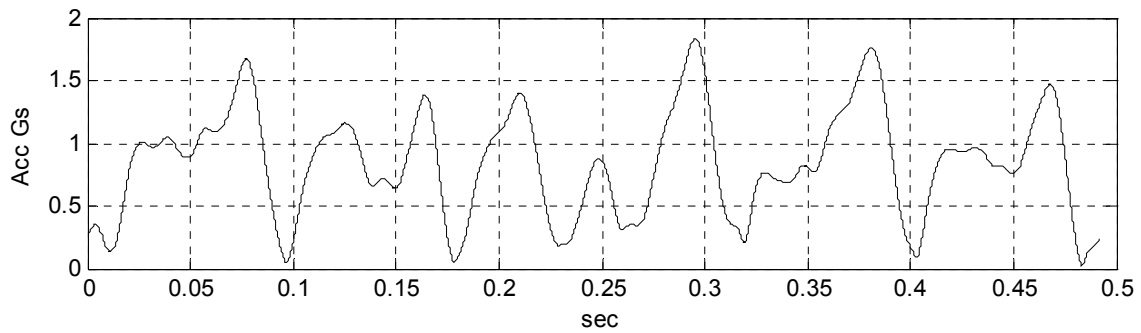
Σχήμα 2-22: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).



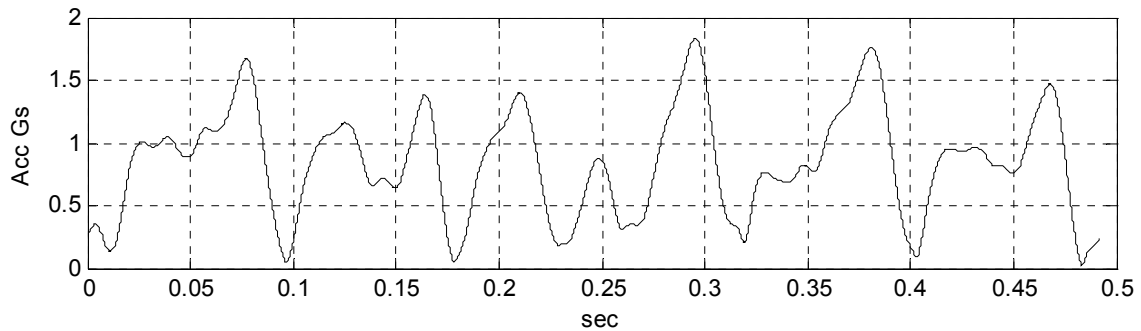
(ε)



(στ)

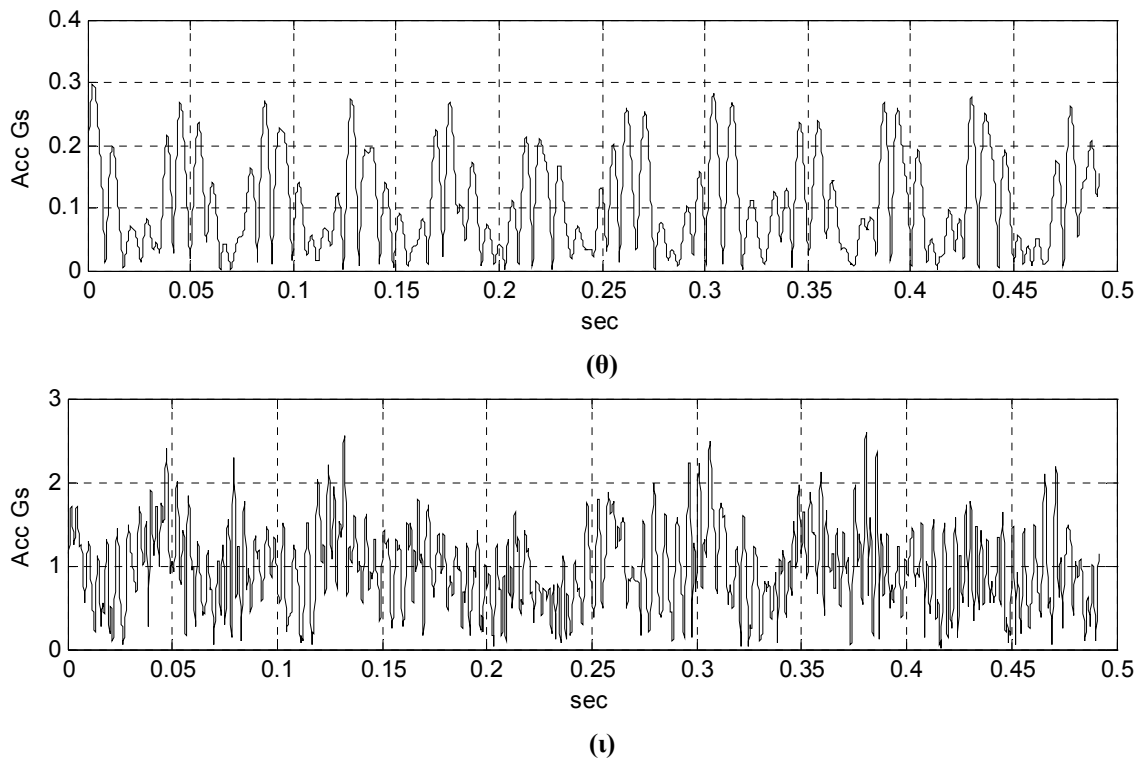


(ζ)

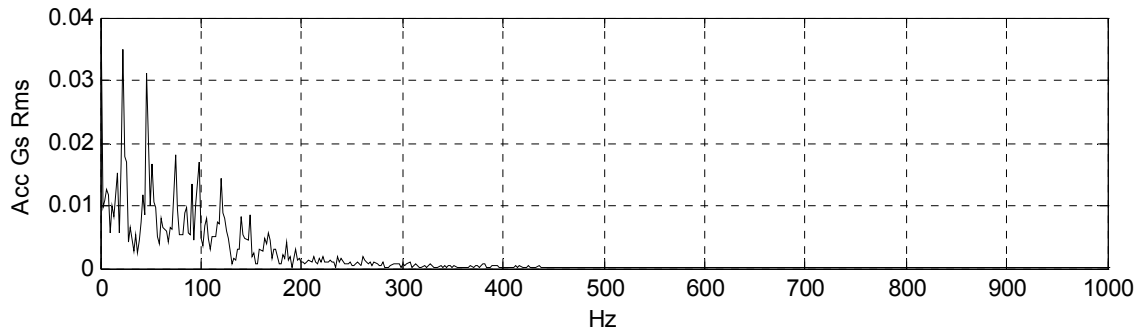


(η)

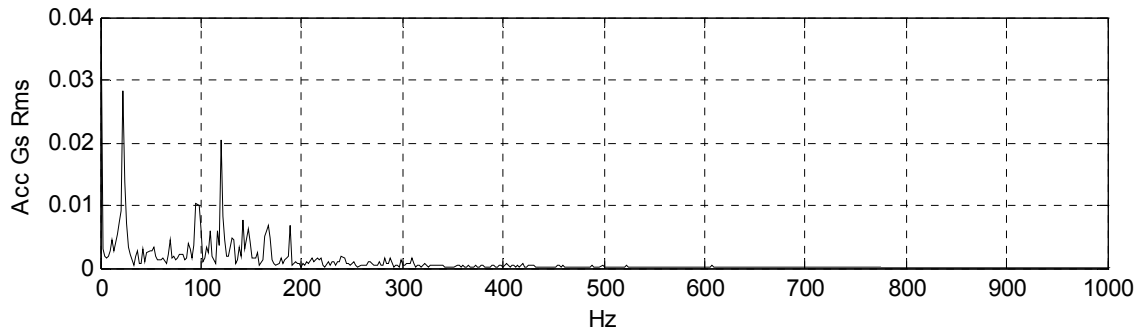
Σχήμα 2-22: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPF0}}, 10x_{f_{BPF0}}]$: (ε) Μεγιστοποίηση Δείκτη Σχήματος (Shape Factor), (στ) Μεγιστοποίηση Κρουστικού Δείκτη (Impulse Factor), (ζ) Μεγιστοποίηση Πλήθους n_{th} , (η) Συνδυασμός Μεγιστοποίησης Συντελεστής Μεγέθυνσης και Πλήθους (συνεχίζεται).



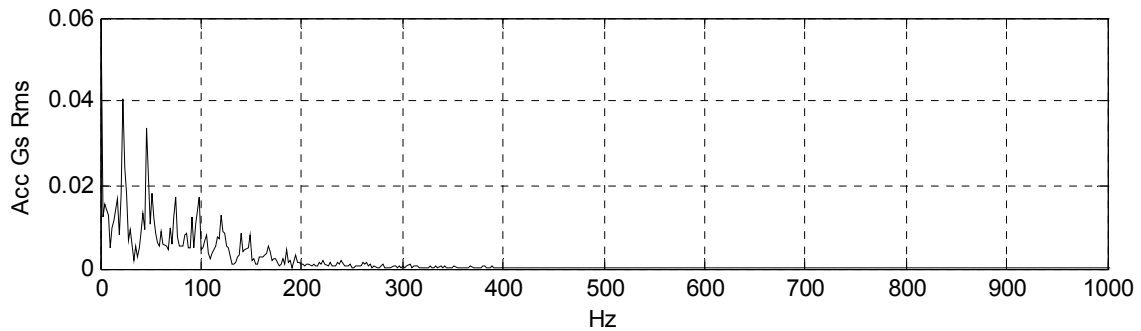
Σχήμα 2-22: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{\text{BPFO}}, 10x_{\text{BPFO}}]$: (θ) Μεγιστοποίηση Δείκτη Εξομάλυνσης (Smoothness Index), (ι) Μεγιστοποίηση Δείκτη Ενέργειας Αιχμών (Peak Energy Index).



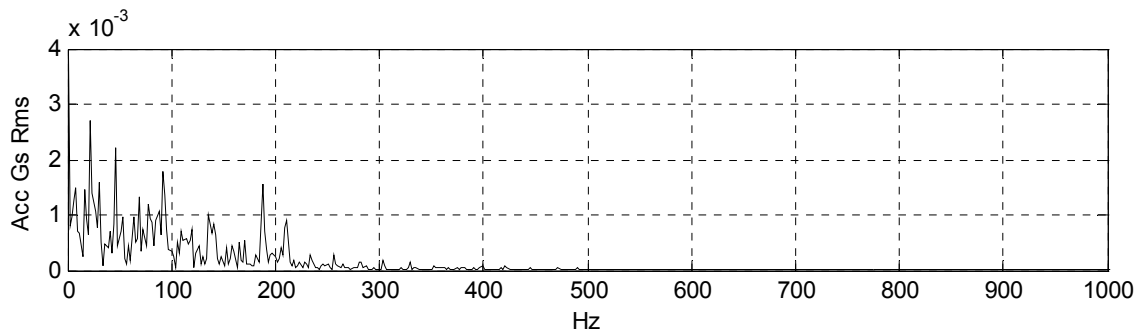
(α)



(β)

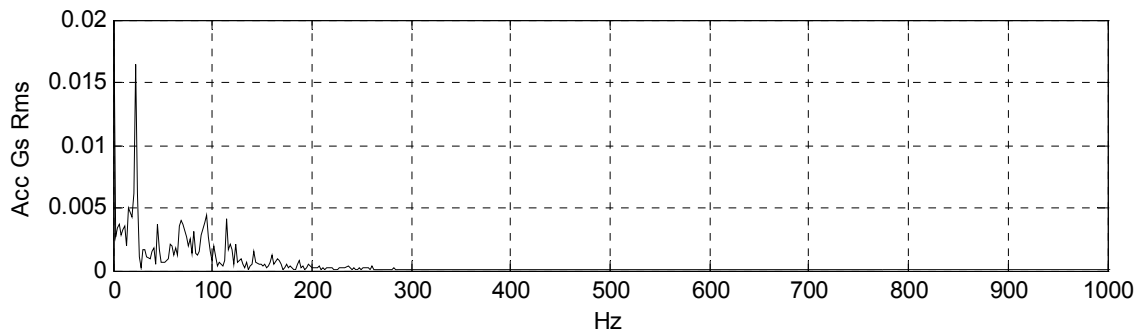


(γ)

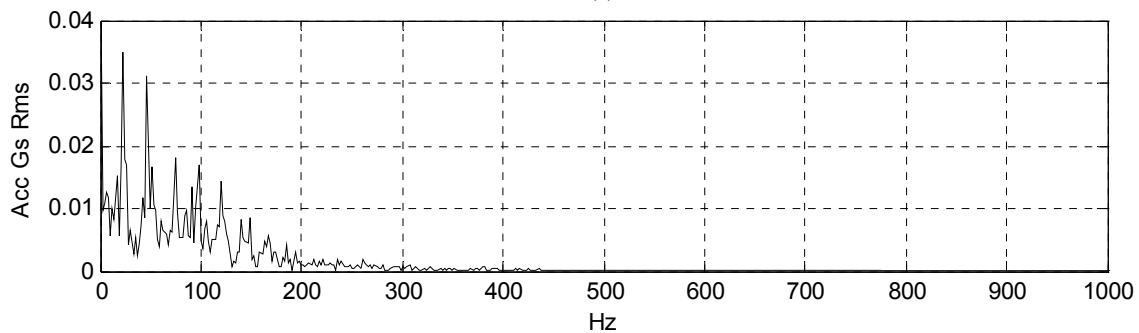


(δ)

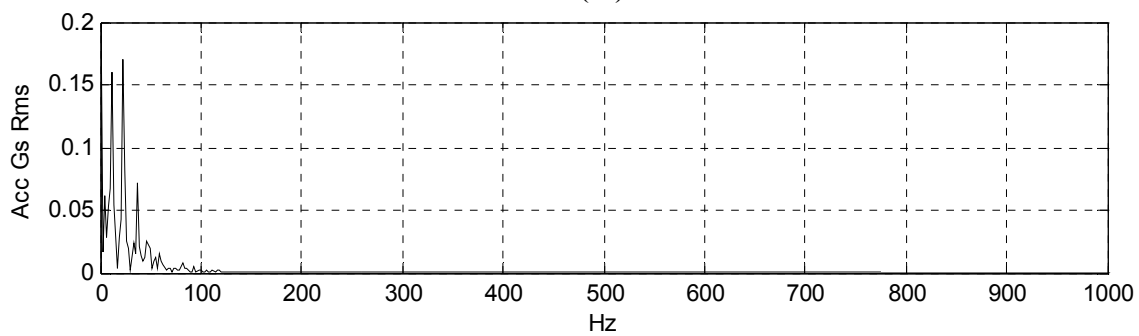
Σχήμα 2-23: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{\text{BPFO}}, 10x_{\text{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).



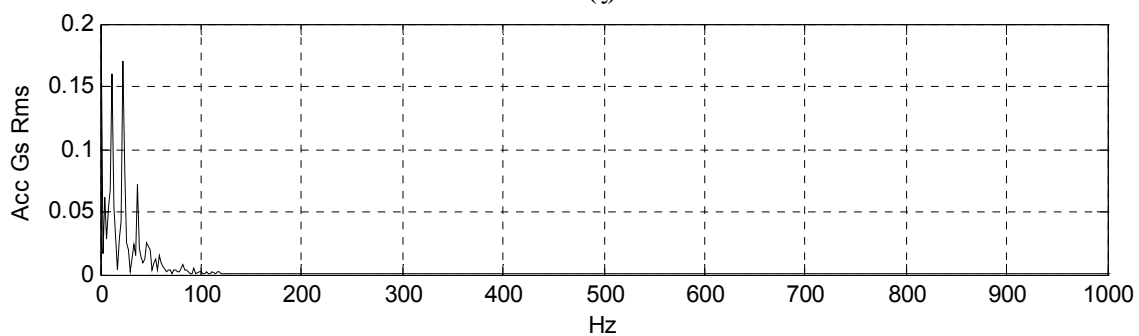
(ε)



(στ)

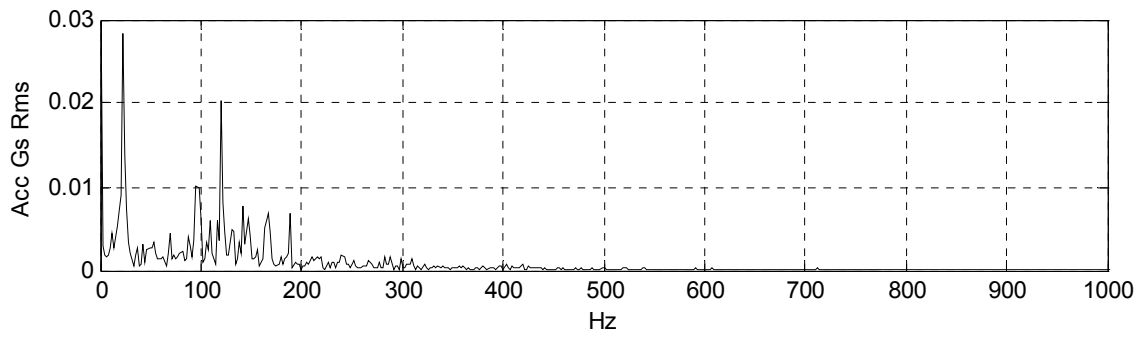


(ζ)

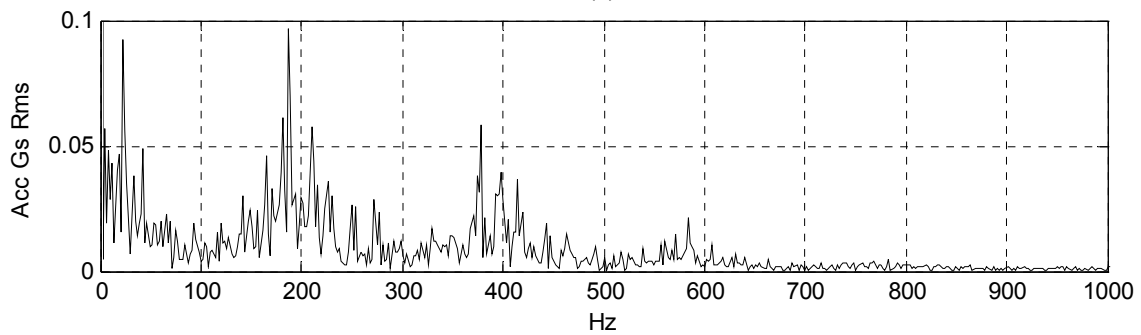


(η)

Σχήμα 2-23: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (ε) Μεγιστοποίηση Δείκτη Σχήματος (Shape Factor), (στ) Μεγιστοποίηση Κρουστικού Δείκτη (Impulse Factor), (ζ) Μεγιστοποίηση Πλήθους n_{th} , (η) Συνδυασμός Μεγιστοποίησης Συντελεστής Μεγέθυνσης και Πλήθους (συνεχίζεται).

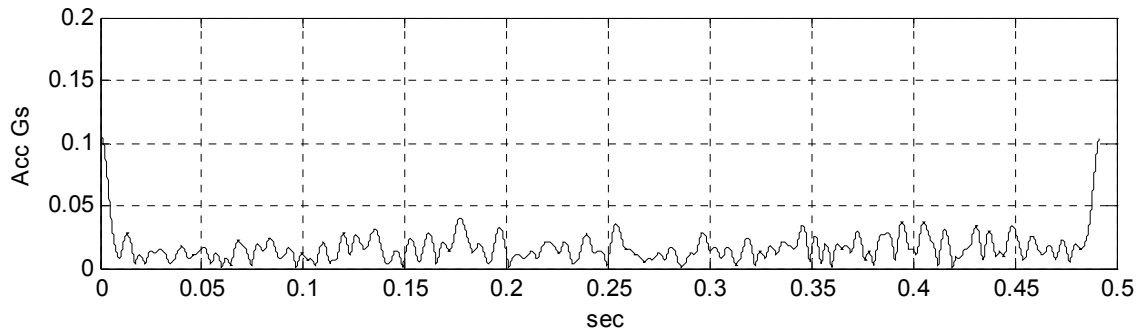


(θ)

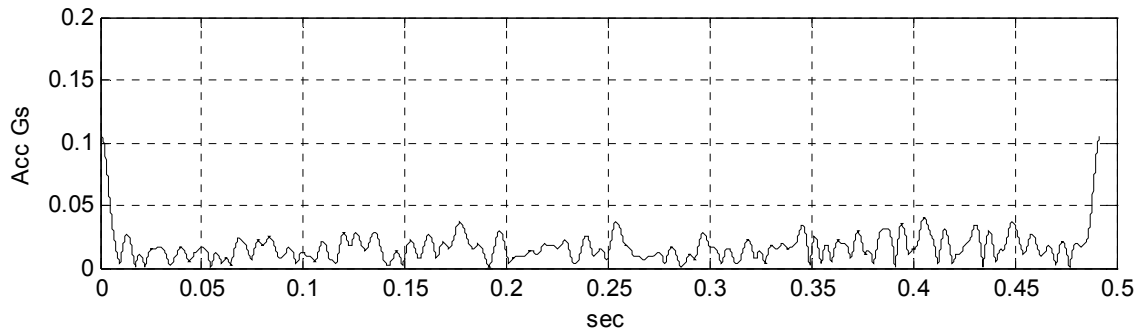


(ι)

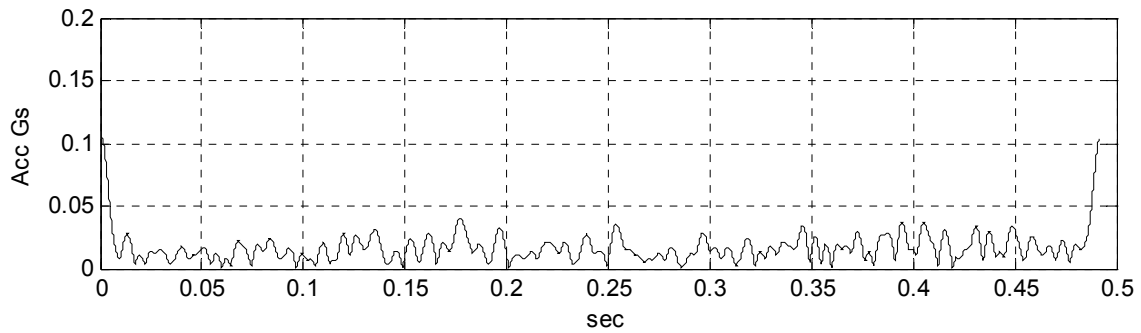
Σχήμα 2-23: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (θ) Μεγιστοποίηση Δείκτη Εξομάλυνσης (Smoothness Index), (ι) Μεγιστοποίηση Δείκτη Ενέργειας Αιχμών (Peak Energy Index).



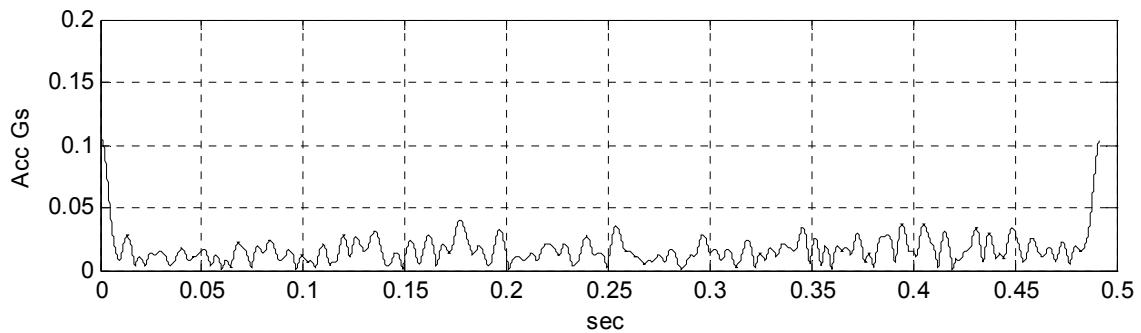
(α)



(β)

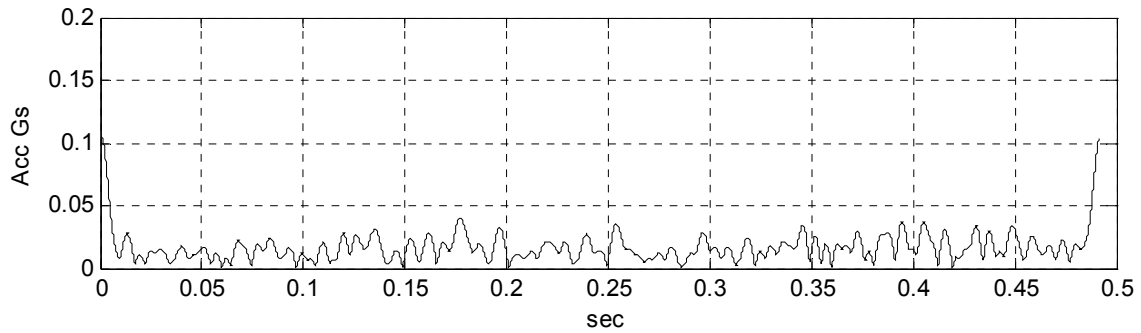


(γ)

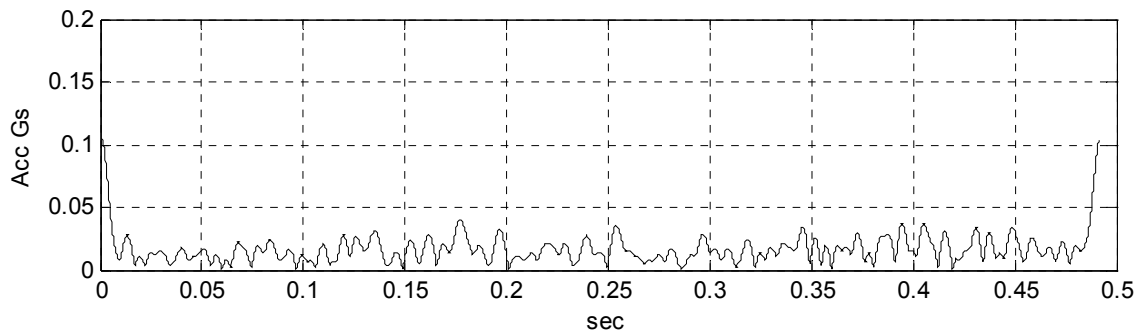


(δ)

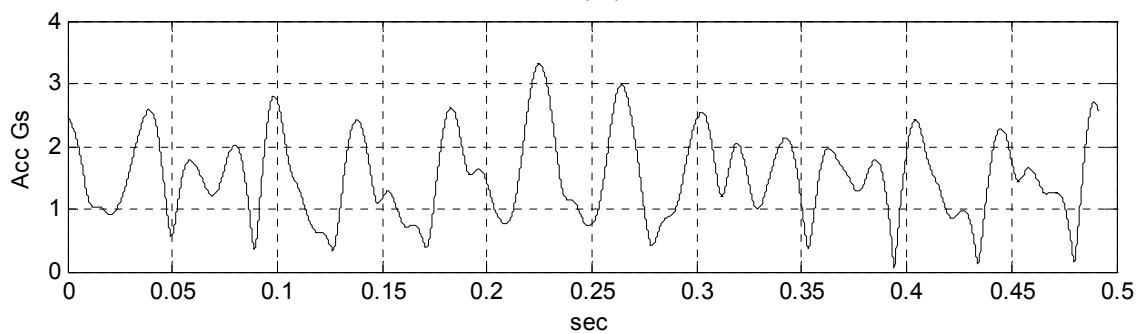
Σχήμα 2-24: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 2 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).



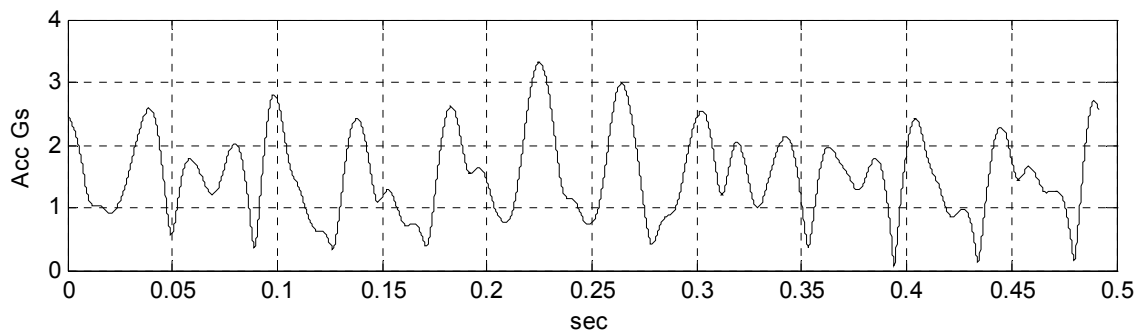
(ε)



(στ)

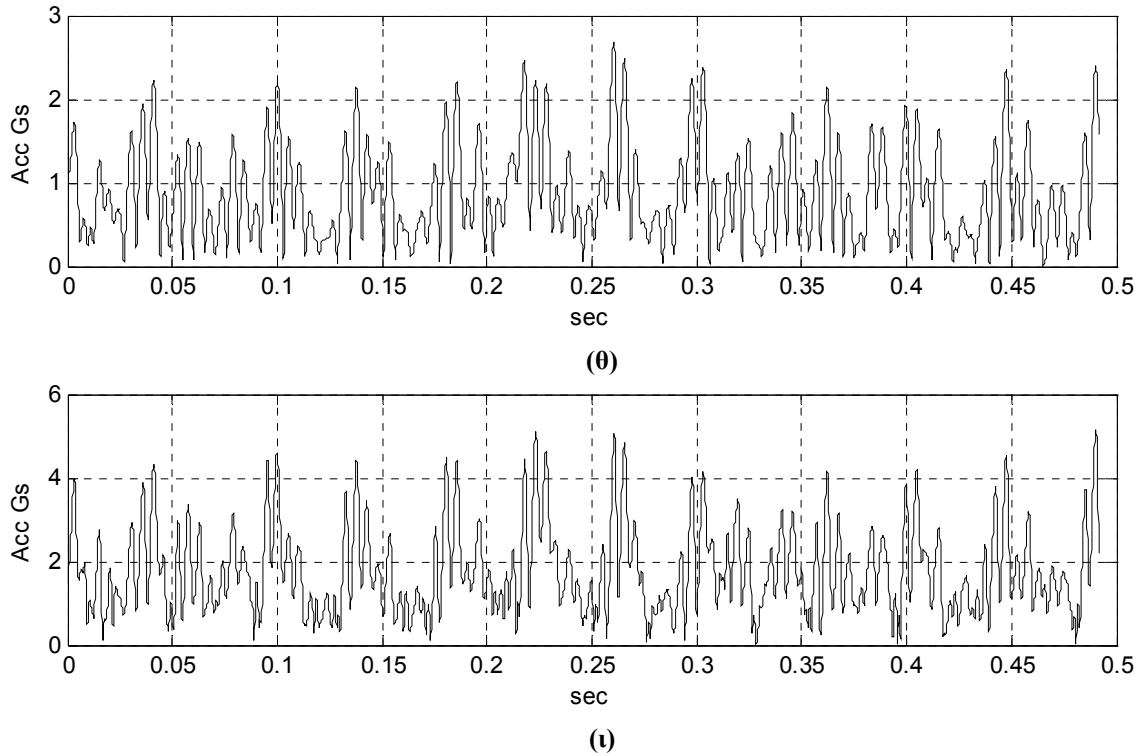


(ζ)

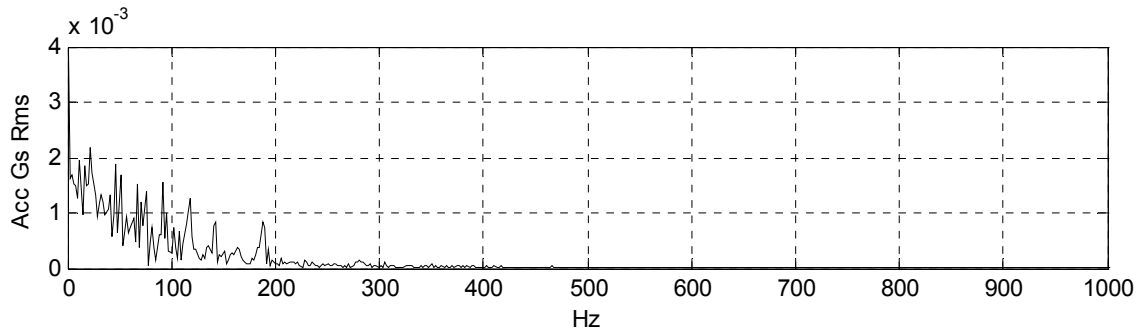


(η)

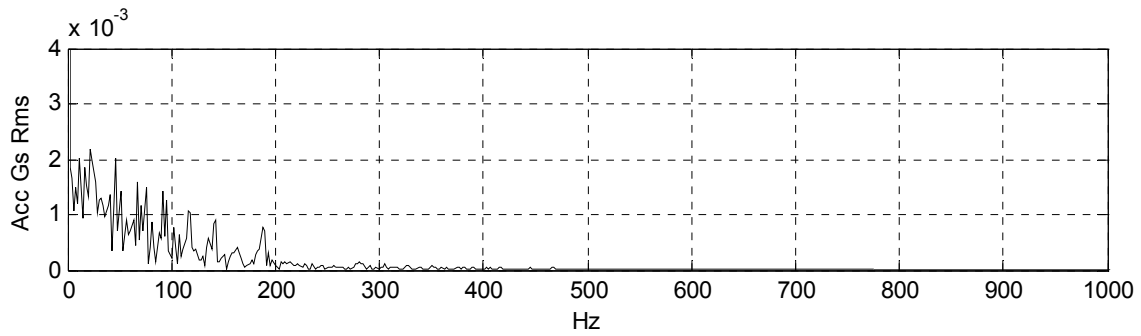
Σχήμα 2-24: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 2 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPF0}}, 10x_{f_{BPF0}}]$: (ε) Μεγιστοποίηση Δείκτη Σχήματος (Shape Factor), (στ) Μεγιστοποίηση Κρουστικού Δείκτη (Impulse Factor), (ζ) Μεγιστοποίηση Πλήθους n_{th} , (η) Συνδυασμός Μεγιστοποίησης Συντελεστής Μεγέθυνσης και Πλήθους (συνεχίζεται).



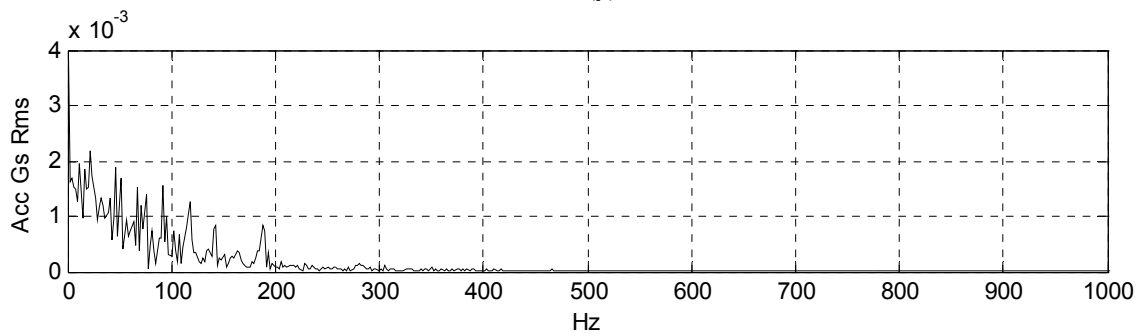
Σχήμα 2-24: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 2 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{BFFO}, 10x_{BFFO}]$: (θ) Μεγιστοποίηση Δείκτη Εξομάλυνσης (Smoothness Index), (ι) Μεγιστοποίηση Δείκτη Ενέργειας Αιχμών (Peak Energy Index).



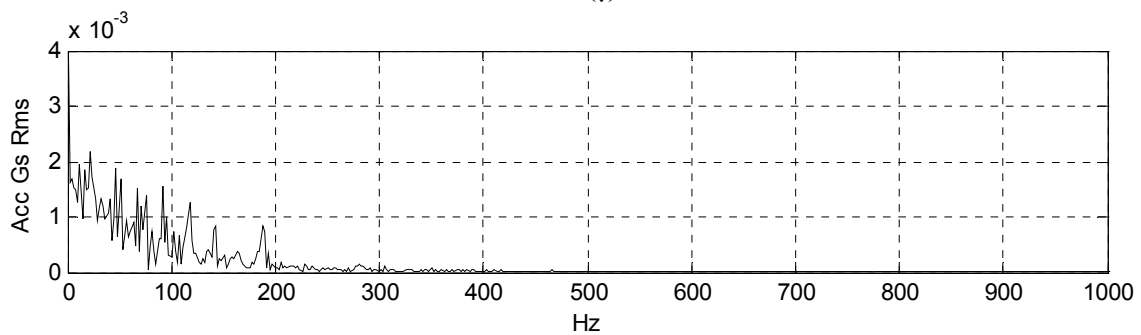
(α)



(β)

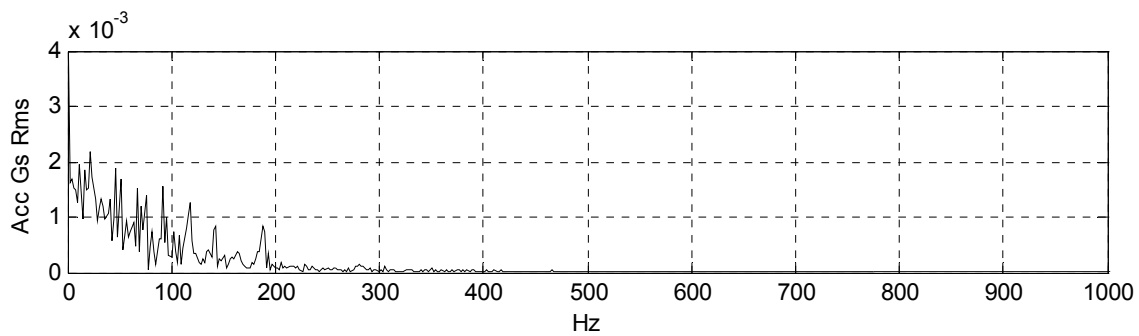


(γ)

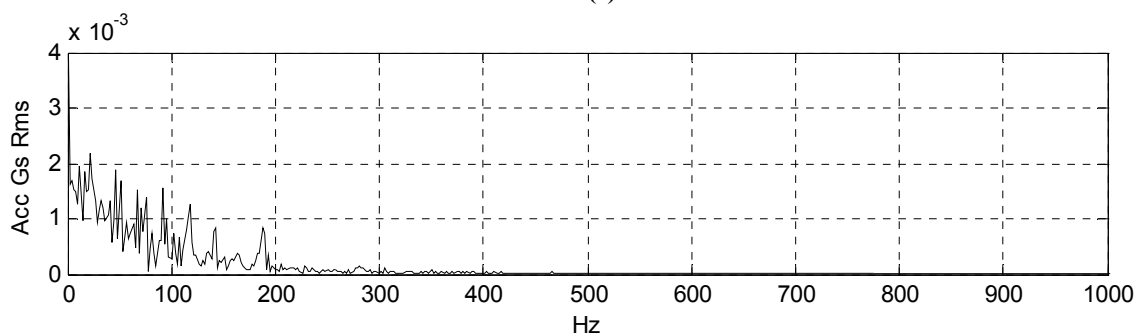


(δ)

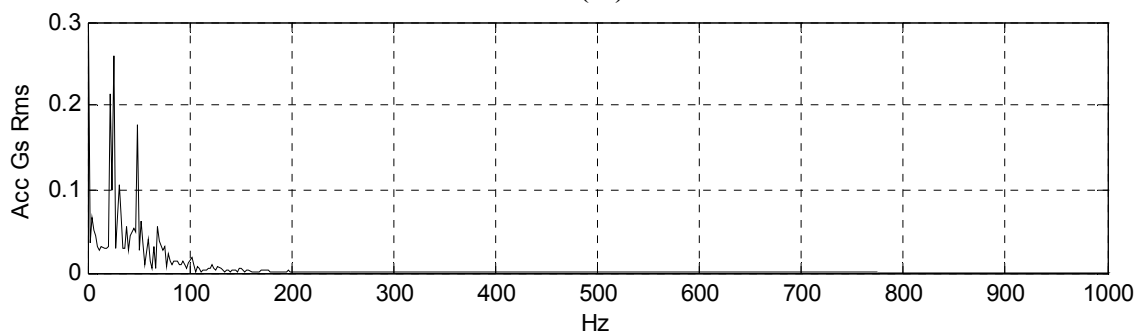
Σχήμα 2-25: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 2 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).



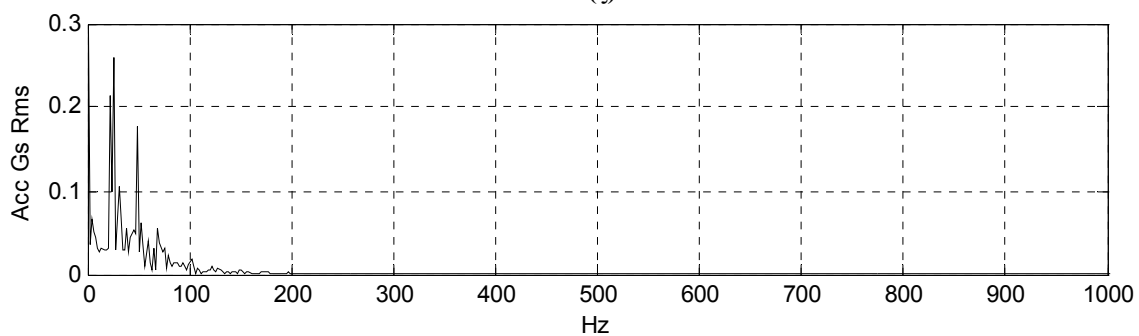
(ε)



(στ)

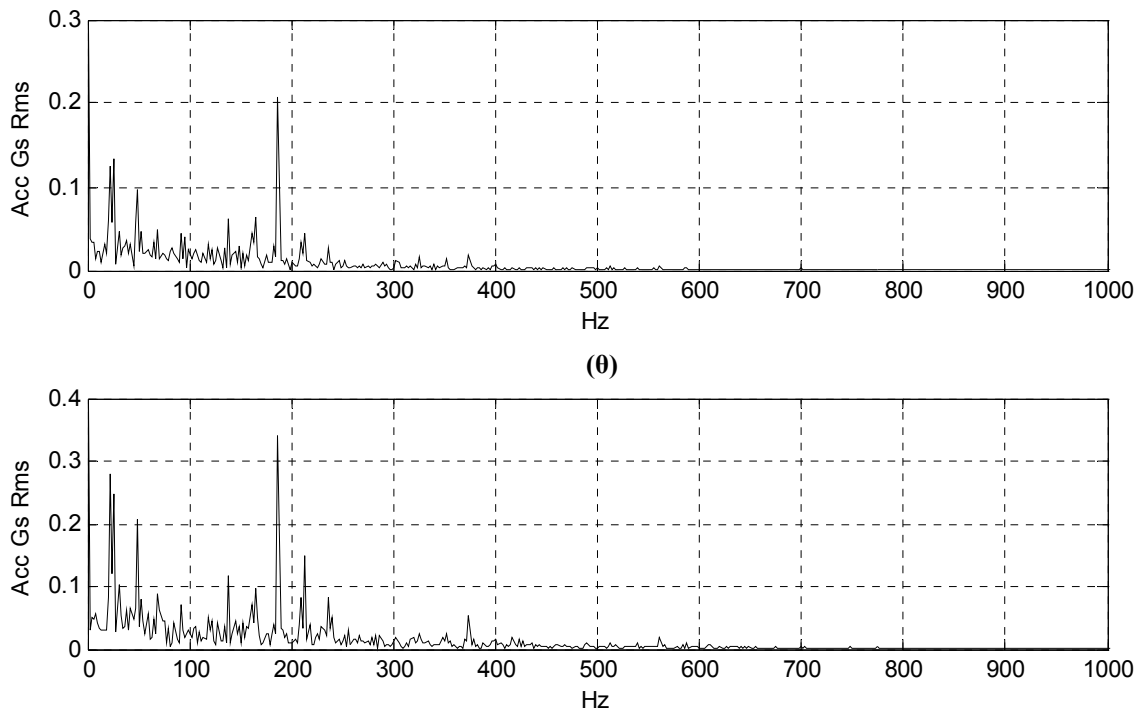


(ζ)

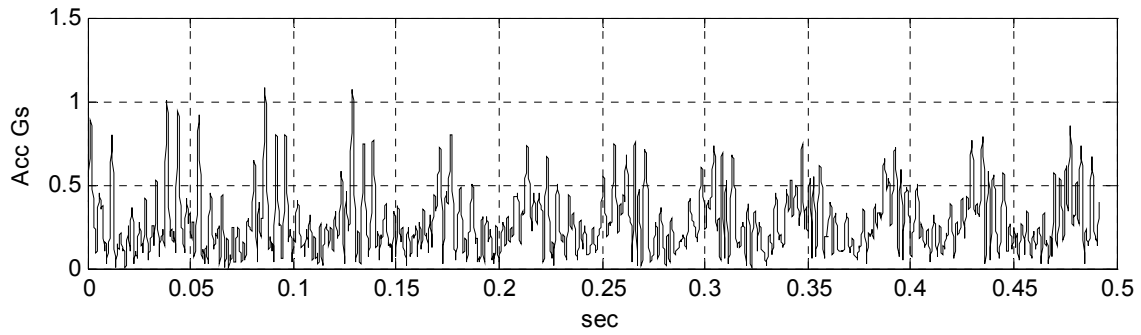


(η)

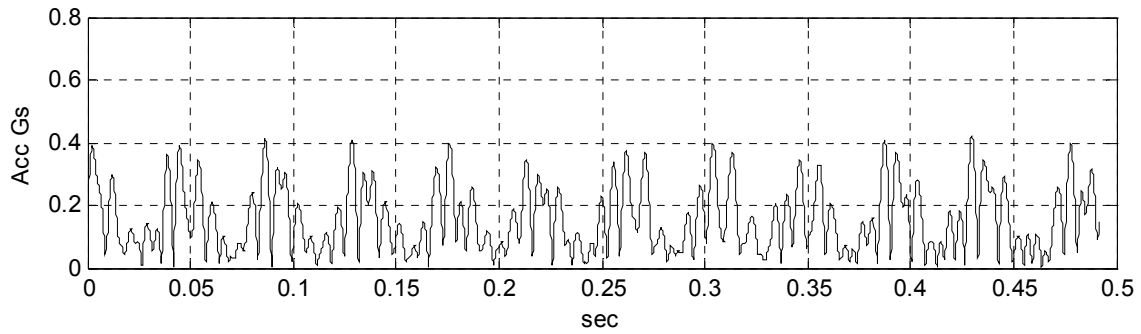
Σχήμα 2-25: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (ε) Μεγιστοποίηση Δείκτη Σχήματος (Shape Factor), (στ) Μεγιστοποίηση Κρουστικού Δείκτη (Impulse Factor), (ζ) Μεγιστοποίηση Πλήθους n_{th} , (η) Συνδυασμός Μεγιστοποίησης Συντελεστής Μεγέθυνσης και Πλήθους (συνεχίζεται).



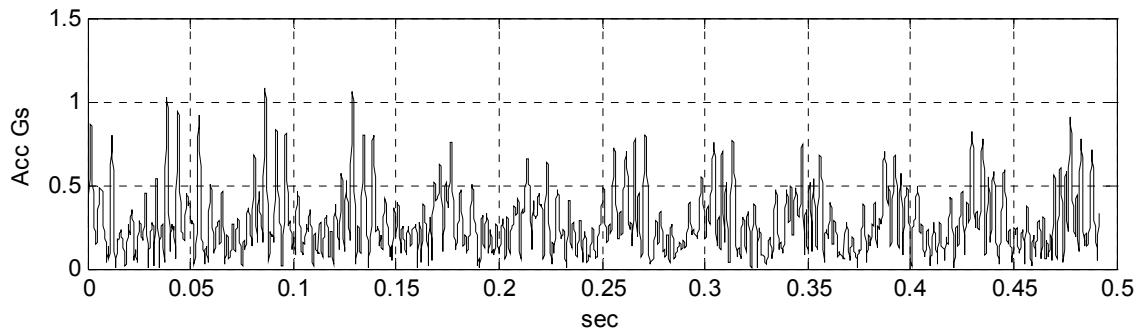
Σχήμα 2-25: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (θ) Μεγιστοποίηση Δείκτη Εξομάλυνσης (Smoothness Index), (ι) Μεγιστοποίηση Δείκτη Ενέργειας Αιχμών (Peak Energy Index).



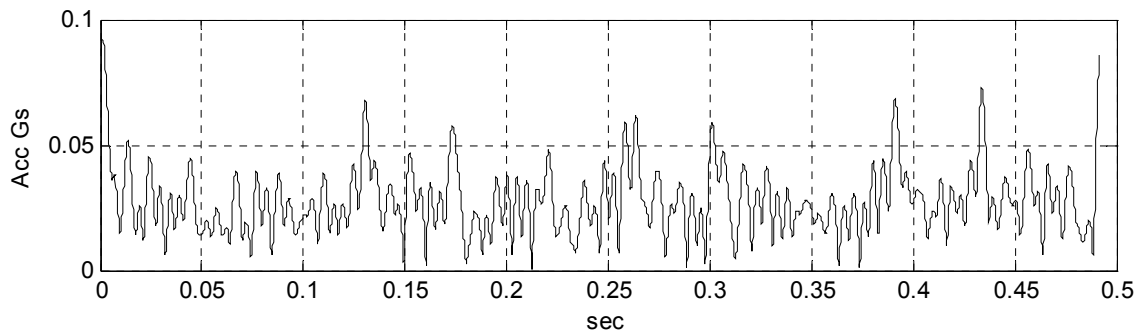
(α)



(β)

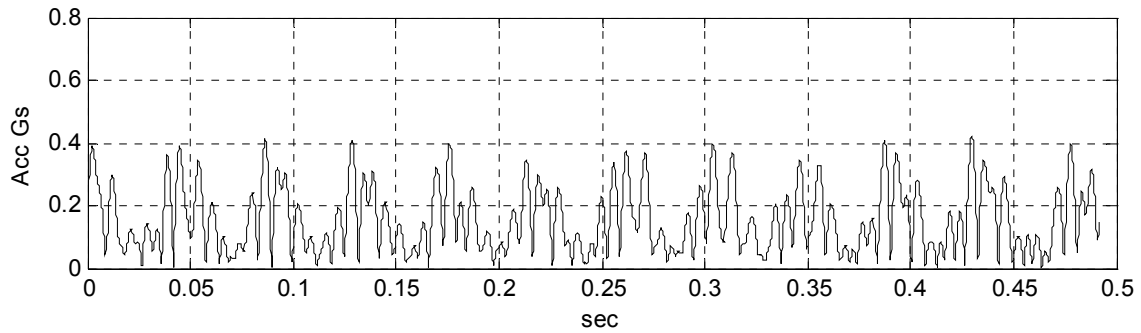


(γ)

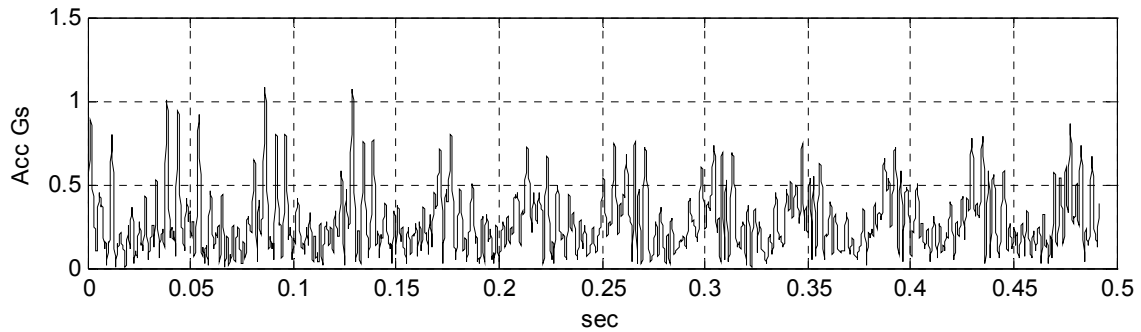


(δ)

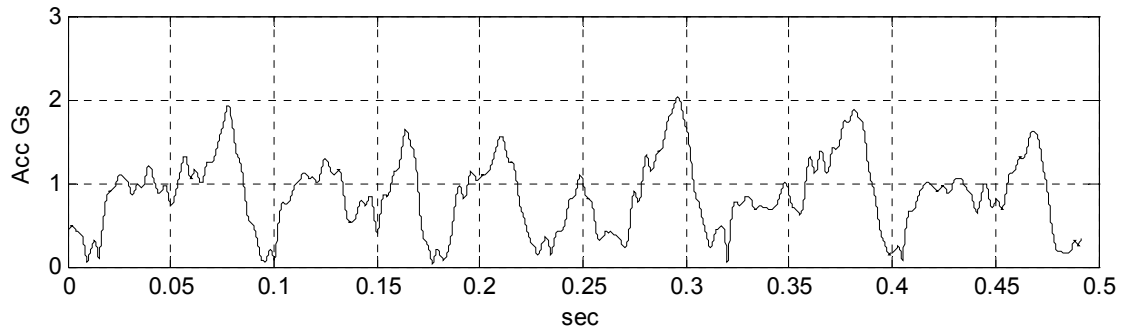
Σχήμα 2-26: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[4x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).



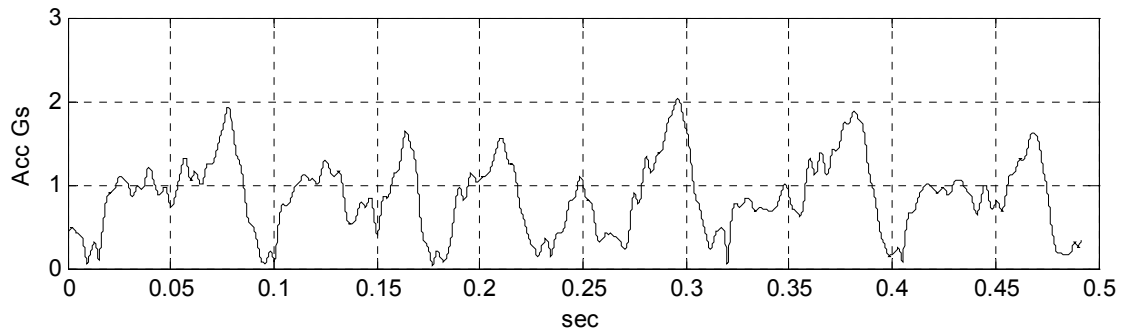
(ε)



(στ)

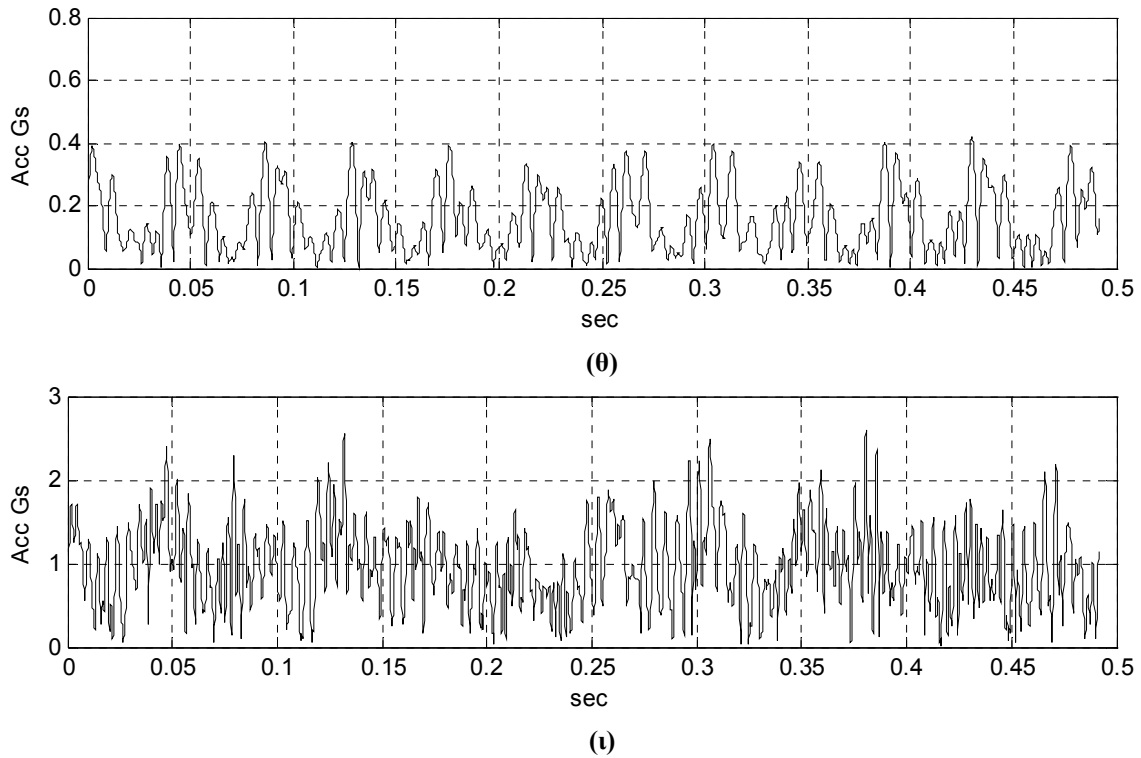


(ζ)

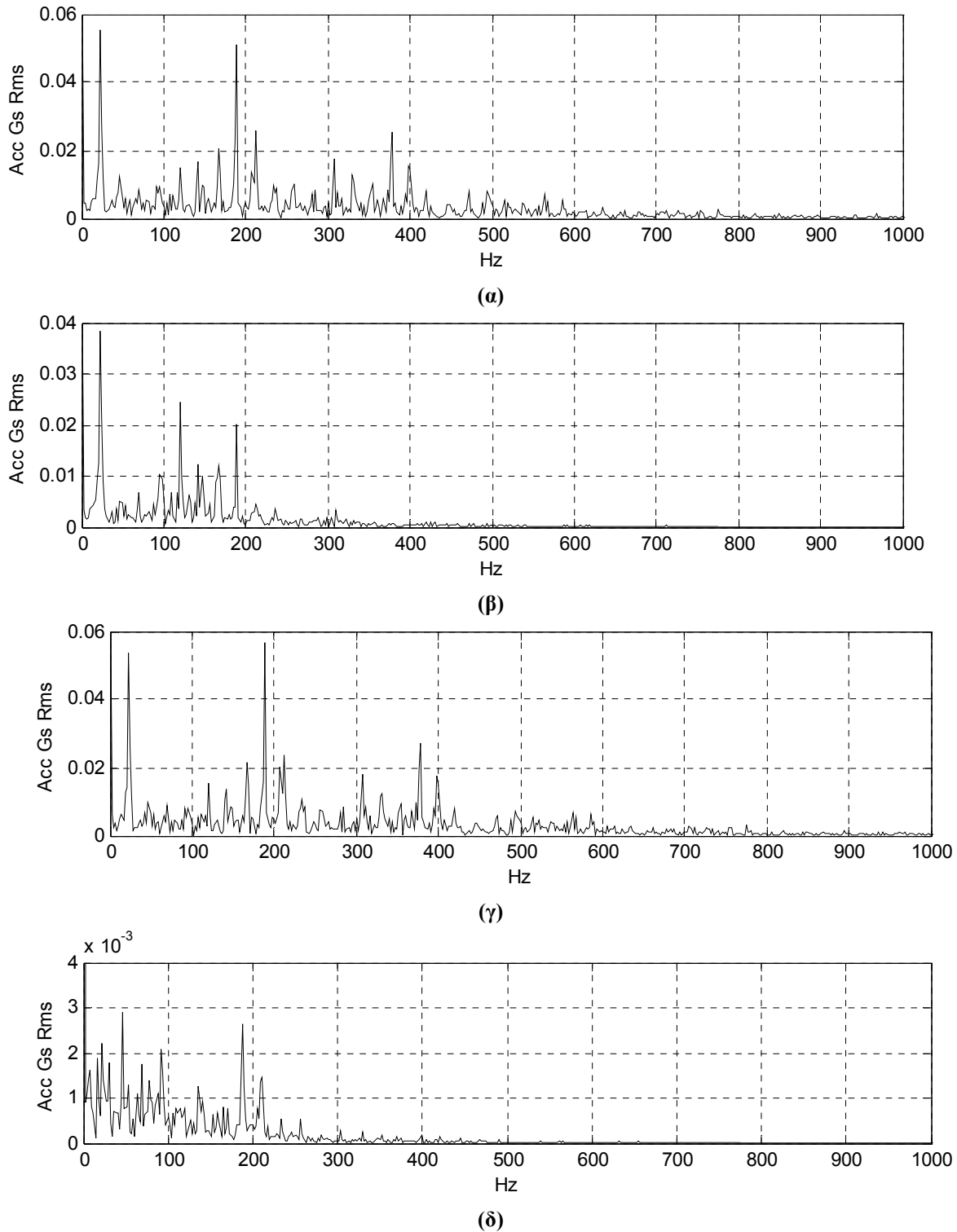


(η)

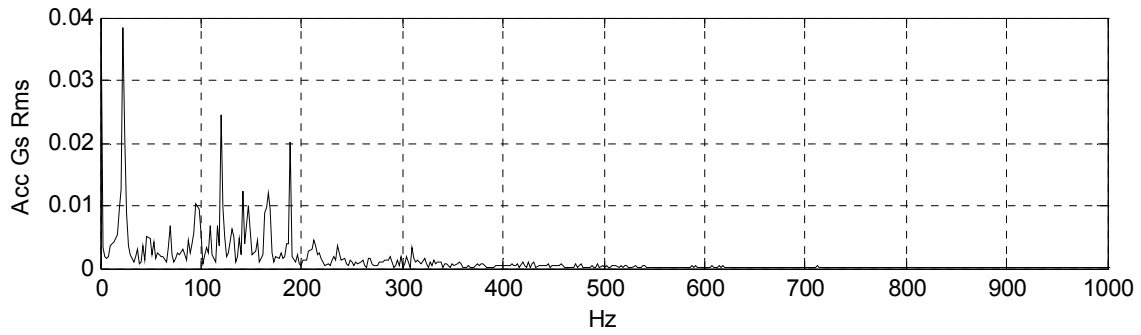
Σχήμα 2-26: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[4x_{f_{BPF0}}, 10x_{f_{BPF0}}]$: (ε) Μεγιστοποίηση Δείκτη Σχήματος (Shape Factor), (στ) Μεγιστοποίηση Κρουστικού Δείκτη (Impulse Factor), (ζ) Μεγιστοποίηση Πλήθους n_{th} , (η) Συνδυασμός Μεγιστοποίησης Συντελεστής Μεγέθυνσης και Πλήθους (συνεχίζεται).



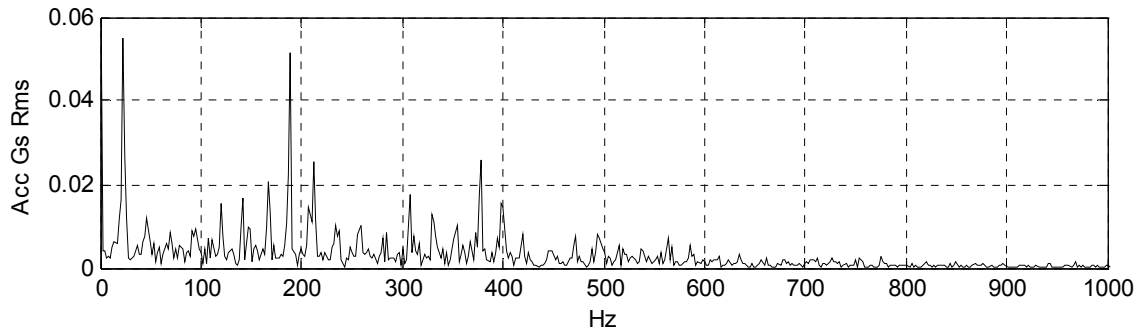
Σχήμα 2-26: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[4x_{f_{BFFO}}, 10x_{f_{BFFO}}]$: (θ) Μεγιστοποίηση Δείκτη Εξομάλυνσης (Smoothness Index), (ι) Μεγιστοποίηση Δείκτη Ενέργειας Αιχμών (Peak Energy Index).



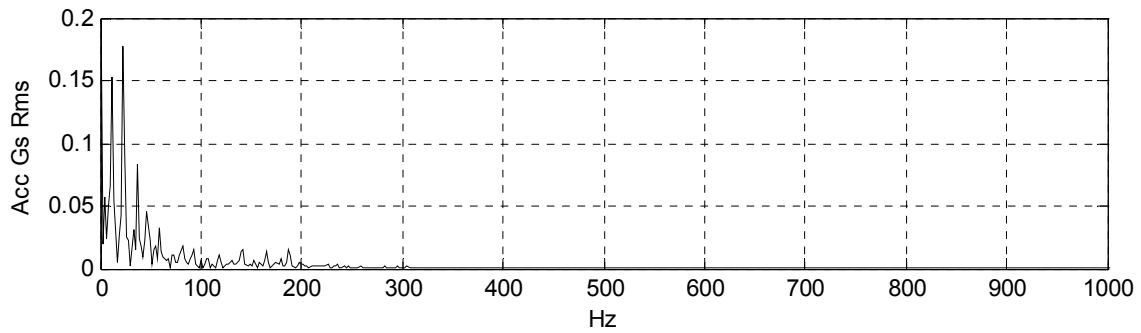
Σχήμα 2-27: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[4x_{BPFO}, 10x_{BPFO}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).



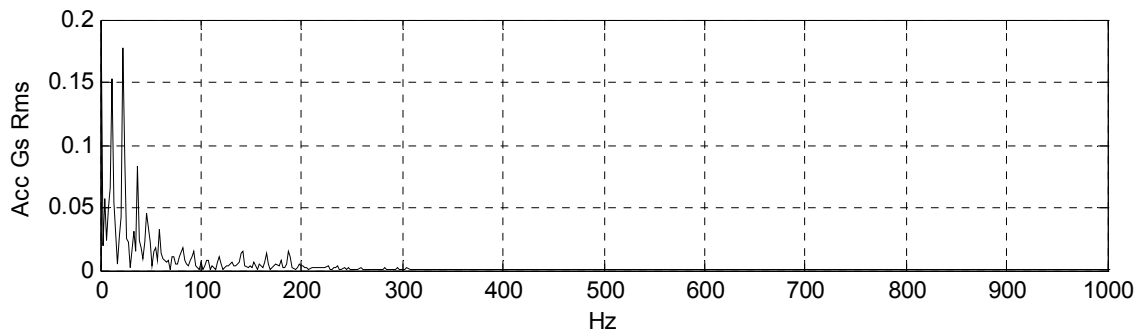
(ε)



(στ)

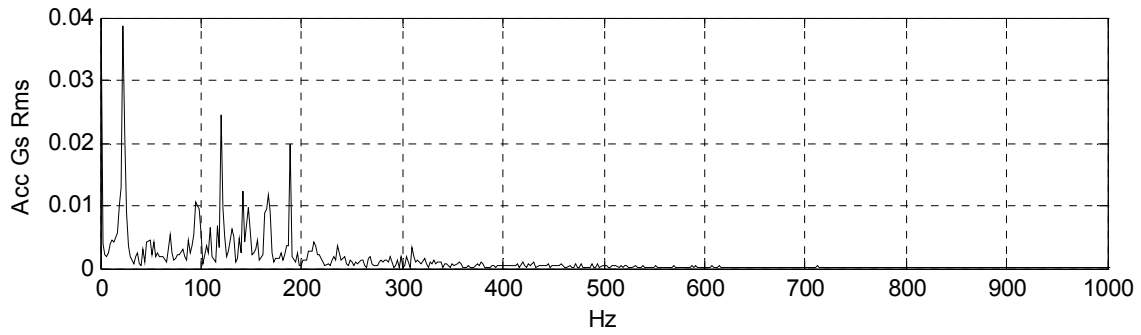


(ζ)

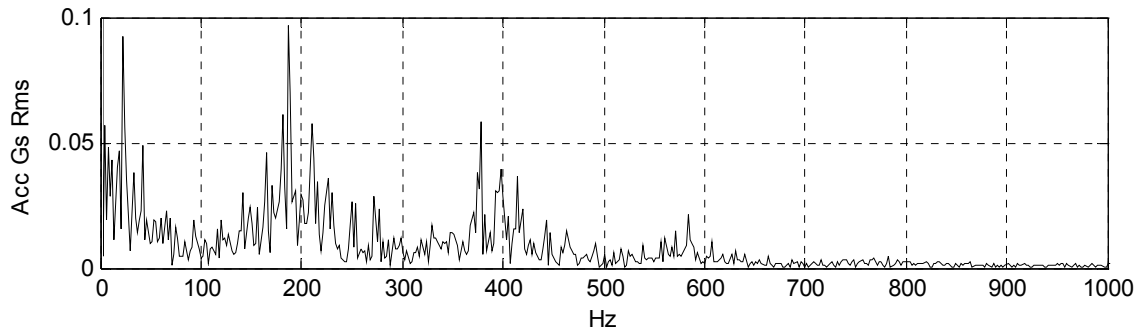


(η)

Σχήμα 2-27: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[4x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (ε) Μεγιστοποίηση Δείκτη Σχήματος (Shape Factor), (στ) Μεγιστοποίηση Κρουστικού Δείκτη (Impulse Factor), (ζ) Μεγιστοποίηση Πλήθους n_{th} , (η) Συνδυασμός Μεγιστοποίησης Συντελεστής Μεγέθυνσης και Πλήθους (συνεχίζεται).



(θ)



(ι)

Σχήμα 2-27: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[4x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (θ) Μεγιστοποίηση Δείκτη Εξομάλυνσης (Smoothness Index), (ι) Μεγιστοποίηση Δείκτη Ενέργειας Αιχμών (Peak Energy Index).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 **Equation Section (Next)**

Μορφολογική Επεξεργασία Δυναμικής Απόκρισης Κατασκευών

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται μια εναλλακτική προσέγγιση για εντοπισμό ρωγμών σε κατασκευές. Ως πρώτο βήμα, η μέθοδος Κανονικής Ορθογώνιας Αποσύνθεσης (Proper Orthogonal Decomposition - POD) χρησιμοποιείται, με σκοπό να αποκτηθεί ένας αριθμός των Κανονικών Ορθογώνιων Μορφών (Proper Orthogonal Modes - POMs). Η Κανονική Ορθογώνια Αποσύνθεση, είναι στενά συνδεδεμένη με την Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (Principal Component Analysis) και αποτελεί μια ισχυρή και κομψή μέθοδο ανάλυσης δεδομένων που αποσκοπεί στην απόκτηση χαμηλών διαστάσεων προσεγγιστικών περιγραφών υψηλών διαστάσεων μη γραμμικών διαδικασιών και στον περιορισμό των επιδράσεων του θορύβου [Lumley 1967], [Azeez and Vakakis 1997], [Lenaerts et al. 2001].

Έπειτα, εναλλακτικά σε άλλες προσεγγίσεις, η μορφολογική επεξεργασία (morphological processing) προτείνεται στο κεφάλαιο αυτό για την ανάλυση του σχήματος των εξαγόμενων POMs. Η βασική αρχή της μορφολογικής επεξεργασίας είναι η μετατροπή του σχήματος ενός αντικειμένου, που ισοδύναμα θεωρείται ως ένα σύνολο, μέσω του μετασχηματισμού του μέσω της αλληλεπίδρασης του με ένα άλλο αντικείμενο, που αποκαλείται δομικό στοιχείο. Χρησιμοποιώντας κατάλληλη μορφολογική επεξεργασία, η θέση της ρωγμής μπορεί να εκτιμηθεί απομονώνοντας την τοπική ξαφνική επίδραση της ρωγμής στην χωρική μεταβολή του κάθε POM. Η προτεινόμενη προσέγγιση εφαρμόζεται σε απλές κατασκευές δοκούς με διαφορετικές οριακές συνθήκες (πρόβολος, αμφιέριστη δοκός) και με ρωγμές σε ποικίλες θέσεις και με ποικίλα σχετικά βάθη.

3.2 Αποσύνθεση Ορθοκανονικών Προβολών (Proper Orthogonal Decomposition - POD)

Η Κανονική Ορθογώνια Αποσύνθεση (Proper Orthogonal Decomposition - POD) εφαρμόστηκε πρώτα σε προβλήματα τύρβης σε ρευστά από τον Lumley [Lumley 1967]. Αναγνωρίζει ένα χρήσιμο σύνολο συναρτήσεων βάσης και την διάσταση του υποχώρου που είναι απαραίτητος για να επιτευχθεί ικανοποιητική προσέγγιση του συστήματος. Έχει δειχθεί [Feeny 1997] ότι η εφαρμογή της μεθόδου POD σε μετρούμενες μετατοπίσεις μιας διακριτής κατασκευής με γνωστό μητρώο μάζας μπορεί να οδηγήσει στην εκτίμηση των κανονικών

μορφών (ιδιομορφών). Η POD διευκολύνει επίσης την ευκρίνεια των μερικών διαφορικών εξισώσεων μέσω της προβολής τους σε ένα χαμηλότερης τάξης μοντέλο [Azeez and Vakakis 1997] και για το λόγο αυτό έχει εφαρμοστεί για την μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς συστημάτων που παρουσιάζουν κρουστικά χαρακτηριστικά.

3.2.1 Μαθηματική Διατύπωση της Αποσύνθεσης Ορθοκανονικών Προβολών

Τα POMS έχει αποδειχθεί ότι είναι οι ιδιοσυναρτήσεις του χωρικού τανυστή συσχέτισης. Οι ορισμοί και η διατύπωση που παρουσιάζεται εδώ ακολουθεί τους ορισμούς και την διατύπωση του [Lenaerts et al. 2001]. Θεωρείται ως $u(x,t)$ ένα τυχαίο πεδίο σε κάποιον τομέα Ω . καθώς η μέθοδος POD απαιτεί μόνο σήματα με μηδενική μέση τιμή, είναι απαραίτητος ο ορισμός της μεταβλητής $v(x,t)$ που ορίζεται από την αφαίρεση της μέσης τιμής $U(x) = \langle u \rangle$ από την $v(x,t)$:

$$u(x,t) = U(x) + v(x,t) \quad (3.1)$$

Τα πεδία αυτά δειγματοληπτούνται με έναν πεπερασμένο αριθμό σημείων στο χρόνο. Έπειτα σε μια δεδομένη στιγμή t_n το σύστημα επιδεικνύει ένα στιγμιότυπο $v_n(x)$, που είναι μια συνεχής συνάρτηση του Ω . Σκοπός της POD είναι η ανεύρεση της πιο αντιπροσωπευτικής δομής $\phi(x)$ του συνόλου N στιγμιότυπων. Αυτό επιτυγχάνεται ελαχιστοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση λ :

$$\text{Ελαχιστοποίηση} \left\{ \lambda = \sum_{n=1}^N (\phi(x) - v_n(x))^2 \right\}, \quad \forall x \in \Omega. \quad (3.2)$$

Η εξίσωση (3.2) υποδηλώνει ότι το άθροισμα των διαφορών μεταξύ $v_n(x)$ και $\phi(x)$ υψωμένων στο τετράγωνο θα έπρεπε να ελαχιστοποιηθεί. Ανάλογα μπορεί να γραφεί με όρους ενός προβλήματος μεγιστοποίησης:

$$\text{Μεγιστοποίηση} \left\{ \lambda = \frac{(1/N) \sum_{n=1}^N \left(\int_{\Omega} \phi(x) v_n(x) d\Omega \right)^2}{\int_{\Omega} \phi(x) \phi(x) d\Omega} \right\}, \quad \forall x \in \Omega. \quad (3.3)$$

Για να καταστεί ο υπολογισμός μοναδικός, η παρακάτω συνθήκη ορθοκανονικότητας πρέπει να επιβληθεί:

$$\int_{\Omega} \phi(x)^2 dx = 1 \quad (3.4)$$

Χρησιμοποιώντας τους παρακάτω συμβολισμούς:

$(f, g) \equiv \int_{\Omega} f(x)g(x) d\Omega$ το εσωτερικό γινόμενο της συνάρτησης f και της συνάρτησης g

$\langle v_n \rangle \equiv \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n(x)$ η μέση τιμή των στιγμιότυπων

Εξάγεται ότι ο συνολικός μέσος όρος των εσωτερικών γινομένων μεταξύ των $v_n(x)$ και $\phi(x)$ πρέπει να μεγιστοποιηθεί:

$$\text{Μεγιστοποίηση} \left\{ \lambda = \frac{\langle (\phi, v_n)^2 \rangle}{(\phi, \phi)} \right\}, \quad \forall x \in \Omega. \quad (3.5)$$

Ο αριθμητής της παραπάνω εξίσωσης μπορεί να επεκταθεί:

$$\begin{aligned} \langle (\phi, v_n)^2 \rangle &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\{ \int_{\Omega} \phi(x) v_n(x) dx \int_{\Omega} \phi(x') v_n(x') dx' \right\} \\ &= \int_{\Omega} \left\{ \int_{\Omega} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n(x) v_n(x') \right) \phi(x) dx \right\} \phi(x') dx' \end{aligned} \quad (3.6)$$

Η δύο σημείων συνάρτηση συσχέτισης K ορίζεται ως:

$$K(x, x') = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n(x) v_n(x') \quad (3.7)$$

Κατά συνέπεια, η εξίσωση (3.6) γίνεται:

$$\langle (\phi, v_n)^2 \rangle = \int_{\Omega} \left\{ \int_{\Omega} (K(x, x')) \phi(x) dx \right\} \phi(x') dx' \quad (3.8)$$

Εξετάζοντας τις εξισώσεις (3.8) και (3.3), το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να περιοριστεί στο παρακάτω ολοκληρωματικό πρόβλημα ιδιοτιμών (integral eigenvalue problem):

$$\int_{\Omega} (K(x, x')) \phi(x') dx' = \lambda \phi(x) \quad (3.9)$$

Η εξίσωση (3.9) έχει έναν πεπερασμένο αριθμό ορθογώνιων λύσεων $\phi_i(x)$, που αποκαλούνται Κανονικές Ορθογώνιες Μορφές (Proper Orthogonal Modes) με αντίστοιχες πραγματικές και θετικές ιδιοτιμές λ_i . Η ιδιοτιμή με το μεγαλύτερο πλάτος αποτελεί την μέγιστη τιμή που επιτυγχάνεται από το πρόβλημα μεγιστοποίησης που περιγράφεται στην εξίσωση (3.5). Η δεύτερη μεγαλύτερη ιδιοτιμή είναι το μέγιστο του ίδιου προβλήματος περιορισμένο σε χώρο ορθογώνιο προς την πρώτη ιδιοσυχνότητα, και ούτω καθεξής. Για να καταστεί ο υπολογισμός μοναδικός, οι ιδιοσυναρτήσεις κανονικοποιούνται. Κατά συνέπεια τα POMs μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως μια βάση για την αποσύνθεση του πεδίου $v(x,t)$:

$$v(x,t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i(t) \phi_i(x) \quad (3.10)$$

Επιπλέον, εκ κατασκευής, τα POMs δεσμεύουν περισσότερη ενέργεια από κάθε άλλες μορφές (modes). Θα έπρεπε επίσης να σημειωθεί ότι οι χρονικά μεταβαλλόμενοι συντελεστές $\alpha_i(t)$ στην εξίσωση (3.10) είναι ασυσχέτιστοι [Azeez and Vakakis 1997].

Κατά συνέπεια, η μέθοδος POD μπορεί να θεωρηθεί ως μια διορθωγόνια αποσύνθεση εξαιτίας της χωροχρονικής συμμετρίας της αποσύνθεσης. Για μια ακριβής προσέγγιση του τανυστή (3.7) είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση μιας μεγάλης από άποψη χρόνου και υπολογιστικού κόστους προσομοίωση.

3.2.2 Διακριτή Διατύπωση Αποσύνθεσης Ορθοκανονικών Προβολών

Αν θεωρηθούν N γραμμικά στιγμιότυπα v_i μεγέθους M που αποκτούνται για παράδειγμα από μετρήσεις επιτάχυνσης σε M θέσεις, τότε ο $M \times M$ πίνακας συνδιακύμανσης C μπορεί να οριστεί ως:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} v_i v_i^T \quad (3.11)$$

Οι ιδιολύσεις του πίνακα συνδιακύμανσης (ϕ_k, λ_k) που ικανοποιούν τις:

$$C \phi_k = \lambda_k \phi_k, \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (3.12)$$

με:

$$\lambda_0 \geq \lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_{N-1} > 0 \quad (3.13)$$

χαρακτηρίζουν την Κανονική Ορθογόνια Αποσύνθεση. Κάθε ιδιοδιάνυσμα ϕ_k συνδέεται με μια ιδιοτιμή λ_k . Εάν οι ιδιοτιμές είναι κανονικοποιημένες, τότε παριστάνουν την σχετική ενέργεια που δεσμεύεται από το αντίστοιχο POM. Η μέθοδος αποσύνθεσης αυτή είναι η καλύτερη βάση από την άποψη της αποσυσχέτισης (de-correlation). Ο δυσάρεστος και γενικά επίπονος αυτός υπολογισμός των ιδιολύσεων της C ονομάζεται “Απευθείας Μέθοδος”.

Βέβαια, χάρη στην ιδιότητα της χωροχρονικής συμμετρίας, μια εναλλακτική μέθοδος που ονομάζεται “Μέθοδος των Στιγμιότυπων”, μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

3.2.3 Υπολογισμός της Ορθοκανονικής Αποσύνθεσης (Principal Orthogonal Decomposition) με χρήση της μεθόδου Αποσύνθεσης Μοναδικής Τιμής (Singular Value Decomposition)

Η πλήρης διορθογώνια αποσύνθεση των δεδομένων μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας την μέθοδο Αποσύνθεσης Μοναδικής Τιμής (Singular Value Decomposition). Ως $x_i(t)$ συμβολίζεται η απόκριση συναρτήσεως του χρόνου, όπου x είναι ένα διάνυσμα που περιλαμβάνει μετατόπιση, ταχύτητα ή επιτάχυνση σε M διακριτές θέσεις. Ο διακριτός πίνακας X σχηματίζεται:

$$X = \begin{bmatrix} x_1(t_1) & \cdots & x_1(t_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_M(t_1) & \cdots & x_M(t_N) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Συνεπώς, κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε μια χρονοσειρά σε μια θέση και κάθε στήλη αντιστοιχεί σε ένα στιγμιότυπο του συστήματος σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Η αποσύνθεση μοναδικής τιμής του μητρώου X μπορεί πλέον να γραφεί ως:

$$X = U\Sigma V^T \quad (3.15)$$

με το σύμβολο U να υποδηλώνει ένα ορθοκανονικό μητρώο (μεγέθους $M \times M$) των ιδιοδιανυσμάτων του XX^T και το σύμβολο V ένα ορθοκανονικό μητρώο (μεγέθους $N \times N$) των ιδιοδιανυσμάτων του $X^T X$. Το μέγεθος του μητρώου Σ είναι $M \times N$ όμως μόνο η κύρια διαγώνιος έχει μη μηδενικά στοιχεία που είναι οι μοναδικές τιμές του μητρώου X , ταξινομημένες με κατιούσα τάξη. Εάν το μητρώο X είναι ελλιπούς τάξης, δηλαδή κάποιες γραμμές (ή στήλες) μπορούν να παραχθούν με γραμμική υπέρθεση των υπολοίπων, κάποιες μοναδικές τιμές θα είναι μηδενικές. Η μέθοδος SVD έχει πολλές εφαρμογές, π.χ. στην εκτίμηση της τάξης ενός μητρώου, στο φιλτράρισμα του θορύβου μετρήσεων και ούτω καθεξής. Στην εργασία αυτή, ο σκοπός της μεθόδου SVD είναι ο υπολογισμός των POMs και των κανονικοποιημένων βασικών σχημάτων που περιλαμβάνονται στις χρονοσειρές απόκρισης.

3.3 Μορφολογική Επεξεργασία Σήματος

3.3.1 Εισαγωγή

Όπως υποδηλώνεται από το όνομα της, η Μορφολογική Επεξεργασία Σήματος επιχειρεί να εκτιμήσει ποσοτικά το σχήμα, το μέγεθος και άλλες ιδιότητες της γεωμετρικής δομής των σημάτων. Η μορφολογική επεξεργασία σήματος αρχικά εφαρμόστηκε στο πεδίο της Επεξεργασίας Εικόνας, ενώ στη συνέχεια επεκτάθηκε σε άλλα πεδία, όπως της Βιολογίας και

της Γεωλογίας. Το κυριότερο όμως πεδίο εφαρμογής της παραμένει η Ανάλυση Εικόνας, όπου η μορφολογική ανάλυση ξεκίνησε από τις εφαρμογές ασπρόμαυρων εικόνων και πλέον έχει φτάσει στις έγχρωμες. Από την εποχή της εμφάνισης της, παρουσιάζει ιδιαίτερη ανάπτυξη τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Η ανάπτυξη αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ευρεία ποικιλία εφαρμογών που η Μαθηματική Μορφολογία μπορεί να χειριστεί. Η Μορφολογική Επεξεργασία Σήματος περιλαμβάνει μια ευρεία συλλογή από θεωρητικές έννοιες, μαθηματικά εργαλεία επεξεργασίας σήματος, μη γραμμικούς τελεστές, μεθοδολογίες σχεδιασμού και συστήματα εφαρμογών που συνδέονται με τη μαθηματική μορφολογία.

Οι αρχές της Μαθηματικής Μορφολογίας βασίζονται στη Θεωρία Συνόλων και στην Στοχαστική Γεωμετρία. Οι παραδοσιακές μέθοδοι επεξεργασίας των γραμμικών συστημάτων καθώς και η ανάλυση Fourier έχουν περιορισμένη χρήση στην επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με τη γεωμετρία του σήματος, καθώς δεν αντιμετωπίζουν ευθέως το θέμα της ποσοτικοποίησης του σχήματος και του μεγέθους των σημάτων.

3.3.2 Βασικές Αρχές Μορφολογικής Ανάλυσης

Η Μαθηματική Μορφολογία (Mathematical Morphology - MM) παρουσιάστηκε πρώτα ως ένα εργαλείο επεξεργασίας εικόνας, βασιζόμενη στην Θεωρία Συνόλων [Serra 1982], [Maragos and Schafer 1987]. Καθώς το βασικό στοιχείο στην Μαθηματική Μορφολογία είναι το σύνολο, η Μαθηματική Μορφολογία χρησιμοποιεί μια σειρά από μη γραμμικούς μετασχηματισμούς επεξεργασίας που στηρίζονται στην Θεωρία Συνόλων, ξεκινώντας με δύο βασικές πράξεις, την πρόσθεση Minkowski και την αφαίρεση Minkowski. Βασιζόμενες πάνω στις δύο αυτές πράξεις, ένα αριθμός μορφολογικών τελεστών μπορούν να κατασκευαστούν. Η βασική αρχή της μορφολογικής επεξεργασίας είναι η χρήση αυτών των τελεστών ώστε να τροποποιηθεί το σχήμα ενός αντικειμένου, το οποίο αντιμετωπίζεται ως σύνολο, μέσω του μετασχηματισμού του με την αλληλεπίδρασή του με ένα δεύτερο αντικείμενο, που καλείται “Δομικό Στοιχείο” (“Structuring Element”). Το δομικό αυτό στοιχείο πρακτικά είναι συνεπτυγμένο και έχει ένα απλούστερο σχήμα συγκρινόμενο με το αρχικό αντικείμενο.

Η πρόσθεση Minkowski μεταξύ δύο συνόλων αριθμών A και B ορίζεται ως εξής:

$$A \oplus B = \{a + b, a \in A, b \in B\} = \bigcup_{b \in B} A_b \quad (3.16)$$

όπου το μαθηματικό σύμβολο \bigcup ορίζει την ένωση συνόλων και A_b είναι ένα σύνολο που προκύπτει από την μετακίνηση της αρχής του συνόλου A κατά διαστήματα που ορίζονται από τα στοιχεία b του συνόλου B.

Με βάση τον παραπάνω ορισμό η αφαίρεση Minkowski μπορεί να εκφρασθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$A \ominus B = (A^c \oplus B)^c = \bigcap_{b \in B} A_b \quad (3.17)$$

όπου A^C είναι το συμπλήρωμα του συνόλου A και το σύμβολο \cap υποδεικνύει τη τομή συνόλων. Έτσι, η αφαίρεση των δύο συνόλων A και B παράγει ένα σύνολο, το οποίο συνίσταται από τα κοινά στοιχεία των συνόλων A_b , τα οποία δημιουργούνται με μετακίνηση της αρχής του συνόλου A σε αποστάσεις που καθορίζονται από τα στοιχεία του συνόλου B .

Με βάση τους ορισμούς της πρόσθεσης και της αφαίρεσης συνόλων των σχέσεων (3.16) και (3.17), ορίζονται οι δύο βασικοί μορφολογικοί τελεστές, η Διαστολή (Dilation) και η Διάβρωση (Erosion), αντίστοιχα:

$$dil(A, B) = A \oplus B^r = \{x, B_x \cap A \neq \emptyset\} = \bigcup_{b \in B} A_{-b} \quad (3.18)$$

$$er(A, B) = A \ominus B^r = \{x, B_x \subseteq A\} = \bigcap_{b \in B} A_{-b} \quad (3.19)$$

όπου ο όρος B^r παριστάνει το κατοπτρικό σύνολο σε σχέση με την αρχή του συνόλου B .

Ένα παράδειγμα διαστολής και διάβρωσης απεικονίζεται στο Σχήμα 3-1. Τα σύνολα A και B λαμβάνουν δυαδικές τιμές (1 ή 0 \rightarrow ‘Μαύρο’ ή ‘Άσπρο’) και ορίζονται στο καρτεσιανό επίπεδο. Η διαστολή και η διάβρωση του συνόλου A από το σύνολο B καθορίζεται από τον τρόπο που το κατοπτρικό σύνολο B^r τέμνει το σύνολο A .

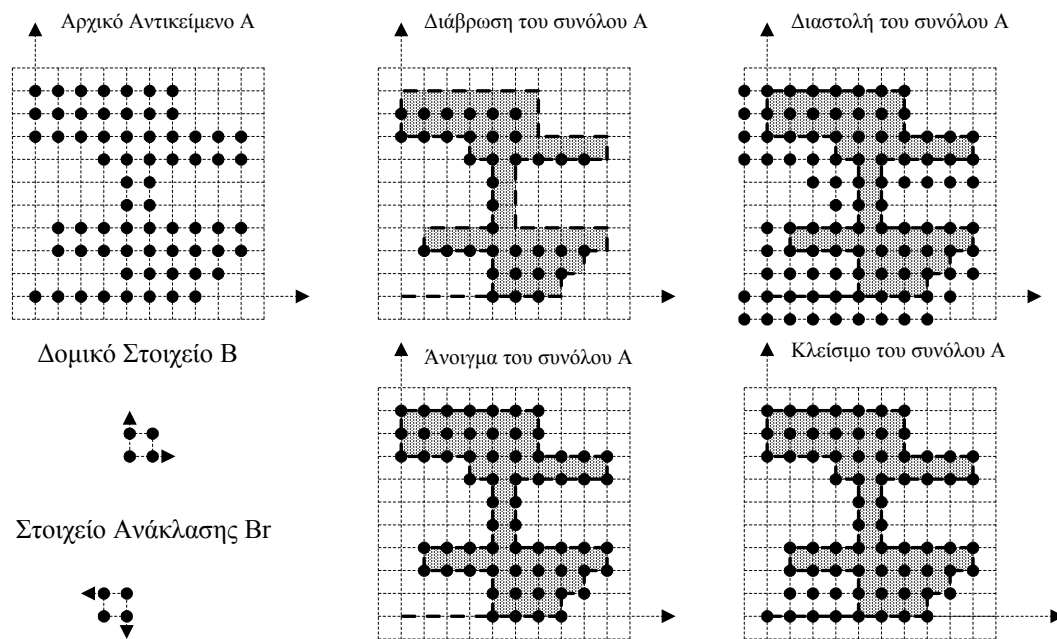
Με βάση τη Διαστολή και τη Διάβρωση ορίζονται δύο ακόμη βασικοί μορφολογικοί τελεστές: οι τελεστές του Κλεισίματος (Closing) και του Ανοίγματος (Opening).

$$cl(A, B) = A \bullet B = (A \oplus B^r) \ominus B \quad (3.20)$$

$$op(A, B) = A \circ B = (A \ominus B^r) \oplus B \quad (3.21)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (3.20), το Κλείσιμο ορίζεται ως η Διαστολή του συνόλου A από το σύνολο B συνοδευόμενη από αφαίρεση Minkowski του συνόλου B . Αντίστοιχα, το Ανοίγμα ορίζεται ως η διάβρωση του συνόλου A από το σύνολο B , συνοδευόμενη από πρόσθεση Minkowski του συνόλου B στο αποτέλεσμα.

Μια ενδιαφέρουσα ιδιότητα είναι ότι το σύνολο που προκύπτει από το Κλείσιμο περιλαμβάνει πάντα το αρχικό σύνολο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-1. Επίσης, το μορφολογικό Κλείσιμο καλύπτει τα κενά του αρχικού αντικειμένου, ενώ το μορφολογικό Ανοίγμα εξαλείφει λεπτά και αιχμηρά τμήματα του αρχικού αντικειμένου. Περαιτέρω εφαρμογή των μορφολογικών τελεστών με το ίδιο δομικό στοιχείο δεν αλλάζει το αποτέλεσμα.



Σχήμα 3-1: Μορφολογική επεξεργασία ενός συνόλου A (αρχικό αντικείμενο) από ένα σύνολο B (δομικό στοιχείο). Τα δύο σύνολα ορίζονται στο καρτεσιανό επίπεδο και τα στοιχεία τους λαμβάνουν τιμές 1 ή 0.

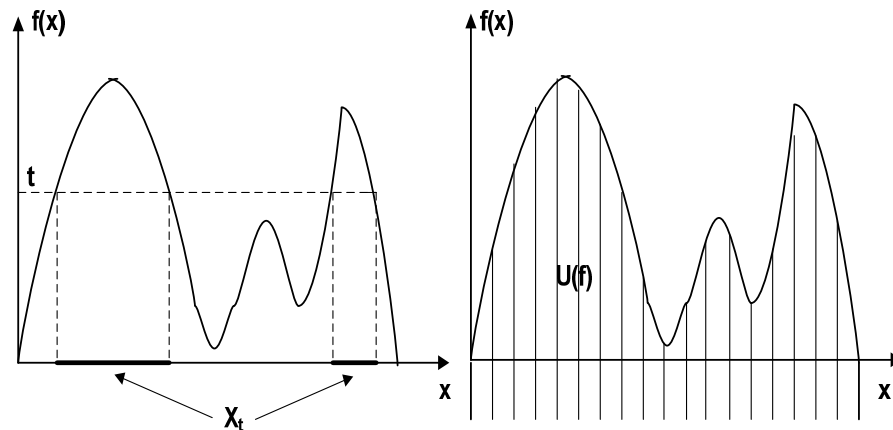
Η βασική αρχή της Μαθηματικής Μορφολογίας είναι το Σύνολο. Για την ανάλυση πολυδιάστατων σημάτων έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές προσεγγίσεις που αποσκοπούν στον ορισμό συναρτήσεων με χρήση της έννοιας του συνόλου.

Περιορίζοντας για λόγους απλότητας την εφαρμογή της MM σε συναρτήσεις (ή σήματα) μίας διάστασης, δύο διαφορετικές και ισοδύναμες προσεγγίσεις αναπαράστασης συναρτήσεων από σύνολα μπορούν να χρησιμοποιηθούν, με σκοπό να εφαρμοστούν οι πράξεις της Μορφολογικής Ανάλυσης που βασίζονται στα σύνολα.

Η πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιεί την αρχή της Διατομής (cross section) μιας συνάρτησης, που ορίζεται ως:

$$X_t(f) = \{x \in D : f(x) \geq t\}, t \in V \quad (3.22)$$

όπου $f(x)$ είναι η υπό εξέταση συνάρτηση, D είναι το πεδίο ορισμού της $f(x)$ επί του συνόλου \mathbb{Z} των ακεραίων ή του συνόλου \mathbb{R} των πραγματικών αριθμών, V είναι το πεδίο τιμών της $f(x)$ και t είναι ένα ορισμένο όριο (threshold). Μια γραφική παρουσίαση της διατομής της συνάρτησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-2 (α).



. (α) (β)

Σχήμα 3-2: Γραφική παράσταση (α) της Διατομής (cross section) $X_t(f)$ και (β) της Umbra $U(f)$ της συνάρτησης $f(x)$.

Δεδομένου ότι πρακτικά η συνάρτηση $f(x)$ είναι συνεχής με μερικές πιθανά θετικά άλματα (άνω ημι-συνεχής συνάρτηση), οι διατομές της συνάρτησης σχηματίζουν μια ακολουθία συνόλων που επιτρέπουν την ανακατασκευή της συνάρτησης ως ακολούθως [Serra 1982]:

$$f(x) = \sup \{t \in \mathbb{R} : x \in X_t\} \quad (3.23)$$

Η δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιεί την “Σκιά” (Umbra) $U(f)$ της συνάρτησης. Αυτό είναι ένα σύνολο U ορισμένο στο Καρτεσιανό επίπεδο όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{aligned} (x, t) \in U &\Leftrightarrow t \leq f(x) \Leftrightarrow x \in X_t(f) \\ (x, t) \in U &\Leftrightarrow (x, \alpha) \in U, \forall \alpha < t \end{aligned} \quad (3.24)$$

Βασιζόμενη στη Σκιά “Umbra” $U(f)$, η συνάρτηση $f(x)$ μπορεί εναλλακτικά να ανακατασκευαστεί ως εξής:

$$f(x) = \sup \{t \in \mathbb{R} : (x, t) \in U(f)\} \quad (3.25)$$

Μια γραφικά αναπαράσταση του umbra μιας συνάρτησης απεικονίζεται στο Σχήμα 3-2 (β).

Καθώς, σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς, τα σήματα μπορούν να συνδεθούν με τα σύνολα, το μορφολογικό φιλτράρισμα [Maragos and Schafer 1987] προχωράει στην τροποποίηση των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών επεξεργάζοντας μορφολογικά το σήμα με ένα άλλο σήμα ή συνάρτηση που καλείται “Δομικό στοιχείο”, το οποίο στην πράξη είναι

συνεπτυγμένο και έχει απλό σχήμα. Κατά συνέπεια, το μορφολογικό φίλτρο είναι μια πράξη απεικόνισης συνόλων, που πρέπει να ικανοποιεί τέσσερις βασικές απαιτήσεις: Ανεξαρτησία Μετάθεσης (translation invariance), Ανεξαρτησία Κλίμακας (scale invariance), Εξάρτηση μόνο από τα τοπικά χαρακτηριστικά του σήματος, και άνω ημισυνεχής έννοια (upper semicontinuity meaning) (οι τιμές των μεταβλητών κοντά στο x δεν μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερες από την τιμή του x , αν και μπορούν να μειώνονται απότομα).

Χρησιμοποιώντας την ισοδύναμη διατομή ή την Umbra αναπαράσταση μιας συνάρτησης από σύνολα, η Minkowski πρόσθεση και αφαίρεση μεταξύ δύο συναρτήσεων ορίζεται ως:

$$\begin{aligned} (f \oplus g)(x) &= \sup_{y \in D} \{f(y) + g(x - y)\} \\ (f \ominus g)(x) &= \sup_{y \in D} \{f(y) - g(x - y)\} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Αν και στους παραπάνω ορισμούς, το σύνολο D μπορεί καταλλήλως να εξαχθεί για να καλύψει το σύνολο \mathbb{R} των πραγματικών αριθμών, για πρακτικές εφαρμογές μπορεί να θεωρηθεί ότι το σύνολο D είναι ένα συμπαγές υποσύνολο του άξονα των πραγματικών αριθμών \mathbb{R} , ορίζοντας την περιοχή Υποστήριξης της συνάρτησης $f(x)$. Στα Μαθηματικά, η υποστήριξη (support) μιας συνάρτησης ορίζεται ως ένα σύνολο σημείων όπου η συνάρτηση είναι μη μηδενική. Επίσης, χωρίς απώλεια της γενικότητας, μπορεί να θεωρηθεί ότι η συνάρτηση $g(x)$ ορίζεται σε ένα συμπαγές υποσύνολο του συνόλου D . Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω ορισμούς για την πρόσθεση και αφαίρεση Minkowski μεταξύ συναρτήσεων στην (3.26), οι τέσσερις βασικές μορφολογικές λειτουργίες ορίζονται ως:

$$Dilation: \text{dil}(f, g) = (f \oplus g^r)(x) = f(x) \oplus g(-x) = \sup_{y \in D} \{f(y) + g(y - x)\} \quad (3.27)$$

$$Erosion: \text{er}(f, g) = (f \ominus g^r)(x) = f(x) \ominus g(-x) = \inf_{y \in D} \{f(y) - g(y - x)\} \quad (3.28)$$

$$Closing: \text{cl}(f, g) = (f \bullet g)(x) = [(f \oplus g^r) \ominus g](x) \quad (3.29)$$

$$Opening: \text{op}(f, g) = (f \circ g)(x) = [(f \ominus g^r) \oplus g](x) \quad (3.30)$$

όπου $g^r(x)$ υποδηλώνει την ανακλώμενη (συμμετρική) συνάρτηση της $g(x)$ σε σχέση με την αρχή του άξονα των x . Όλες οι παραπάνω τέσσερις λειτουργίες δεν επηρεάζονται από την μετάθεση (translation invariant). Το Άνοιγμα (Opening) και η Διαστολή (Dilation) εξαρτώνται από το μέγεθος του συνόλου (extensive operations) ενώ η Διάβρωση (erosion) και το Κλείσιμο (closing) δεν εξαρτώνται από το μέγεθος του συνόλου (non-extensive operations). Η επανάληψη της λειτουργίας του Ανοίγματος και του Κλεισίματος περισσότερες από μία φορές με το ίδιο δομικό στοιχείο δεν επιφέρει αλλαγή στο αποτέλεσμα (idempotent operations). Επιπλέον ενδιαφέρουσες ιδιότητες των παραπάνω μορφολογικών λειτουργιών, όπως η επιμεριστική ιδιότητα (distributivity), η σειριακή ή παράλληλη σύνθεση

(serial or parallel composition), η διαχωριστικότητα (separability), η ύπαρξη σταθερών σημείων (fixed points), η αντιστρεψιμότητα (invertibility) κ.ά. παρουσιάζονται στο [Maragos and Schafer 1987].

Συγκρινόμενη με την κλασική γραμμική συνέλιξη $f * g$ μεταξύ δύο συναρτήσεων $f(x)$ και $g(x)$, η πρόσθεση και η αφαίρεση Minkowski των συναρτήσεων μπορούν εναλλακτικά να οριστούν ως μη γραμμικές συνελίξεις, όπου ο πολλαπλασιασμός μεταξύ των δυο συναρτήσεων αντικαθίσταται από πρόσθεση ή αφαίρεση και η ολοκλήρωση του αποτελέσματος αντικαθίσταται από τους τελεστές του Μεγίστου Max ή Ελαχίστου Min. Μια παρόμοια παρατήρηση ισχύει και για γραμμική συσχέτιση, εάν η ανακλώμενη (συμμετρική) συνάρτηση $g^r(x)$ χρησιμοποιηθεί στην θέση της $g(x)$.

Βέβαια, η μη γραμμικότητα των τελεστών της Διαστολής και της Διάβρωσης οδηγούν σε διαφορές μεταξύ των τελεστών αυτών και των παραδοσιακών γραμμικών συνελίξεων. Μια βασική διαφορά είναι ότι οι σειριακές διασυνδέσεις των Διαστολών και των Διαβρώσεων οδηγούν σε εντελώς διαφορετικά μη γραμμικά συστήματα [Maragos and Schafer 1987]. Κατά συνέπεια, υπάρχει μια άπειρη ποικιλία μη γραμμικών τελεστών που σχηματίζονται με αλληλουχία διαδοχικών Μορφολογικών Διαστολών και Διαβρώσεων με τελεστές Πρόσθεσης, Αφαίρεσης, Μεγίστου ή Ελαχίστου. Μια επιμελής και σχολαστική επεξεργασία των σχέσεων μεταξύ των γραμμικών πράξεων και των μορφολογικών φίλτρων πραγματοποιήθηκε στο [Maragos and Schafer 1987], οδηγώντας σε μια ισοδύναμη απεικόνιση των παραπάνω μορφολογικών φίλτρων με όρους γραμμικών φίλτρων. Οι εξισώσεις (3.27) έως (3.30) μπορούν αξιοσημείωτα να απλοποιηθούν, εάν η συνάρτηση $g(x)$ είναι μια άρτια συνάρτηση, δηλαδή $g(x)=g(-x)$, και εάν χρησιμοποιηθούν διακριτές συναρτήσεις. Για ένα σήμα $f(k)$, που ορίζεται πάνω σε ένα πεδίο D_f , και για μια συνάρτηση $g(u)$ μήκους L που ορίζεται σε ένα πεδίο D_g και αποκαλείται “Δομικό Στοιχείο”, η Διαστολή και η Διάβρωση του σήματος $f(k)$ από ένα στοιχείο $g(u)$ ορίζονται ως:

$$\text{dil}(k) = (f \oplus g)(k) = \max_{u \in D_g} \{f(k+u) + g(u)\} \quad (3.31)$$

$$\text{er}(k) = (f \ominus g)(k) = \min_{u \in D_g} \{f(k+u) - g(u)\} \quad (3.32)$$

Ομοίως, βασιζόμενες στην Διάβρωση και στην Διαστολή, οι πράξεις Κλείσιμο και Άνοιγμα του σήματος $f(k)$ από ένα στοιχείο $g(u)$ ορίζονται περαιτέρω ως:

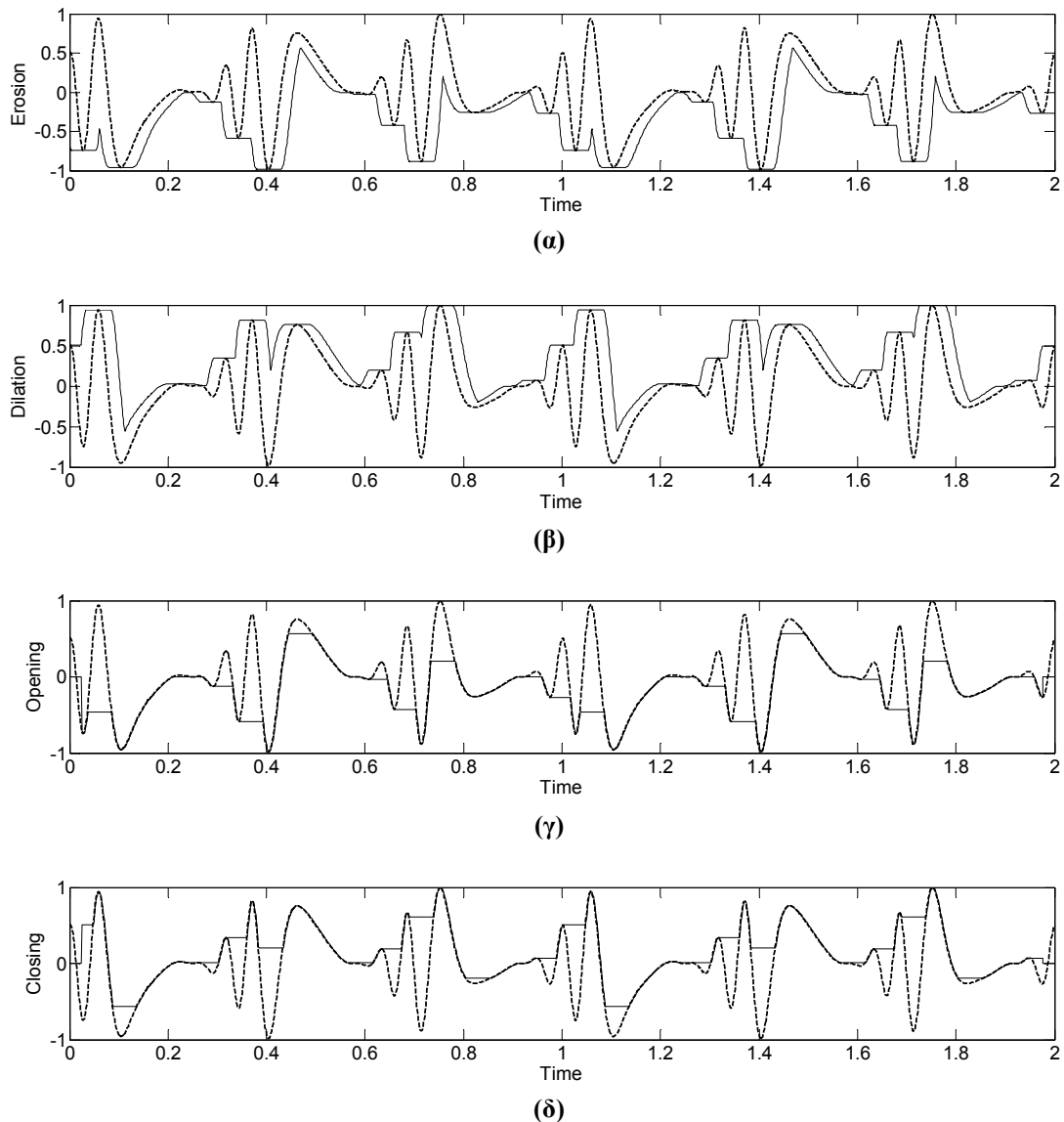
$$\text{cl}(k) = (f \bullet g)(k) = \text{er}(\text{dil}(k)) \quad (3.33)$$

$$\text{op}(k) = (f \circ g)(k) = \text{dil}(\text{er}(k)) \quad (3.34)$$

Η γεωμετρική ερμηνεία των τεσσάρων προαναφερθέντων βασικών μορφολογικών πράξεων για συναρτήσεις μπορούν απευθείας να εξαχθούν από αυτήν που χρησιμοποιήθηκε για τα σύνολα, εάν χρησιμοποιηθεί η “Σκιά” (umbra) ή η ανάλυση Διατομής (Cross section) των

συναρτήσεων. Για παράδειγμα, το umbra του Ανοίγματος είναι η ένωση όλων των μεταθέσεων του umbra του Δομικού Στοιχείου, το οποίο μπορεί να “προσαρμοστεί εσωτερικά” στο umbra της πραγματικής συνάρτησης.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής των τεσσάρων μορφολογικών τελεστών σε ένα σήμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-3. Η διακεκομμένη γραμμή παριστάνει το αρχικό σήμα. Παρατηρείται ότι η Μορφολογική Διάβρωση (Erosion) του σήματος αποκόπτει τις αρνητικές κορυφές και οξύνει τις θετικές κορυφές. Αντίστροφα, η Μορφολογική Διαστολή αποκόπτει τις θετικές κορυφές και μειώνει το πλάτος των αρνητικών κορυφών, ανάλογα με τη διάρκεια του δομικού στοιχείου. Ο τελεστής άνοιγμα αποκόπτει μόνο τις θετικές κορυφές ενώ ο τελεστής κλείσιμο αποκόπτει μόνο τις αρνητικές κορυφές.



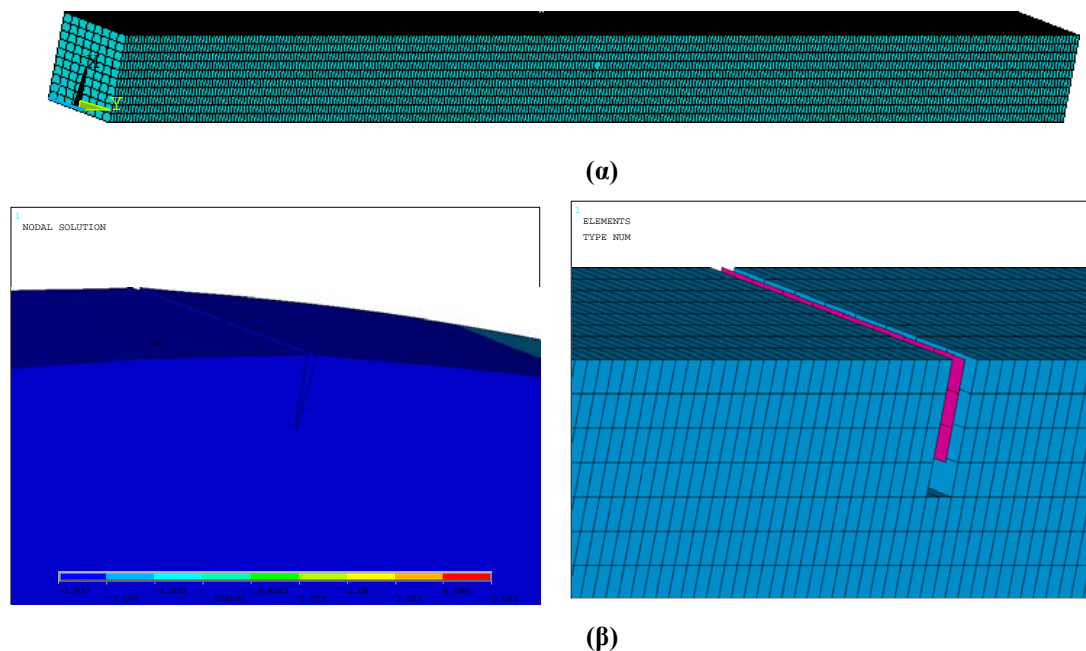
Σχήμα 3-3: Εφαρμογή των τεσσάρων βασικών μορφολογικών λειτουργιών σε μια διαμορφωμένη κατά πλάτος και κατά συχνότητα συνάρτηση, με χρήση επίπεδου δομικού στοιχείου. Η διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζει το αρχικό σήμα και η συνεχής γραμμή παρουσιάζει το σήμα μετά την μορφολογική επεξεργασία α) Διάβρωση, β) Διαστολή, γ) Άνοιγμα, δ) Κλείσιμο

3.4 Διαδικασία Μοντελοποίησης Πεπερασμένων Στοιχείων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά το μοντέλο Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση απλών κατασκευών – ράβδων με ρωγή, το οποίο αναπτύχθηκε από τον Koukoulis στην [Κουκούλης 2008]. Με σκοπό να επιλεγεί το κατάλληλο μοντέλο Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) για να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια, μια σύγκριση πραγματοποιήθηκε μεταξύ ενός δισδιάστατου μοντέλου επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης (plane strain), ενός δισδιάστατου μοντέλου επίπεδης εντατικής κατάστασης (plane stress) και ενός τρισδιάστατου μοντέλου. Σκοπός της ανάλυσης είναι η εκτίμηση εάν τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν από ένα κατάλληλο δισδιάστατο μοντέλο μπορούν να επιτύχουν την ακρίβεια του σημαντικά πιο ακριβούς από άποψη υπολογιστικού χρόνου τρισδιάστατου μοντέλου. Η ανάλυση περιλαμβάνει α) τις υγιείς κατασκευές, β) μια περίπτωση με συνεχώς ανοιχτή ρωγή, γ) μια περίπτωση αναπνέουσας ρωγμής. Στην ειδική περίπτωση της αναπνέουσας ρωγμής, πραγματοποιήθηκε ανάλυση επαφής. Όλα τα μοντέλα αναπτύχθηκαν με χρήση υπολογιστικού κώδικα πεπερασμένων στοιχείων σε ANSYS 10.0.

Εξετάζεται μια πακτωμένη πρόβλος δοκός μήκους $l=300$ mm, με ομοιόμορφη τετραγωνική διατομή $w \times w = 20 \times 20$ mm², με μια αναπνέουσα ρωγή τοποθετημένα σε απόσταση $l_c=150$ mm μετρούμενο από το πακτωμένο άκρο. Η ρωγή έχει ένα ομοιόμορφο βάθος $d = 4$ mm (Σχετικό βάθος ρωγμής $a=d/w=0.2$ δηλαδή 20%). Οι ιδιότητες του υλικού λαμβάνονται ίσες με ένα αυτές ενός τυπικού υλικού Plexiglas. Η δοκός διεγείρεται με ένα κατακόρυφο φορτίο 2 MPa επιβαλλόμενο ομοιόμορφα κατά μήκος του κάθετου ελεύθερου άκρου, αναγκάζοντας με τον τρόπο αυτό την ρωγή να ανοίγει και να κλείνει, δηλαδή να αναπνέει.

Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από 300 υποδιαιρέσεις κατά μήκος του μήκους l και 10 υποδιαιρέσεις κατά μήκος των άλλων δύο πλευρών (w) της διατομής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-4. Το τρισδιάστατο μοντέλο χτίζεται από οχτακομβικά στερεά στοιχεία (SOLID45), ενώ στην περιοχή της ρωγμής στοιχεία επαφής χρησιμοποιήθηκαν. Τα δισδιάστατα μοντέλα χτίστηκαν από τετρακομβικά στοιχεία (PLANE42) σε επίπεδη εντατική (plane stress) και επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση (plane strain). Στην περίπτωση μιας αναπνέουσας ρωγμής, ευθύγραμμα στοιχεία επαφής χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 3-4: Μοντέλα Πεπερασμένων Στοιχείων: (α) Πλήρης Όψη του 3D μοντέλου και (β) Zoom του 3D μοντέλου στην περιοχή της ρωγμής.

Πρώτα, υπολογίστηκαν οι ιδιοσυχνότητες της υγιούς κατασκευής και της κατασκευής με ανοιχτή ρωγμή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1. Όπως μπορεί να σημειωθεί, το μοντέλο επίπεδης εντατικής παρουσιάζει άριστη συμφωνία με το τρισδιάστατο μοντέλο, καταλήγοντας σε λιγότερο από 0.5% υπερεκτίμηση. Από την άλλη το μοντέλο επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης καταλήγει σε μια υπερεκτίμηση πάνω από 8% της ιδιοσυχνότητας σε σχέση με το τρισδιάστατο μοντέλο. Τα αποτελέσματα αυτά δεν αλλάζουν ουσιαστικά όταν η πυκνότητα πλέγματος διπλασιαστεί.

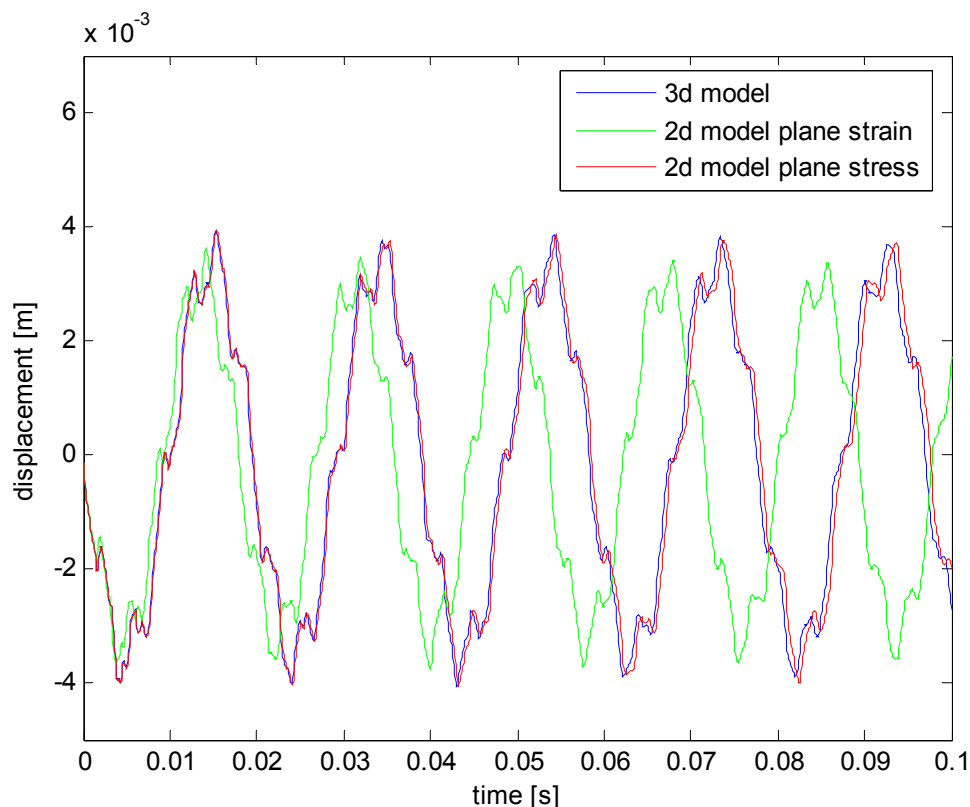
	Δοκός χωρίς Ρωγμή			Δοκός με μονίμως ανοιχτή Ρωγμή		
	3D	2D plane stress	2D plane strain	3D	2D plane stress	2D plane strain
1st mode	51.92	51.69	56.49	51.29	51.02	55.75
2nd mode	318.59	317.22	345.70	303.40	300.89	327.87
3rd mode	864.20	860.65	934.26	863.94	860.38	933.96

Πίνακας 3-1: Ιδιοσυχνότητες (Hz) δοκού χωρίς ρωγμή και με μια ανοιχτή ρωγμή, όπως υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο, ένα δισδιάστατο επίπεδης εντατικής κατάσταση και ένα δισδιάστατο επίπεδης παραμορφωσιακής κατάσταση Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων.

Στην περίπτωση μιας αναπνέουσας ρωγμής, πραγματοποιείται μια ανάλυση της μεταβατικής απόκρισης. Η συχνότητα δειγματοληψίας (το αντίστροφο του χρονικού βήματος) επιλέγεται ίση με 10 KHz και ο συνολικός χρόνος της ανάλυσης επιλέγεται ίσως με 0.1s. Δεν χρησιμοποιείται απόσβεση. Οι χρονικές αποκρίσεις των μετατοπίσεων, όπως αποκτώνται από τα τρία μοντέλα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-5. Όπως φαίνεται, αν και το

μοντέλο εντατικής κατάστασης έχει μια δύσκολα αναγνωρίσιμη διαφορά από την πρώτη ιδιοσυχνότητα σε σχέση με το τρισδιάστατο μοντέλο, παρουσιάζει μια άριστη συμφωνία με το τρισδιάστατο μοντέλο με όρους πλάτους μετατόπισης, επιβεβαιώνοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 3-1. Από την άλλη, το μοντέλο επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης καταλήγει σε μια μεγαλύτερη πρώτη ιδιοσυχνότητα και σε μικρότερα πλάτη συγκριτικά με το τρισδιάστατο μοντέλο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, το δισδιάστατο μοντέλο επίπεδης εντατικής κατάστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγραφεί αξιόπιστα η περίπτωση μιας δοκούς με μια ρωγμή, ανεξάρτητα του τύπου της ρωγμής (τύπου ανοιχτής, κλειστής ή αναπνέουσας ρωγμής).



Σχήμα 3-5: Κατακόρυφες μετατοπίσεις στο ελεύθερο άκρο πρόβολου δοκού που παρουσιάζει μια “αναπνέουσα” ρωγμή, χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο, ένα δισδιάστατο επίπεδης εντατικής κατάστασης και ένα δισδιάστατο επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων.

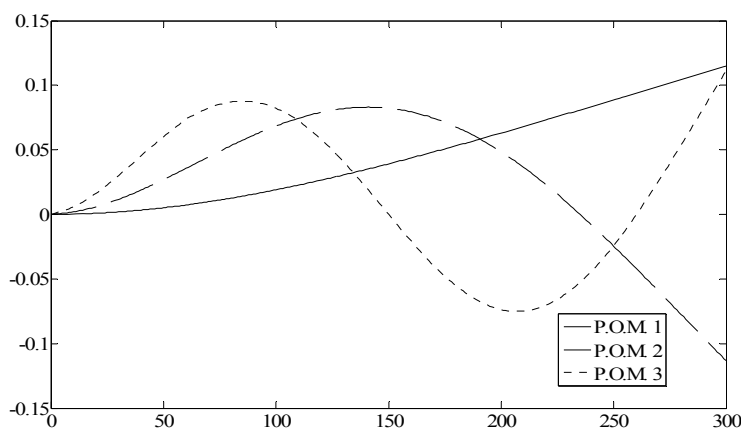
3.5 Επιλογή Μορφολογικών Τελεστών και Δομικών Στοιχείων

Η εμφάνιση ρωγμών σε κατασκευές οδηγούν σε μεταβολές των ιδιομορφών τους. Οι ιδιομορφές είναι πιο ευαίσθητες στη παρουσία και στα χαρακτηριστικά ρωγμών σε σχέση με τις μεταβολές που εμφανίζονται στις ιδιοσυχνότητες. Όμως η παρουσία της βλάβης μπορεί να μην είναι ιδιαίτερα εμφανής στις χαμηλές ιδιομορφές της κατασκευής που συνήθως μετριούνται.

Για να ξεπεραστούν οι παραπάνω αδυναμίες επιχειρείται στην παρούσα διδακτορική διατριβή μια νέα προσέγγιση. Από μετρήσεις κραδασμών που πραγματοποιούνται κατά

μήκος της κατασκευής εξάγονται οι πρώτες Ορθοκανονικές Προβολές – Μορφές και στη συνέχεια εφαρμόζεται πάνω τους κατάλληλα επιλεγμένος μορφολογικός δείκτης.

Μια δοκός που παρουσιάζει “αναπνέουσα” ρωγή μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας το δισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων επίπεδης εντατικής κατάστασης που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα και διεγείρεται με μια κρουστική δύναμη στο ελεύθερο άκρο της. Η κρουστική αυτή φόρτιση είναι θλιπτική με φορά κάθετη στο άξονα της δοκού, έχει μέτρο ίσο με δύο (2) MPa και εφαρμόζεται βηματικά για χρονικό διάστημα $t=0.0001$ sec. Η κρουστική αυτή δύναμη αναγκάζει την ρωγή να ανοίγει και να κλείνει, δηλαδή να αναπνέει. Το μοντέλο επιλύεται για συνολικό χρόνο $T_{total}=0.1$ s και λαμβάνονται οι επιταχύνσεις 300 κόμβων του μοντέλου. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η μέθοδος Αποσύνθεσης Ορθοκανονικών Προβολών και εξάγονται τα πρώτα τρία (3) POMs, που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-6. Η ρωγή βρίσκεται σε απόσταση 60 mm από το πακτωμένο άκρο και παρουσιάζει σχετικό βάθος 20%. Η εξέταση των τριών (3) πρώτων POMs δεν υποδεικνύει κάποια πληροφορία για την θέση και το μέγεθος της ρωγής.



Σχήμα 3-6: Ορθοκανονικές Μορφές για πρόβολο δοκού με θέση ρωγής στα 60 mm και σχετικό βάθος ρωγής 20%.

Για τον λόγο αυτό, εισάγεται η έννοια της Μαθηματικής Μορφολογίας και χρησιμοποιείται για την περαιτέρω επεξεργασία του σχήματος των POMs. Οι τέσσερις βασικοί μορφολογικοί τελεστές (Διάβρωση, Διαστολή, Άνοιγμα και Κλείσιμο) εφαρμόζονται στα πρώτα POMs με σκοπό την ανίχνευση και τον καθορισμό των χαρακτηριστικών της ρωγής.

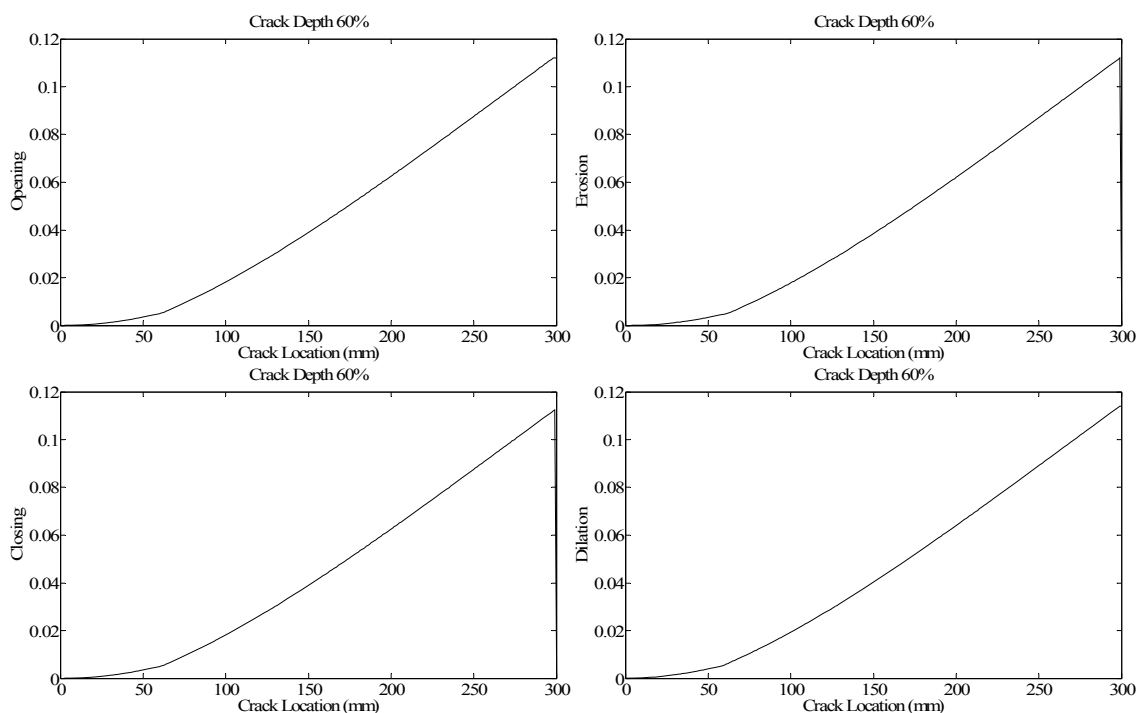
Η επιλογή του κατάλληλου Δομικού Στοιχείου και του κατάλληλου μορφολογικού τελεστή είναι ουσιώδης για την επιτυχία της μορφολογικής επεξεργασίας. Για το λόγο αυτό, εξετάζεται το είδος του δομικού στοιχείου που θα χρησιμοποιηθεί.

Πρώτα χρησιμοποιείται ένα επίπεδο Δομικό Στοιχείο. Τα επίπεδα Δομικά Στοιχεία είναι τα απλούστερα για εφαρμογή, καθώς η μοναδική παράμετρος που πρέπει να επιλεγθεί είναι το αντίστοιχο μήκος τους L . Τα αποτελέσματα της εφαρμογής ενός επίπεδου δομικού στοιχείου στο πρώτο POM μιας δοκού με ρωγή με σχετικό βάθος 60% παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-7. Με ιδιαίτερα προσεκτική εξέταση των σχημάτων, μπορεί να γίνει αισθητή η ύπαρξη μιας μικρή αλλαγή στην κλίση των μορφολογικών τελεστών στην θέση της ρωγής.

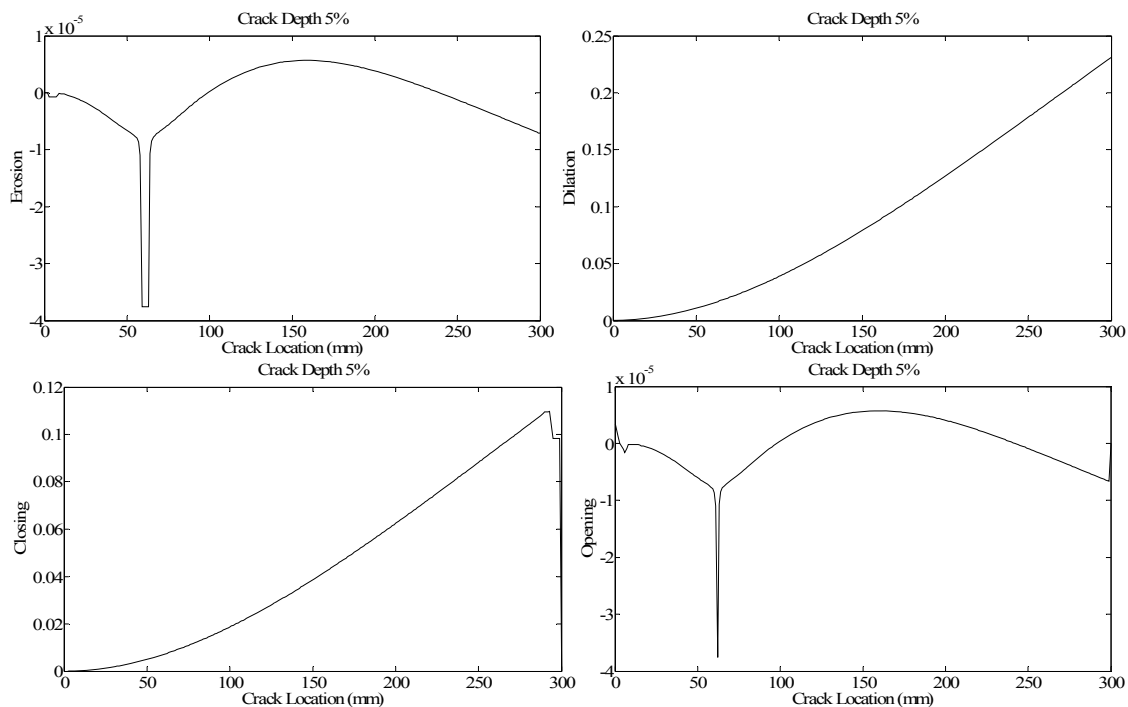
Όμως η αλλαγή αυτή δεν είναι εύκολα αναγνωρίσιμη, ώστε να αποκαλύπτει ξεκάθαρα την ύπαρξη της ρωγμής.

Έπειτα, μια καμπύλη (spline) χρησιμοποιείται ως Δομικό Στοιχείο. Η καμπύλη αυτή δημιουργείται χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα POM μιας υγιούς δοκούς (δοκός χωρίς ρωγμή). Το μήκος του Δομικού Στοιχείου επιλέγεται ίσο με το ένα εξηκοστό (1/60) του μήκους της δοκού. Οι μορφολογικοί τελεστές που προκύπτουν παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-8. Μια έντονη αιχμή που αντιστοιχεί στην θέση της ρωγμής παρατηρείται ξεκάθαρα στα αποτελέσματα της Διάβρωσης και του Άνοιγματος, ακόμα και όταν η ρωγμή βρίσκεται στα πρώτα στάδια (σχετικό βάθος ρωγμής 5%). Ως αποτέλεσμα, οι δύο αυτοί μορφολογικοί τελεστές μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατ' αρχήν ως Δείκτες Ύπαρξης Ρωγμής σε μια κατασκευή.

Στο υπόλοιπο τμήμα του κεφαλαίου, ο τελεστής της Διάβρωσης θα χρησιμοποιηθεί, καθώς παρουσιάζει μια πιο πλατιά αιχμή σε σχέση με το Άνοιγμα, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη ευρωστία. Επιπλέον, όπως υποδηλώνεται από τις εξισώσεις (3.31) και (3.34), ο τελεστής Άνοιγμα απαιτεί περισσότερο υπολογιστικό χρόνο και κόστος, καθώς ο υπολογισμός του πραγματοποιείται σε δύο βήματα.



Σχήμα 3-7: Μορφολογικοί Τελεστές (Διάβρωση (Erosion), Διαστολή (Dilatation), Κλείσιμο (Closing), Άνοιγμα (Opening)) χρησιμοποιώντας το P.O.M. 1 και ένα επίπεδο δομικό στοιχείο.



Σχήμα 3-8: Μορφολογικοί Τελεστές (Διάβρωση (Erosion), Διαστολή (Dilation), Κλείσιμο (Closing), Ανοιγμα (Opening)) χρησιμοποιώντας το P.O.M. 1 και ένα καμπύλο (spline) δομικό στοιχείο. Πρόβολος Δοκός, Θέση ρωγμής στα 60 mm, 60% Σχετικό βάθος ρωγμής και ANL=0%.

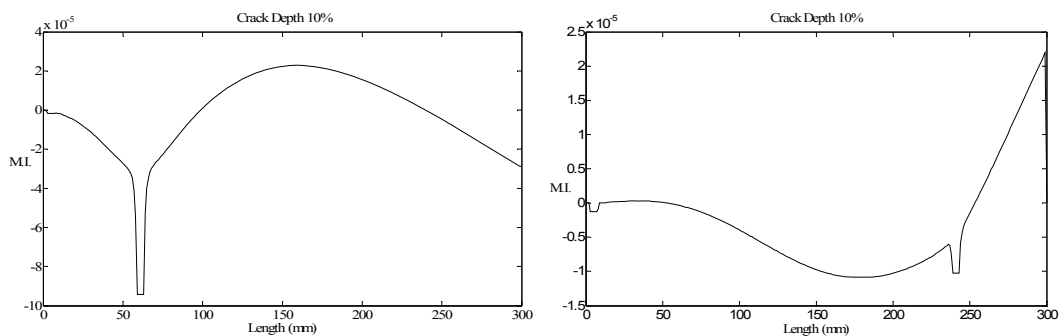
3.6 Αξιολόγηση απόδοσης της προτεινόμενης προσέγγισης σε πρόβολο δοκό με ρωγμή

Για να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης, η επίδοσή της αποτιμάται συγκριτικά με μια σειρά από χαρακτηριστικά, όπως η δυνατότητα αναγνώρισης με επιτυχία της θέσης και του βάθους της ρωγμής, η αναγνώριση πολλαπλών ρωγμών σε ποικίλες θέσεις και με διαφορετικά βάθη, η ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση μεταξύ δύο ρωγμών για την επιτυχή ανίχνευση, η ευρωστία σε εξωτερικό θόρυβο και η χωρική ευκρίνεια των σημείων μέτρησης.

Στην παρακάτω ανάλυση, η πρόβλος δοκός της ενότητας 3.4 επεξεργάζεται περαιτέρω, χρησιμοποιώντας ένα δισδιάστατο μοντέλο επίπεδης εντατικής κατάστασης, κατά την ανάλυση της ενότητας 3.4. Μοναδικές ή πολλαπλές ρωγμές εισάγονται κάθε φορά σε αποστάσεις $l_c=60$ mm, $l_c=150$ mm, $l_c=240$ mm από το πακτωμένο άκρο. Τα σχετικά βάθη της ρωγμής a επιλέγονται τυπικά ίσα με 10%, 20%, 30%, 40% και 60%. Οι μετρήσεις κατακόρυφης μετατόπισης αποκτώνται σε χωρικές αποστάσεις 1 mm κατά μήκος της δοκού, καταλήγοντας σε έναν διαθέσιμο αριθμό $M=301$ σημείων (χωρικές θέσεις). Ο τελεστής της Διάβρωσης με ένα καμπύλο Δομικό Στοιχείο μήκους ίσο με το ένα εξηκοστό (1/60) του συνολικού μήκους της δοκού χρησιμοποιείται σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ενότητας 3.5.

3.6.1 Καθορισμός της θέσης και του βάθους της ρωγμής

Όπως ήδη αναφέρεται στην ενότητα 3.5, η θέση των ρωγμών μπορεί να προσδιοριστεί από την ξαφνική απότομη αλλαγή του μορφολογικής τελεστή της Διάβρωσης. Η αποτελεσματικότητα αυτής της παρατήρησης αξιολογείται περαιτέρω βάσει των διαφόρων θέσεων της ρωγμής και των μεγέθη που αναφέρονται ανωτέρω. Στο Σχήμα 3-9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τη εφαρμογής του μορφολογικού δείκτη Διάβρωση για θέσεις ρωγμής στα 60 mm και στα 240 mm από το πακτωμένο άκρο. Το σχετικό βάθος της ρωγμής είναι 10% ενώ δεν έχει προστεθεί εξωτερικός θόρυβος (ANL=0%). Όπως φαίνεται στο σχήμα, η μέθοδος δίνει πολύ καλά αποτελέσματα, ακόμη και στην χειρότερη περίπτωση, όταν η ρωγμή βρίσκεται μακριά από το πακτωμένο άκρο σε $l_c = 240$ mm ενώ το σχετικό βάθος της ρωγμής είναι μόνο 10%.

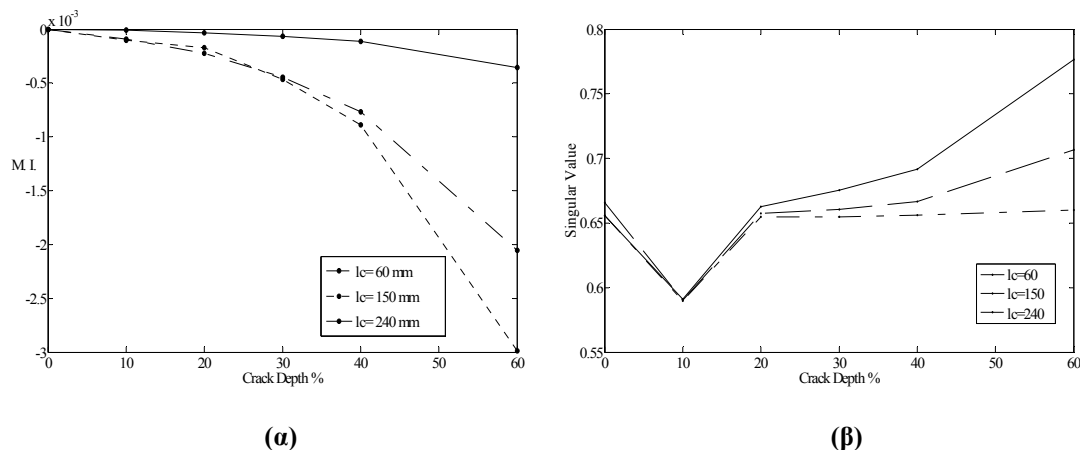


Σχήμα 3-9: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M. 1 με σχετικό βάθος ρωγμής 10%, ANL=0%, πρόβολος δοκός και (α) Θέση ρωγμής στα 60 mm (Αριστερά), (β) Θέση ρωγμής στα 240 mm (Δεξιά).

Με βάση τα σαφή αποτελέσματα που προέκυψαν από το Σχήμα 3-9 σχετικά με τη δυνατότητα ανίχνευσης της θέσης των ρωγμών με την προτεινόμενη μεθοδολογία, εξετάζεται περαιτέρω η συσχέτιση της εξέλιξης του βάθους της ρωγμής με την τιμή του τελεστή της Διάβρωσης στη θέση της ρωγμής. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-10, μία μονότονη αύξηση του μορφολογικού τελεστή παρατηρείται με την αύξηση του βάθους της ρωγμής. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι η τιμή του μορφολογικού τελεστή στη θέση της ρωγμής μπορεί να αξιοποιηθεί περαιτέρω με τη μορφή ενός δείκτη (Μορφολογικός Δείκτης) που θα προσδιορίζει το βάθος της ρωγμής.

Εξετάζοντας το Σχήμα 3-10 (α), παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι πιο σαφή, όταν η ρωγμή βρίσκεται κοντά στο μέσο της δοκού. Ο εντοπισμός της ρωγμής καθίσταται δυσχερέστερος όταν η ρωγμή βρίσκεται κοντά στο ελεύθερο άκρο της δοκού.

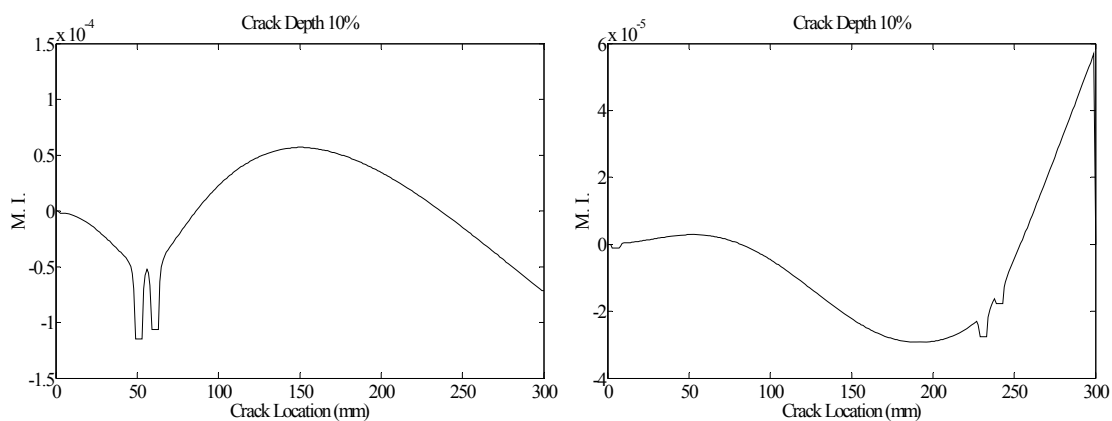
Στο Σχήμα 3-10 (β) παρουσιάζονται οι Μοναδικές Τιμές (Singular Values) για διάφορες θέσεις της ρωγμής και διάφορα σχετικά βάθη. Παρατηρείται ότι οι Μοναδικές Τιμές δεν παρουσιάζουν μονότονη συμπεριφορά και κατά συνέπεια μόνο η σύγκρισή τους (χωρίς την επιπλέον εφαρμογή της μορφολογικής επεξεργασίας) δεν μπορεί να οδηγήσει σε διαγνωστικές πληροφορίες καλής ποιότητας και αξιοπιστίας.



Σχήμα 3-10: Εξέλιξη (α) Μορφολογικού Δείκτη (Διάβρωση), (β) Πρώτης Μοναδιαίας Τιμής για τρεις (3) διαφορετικές θέσεις ρωγμής και πέντε (5) διαφορετικά βάθη ρωγμής. (ANL=0%, πρόβολος δοκός).

3.6.2 Επίδραση ύπαρξης πολλαπλών ρωγμών

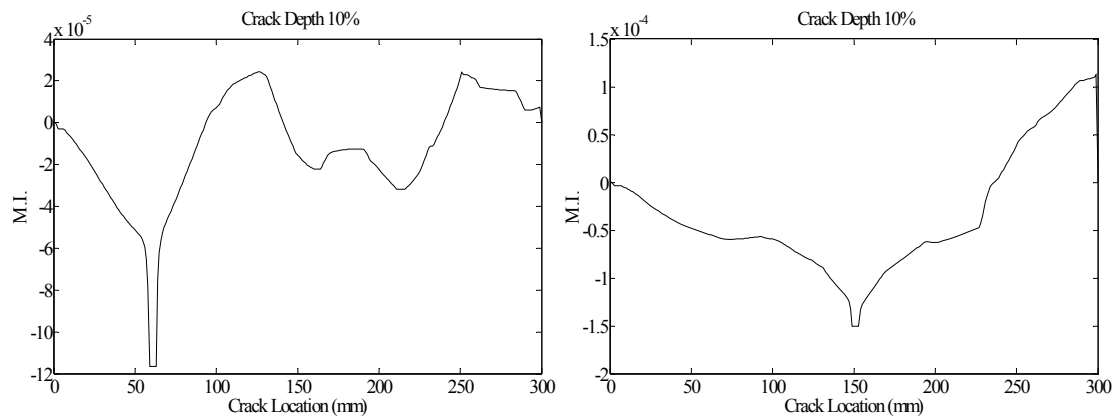
Στη συνέχεια εξετάζεται η ύπαρξη πολλαπλών ρωγμών σε μια απλή κατασκευή – δοκό. Δύο αναπνέουσες ρωγμές (breathing cracks) εισάγονται ταυτόχρονα σε διάφορες θέσεις της δοκού και στις συνέχεια εφαρμόζεται Αποσύνθεση Μοναδιαίας Τιμής και Μορφολογική Επεξεργασία. Εξετάζοντας το Σχήμα 3-11, δύο αιχμές που αντιστοιχούν στη θέση των ρωγμών είναι σαφώς εμφανείς και έντονες, ακόμη και όταν οι ρωγμές είναι στα πρώτα στάδια (σχετικό βάθος ρωγμής $a=10\%$). Η μέθοδος είναι σε θέση να παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα και καλή χωρική ευκρίνεια, ακόμη και στη χειρότερη περίπτωση, όταν οι δύο ρωγμές βρίσκονται μακριά από το πακτωμένο άκρο και βρίσκονται τοποθετημένες κοντά η μία σε σχέση με την άλλη, σε αποστάσεις ίσες με $l_{c1}=230\text{mm}$ και $l_{c2}=240\text{mm}$ από το πακτωμένο άκρο.



Σχήμα 3-11: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με ίσα σχετικά βάθη ρωγμής 10%, ANL=0%, πρόβολος δοκός και (α) Θέσεις ρωγμών στα 50 mm και 60 mm (Αριστερά), (β) Θέσεις ρωγμών στα 230 mm και 240 mm (Δεξιά).

3.6.3 Επίδραση του θορύβου

Προκειμένου να εξεταστούν οι επιπτώσεις του θορύβου και των σφαλμάτων μέτρησης στην ευαισθησία της μεθόδου, τεχνητός θόρυβος προστέθηκε στις κυματομορφές των μετατοπίσεων, με το πρόσθετο επίπεδο θορύβου ANL (Added Noise Level) να αυξάνεται μέχρι ένα σημαντικό ποσό της τάξης του 30%. Στην περίπτωση μιας ρωγμής, τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά, ακόμη και για το μικρότερο βάθος ρωγμής που είναι ίσο με 10%, όταν η ρωγμή βρίσκεται στις θέσεις $lc1 = 60$ mm και $lc2 = 150$ mm (Σχήμα 3-12).



Σχήμα 3-12: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με σχετικό βάθος ρωγμής 10%, ANL=30%, πρόβολος δοκός και (α) Θέση ρωγμής στα 60 mm (Αριστερά), (β) Θέση ρωγμής στα 150mm (Δεξιά).

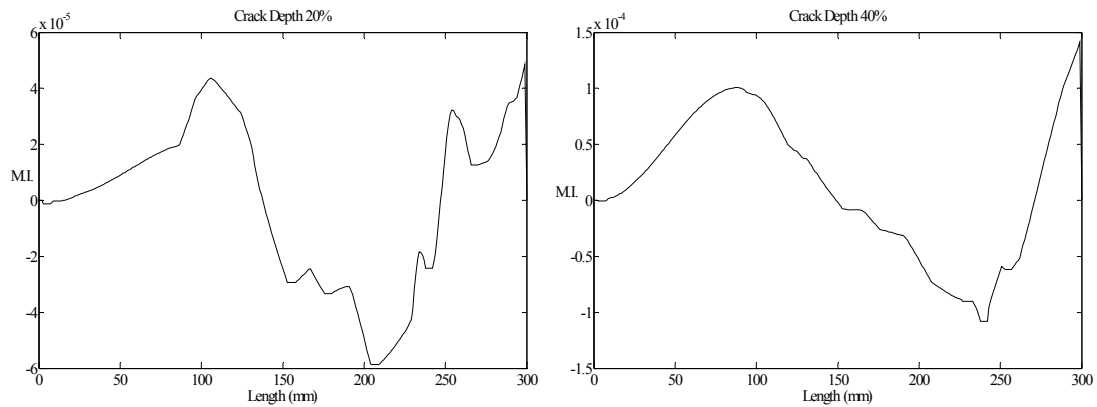
Στην περίπτωση που η ρωγμή βρίσκεται στη θέση $lc = 240$ mm, η ανίχνευση της θέσης της ρωγμής είναι πιο εύκολη στην περίπτωση ρωγμών με μεγάλο σχετικό βάθος (μεγαλύτερο από 40%) και λιγότερη επιτυχής για μικρότερες ρωγμές (κάτω του 30%), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-13. Τα αποτελέσματα γίνονται πιο σαφή αν χρησιμοποιηθεί το τρίτο (3) POM αντί για το πρώτο (1) (Σχήμα 3-14).

Στο Σχήμα 3-15 παρουσιάζεται ο μορφολογικός δείκτης στη χειρότερη περίπτωση, η οποία αντιστοιχεί σε μια ρωγμή στη θέση $lc = 240$ mm, με σχετικό βάθος ρωγμής ίσο με 10% και ANL ίσο με 30%. Είναι εμφανές από το σχήμα ότι στο συνδυασμό των μεγεθών αυτών η προτεινόμενη μέθοδος αγγίζει τα όρια της ικανότητας ανίχνευσης της ρωγμής.

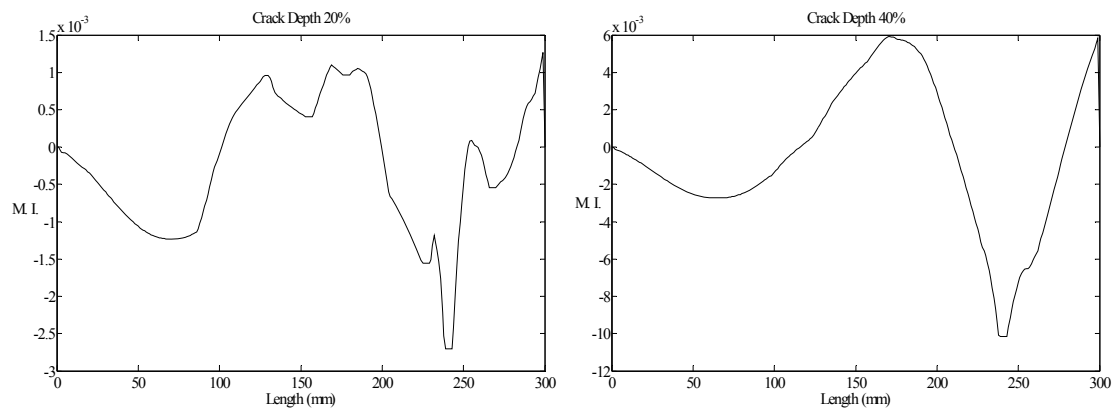
Η εξέλιξη του μορφολογικού δείκτη με την αύξηση του βάθους της ρωγμής με ύπαρξη θορύβου της τάξης του 30% παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-16. Αν και η μέθοδος έχει φτάσει τα όρια της ικανότητας ανίχνευσης της, ο μορφολογικός δείκτης είναι ακόμη σε θέση να ακολουθήσει την αύξηση του βάθους της ρωγμής.

Στην περίπτωση ύπαρξης πολλαπλών ρωγμών, ο εντοπισμός της ρωγμής είναι σαφής για ρωγμές που βρίσκονται σε $lc1 = 60$ mm, και $lc2 = 120$ mm ακόμη και στα αρχικά στάδια της ρωγμής (με σχετικά βάθη ρωγμών ίσα ή μικρότερα από 10%) και για ένα ANL μέχρι 30% όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-17.

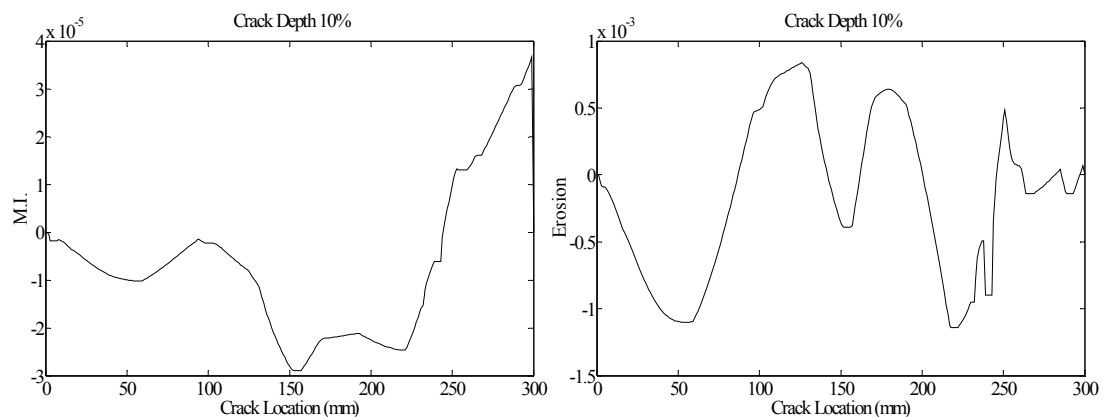
Μορφολογική Επεξεργασία Δυναμικής Απόκρισης Κατασκευών



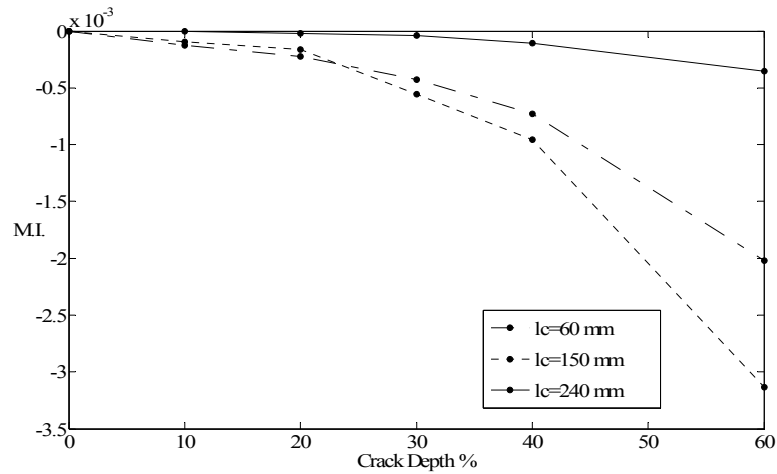
Σχήμα 3-13: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με θέση ρωγμής στα 240 mm, ANL=30%, πρόβολος δοκός και (α) Σχετικό βάθος ρωγμής 20% (Αριστερά), (β) Σχετικό βάθος ρωγμής 40% (Δεξιά).



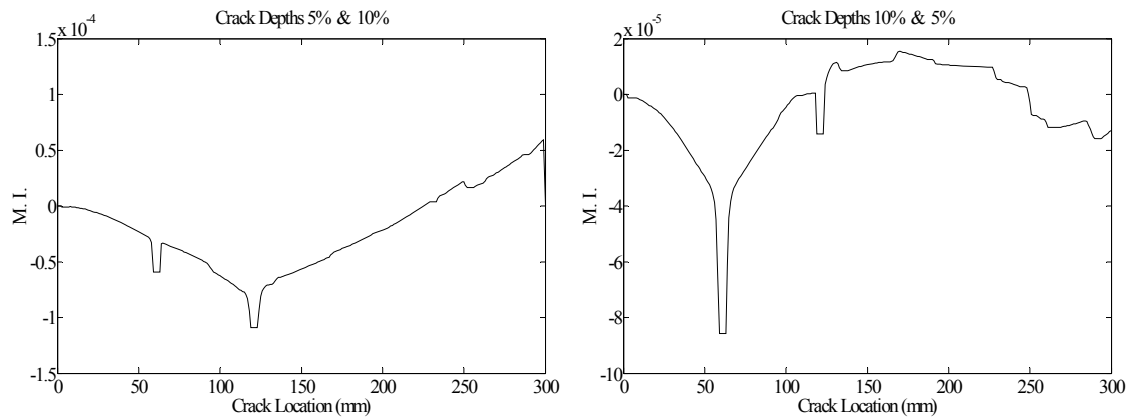
Σχήμα 3-14: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.3 με θέση ρωγμής στα 240 mm, ANL=30%, πρόβολος δοκός και (α) Σχετικό βάθος ρωγμής 20% (Αριστερά), (β) Σχετικό βάθος ρωγμής 40% (Δεξιά).



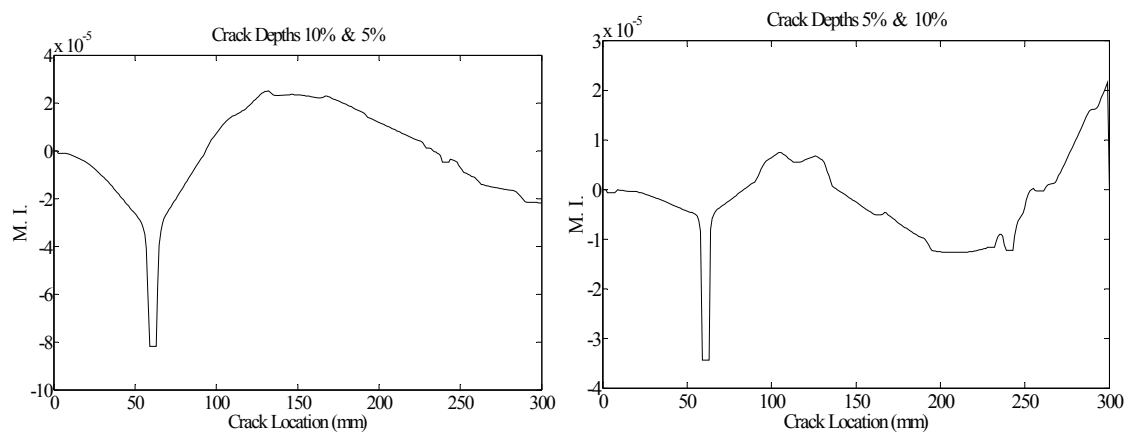
Σχήμα 3-15: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) με θέση ρωγμής στα 240 mm, σχετικό βάθος ρωγμής 10% και ANL=30%, πρόβολος δοκός, χρησιμοποιώντας το (α) P.O.M. 1 (Αριστερά), (β) P.O.M. 3 (Δεξιά).



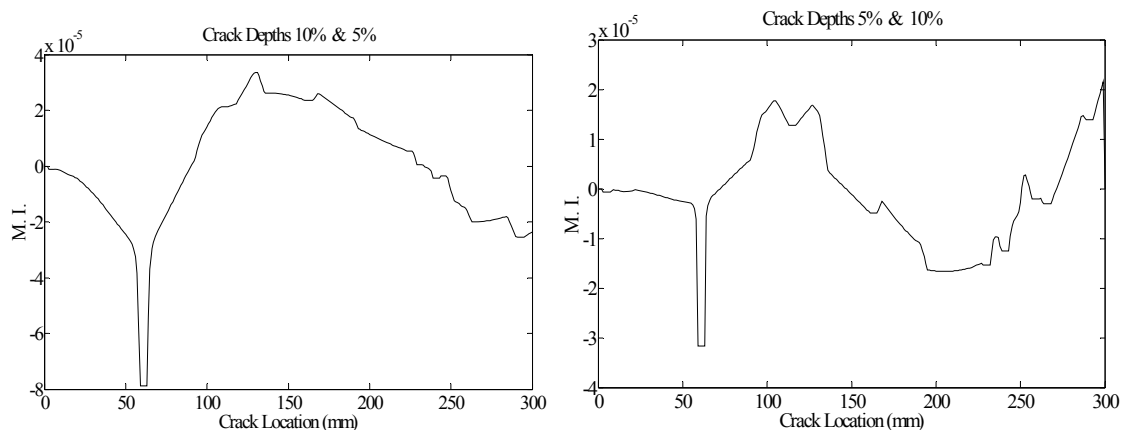
Σχήμα 3-16: Εξέλιξη του Μορφολογικού Δείκτη (Διάβρωση) για τρεις (3) διαφορετικές θέσεις και πέντε (5) διαφορετικά σχετικά βάθη ρωγμής (ANL=30%, πρόβολος δοκός).



Σχήμα 3-17: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με θέσεις ρωγμής στα 60 mm και 120 mm, ANL=30%, πρόβολος δοκός, με σχετικά βάθη ρωγμών: (α) 5% και 10% (Αριστερά), (β) 10% και 5% (Δεξιά).



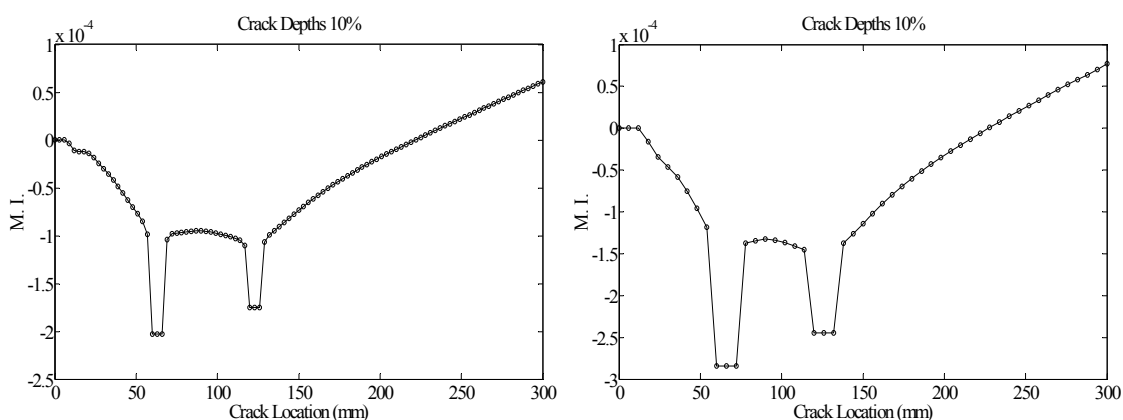
Σχήμα 3-18: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με θέσεις ρωγμής στα 60 mm και 240 mm, ANL=20%, πρόβολος δοκός και με σχετικά βάθη ρωγμών: (α) 10% και 5% (Αριστερά), (β) 5% και 10% (Δεξιά).



Σχήμα 3-19: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με θέσεις ρωγμής στα 60 mm και 240 mm, ANL=30%, πρόβολος δοκός και με σχετικά βάθη ρωγμών: (α) 10% και 5% (Αριστερά), (β) 5% και 10% (Δεξιά).

Η δυσχερέστερη από πλευρά διάγνωσης περίπτωση αντιστοιχεί σε θέσεις ρωγμών σε $l_{c1}=60$ mm και $l_{c2}=240$ mm από το πακτωμένο άκρο της δοκού. Στην περίπτωση όπου το ANL είναι ίσο με 20%, ο προσδιορισμός της ρωγμής είναι ακόμα δυνατός, ακόμη και όταν το σχετικό βάθος της μιας ρωγμής είναι της 10% και της άλλης είναι μόνο 5% (Σχήμα 3-18).

Ωστόσο, όταν το επίπεδο ANL αυξάνεται σε 30%, η μέθοδος φθάνει και πάλι τα όρια της ικανότητας ανίχνευσης (Σχήμα 3-19).



Σχήμα 3-20: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με θέσεις ρωγμής στα 60 mm και 120 mm, ίσα σχετικά βάθη ρωγμών 10%, ANL = 0% , πρόβολος δοκός, μήκος δομικού στοιχείου ίσο με $L/100$ και αριθμός χρησιμοποιούμενων μετρούμενων σημείων: (α) $M=101$ σημεία (Αριστερά), (β) $M=51$ σημεία (Δεξιά).

3.6.4 Επίδραση της χωρικής ευκρίνειας των σημείων μέτρησης

Στη συνέχεια αξιολογείται η επίδραση της μείωσης του αριθμού των σημείων μέτρησης στις δυνατότητες ανίχνευσης της μεθόδου. Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες οι δύο ρωγμές βρίσκονται μακριά η μία από την άλλη, ο αριθμός των απαιτούμενων σημείων μέτρησης μπορεί να μειωθεί από $M = 301$ σε λιγότερα από $M = 51$ σημεία, όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 3-20. Ωστόσο, όπως αναμενόταν, στις περιπτώσεις όπου οι δύο ρωγμές είναι κοντά η μία στην άλλη, η μέθοδος ενδέχεται να τις αναγνωρίσει ως μία ενιαία

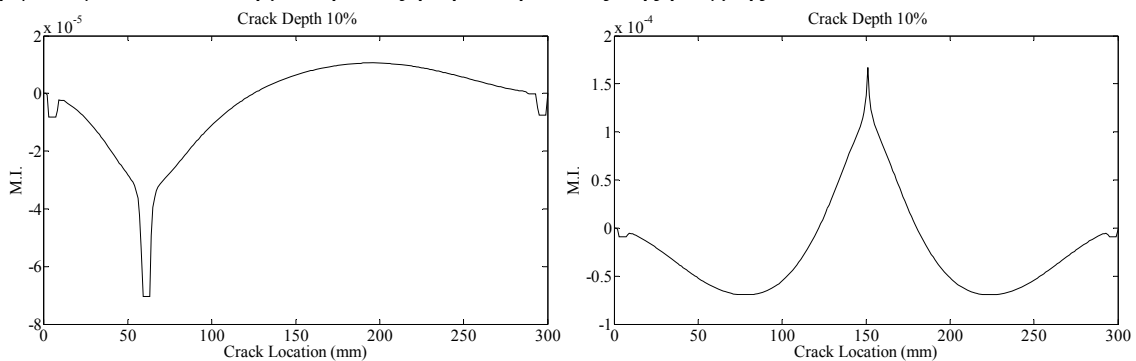
ρωγμή. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την αύξηση της ειδικής ευκρίνειας των σημείων μέτρησης μόνο σε τοπικό επίπεδο στις περιοχές πέριξ των ρωγμών.

3.7 Αξιολόγηση απόδοσης της προτεινόμενης προσέγγισης σε αμφιέριστη δοκό με ρωγμή

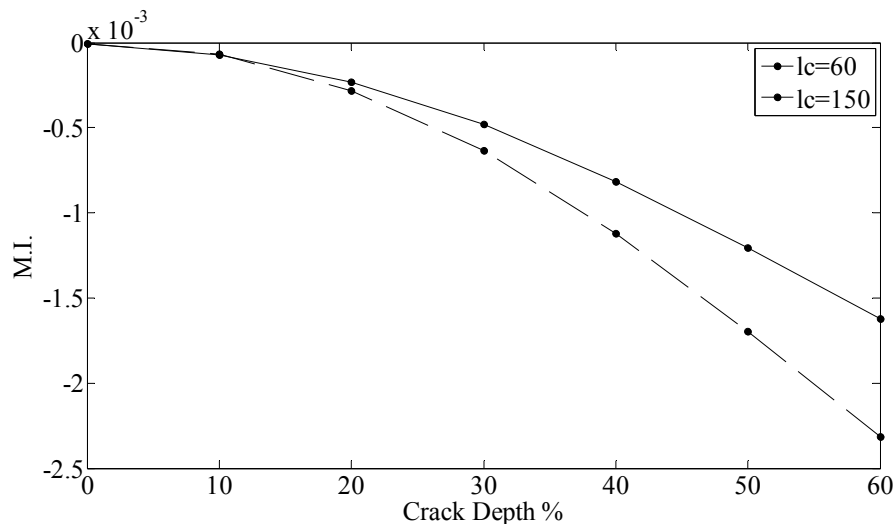
Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση των οριακών συνθηκών που υπαισέρχονται μέσω της στήριξης της δοκού. Χρησιμοποιείται πάλι ένα δισδιάστατο μοντέλο επίπεδης εντατικής κατάστασης, σύμφωνα με την ανάλυση της Ενότητας 3.4. Ωστόσο, αυτή τη φορά, η εξεταζόμενη δοκός είναι μια αμφιέριστη δοκός. Μια ή πολλαπλές ρωγμές εισάγονται κάθε φορά σε αποστάσεις $l_c=60$ mm και $l_c=150$ mm από την άκρη της δοκού. Το σχετικό βάθος της ρωγμής a τυπικά επιλέγονται ίσο με 10%, 20%, 30%, 40%, 50% και 60%. Οι μετρήσεις των εγκάρσιων μετατοπίσεων λαμβάνονται σε χωρικές αποστάσεις ανά 1 mm κατά το μήκος της δοκού, με αποτέλεσμα να είναι διαθέσιμος ένας αριθμός $M=301$ σημείων (χωρικές θέσεις). Ο τελεστής της Διάβρωσης με καμπύλο Δομικό Στοιχείο με μήκος ίσο με το ένα εξηκοστό ($1/60$) του συνολικού μήκους της δοκού χρησιμοποιείται σύμφωνα με τα αποτελέσματα της Ενότητας 3.5.

3.7.1 Καθορισμός της θέσης και του βάθους της ρωγμής

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-21, η μέθοδος δίνει και πάλι πολύ καλά αποτελέσματα, ακόμη και όταν το σχετικό βάθος της ρωγμής είναι της τάξης του 10%. Η εξέλιξη του βάθους της ρωγμής με βάση την τιμή του τελεστή της Διάβρωσης στη θέση της ρωγμής εξετάζεται πάλι. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-22, παρατηρείται και πάλι μια μονότονη αύξηση του μορφολογικού τελεστή με την αύξηση του βάθους της ρωγμής.



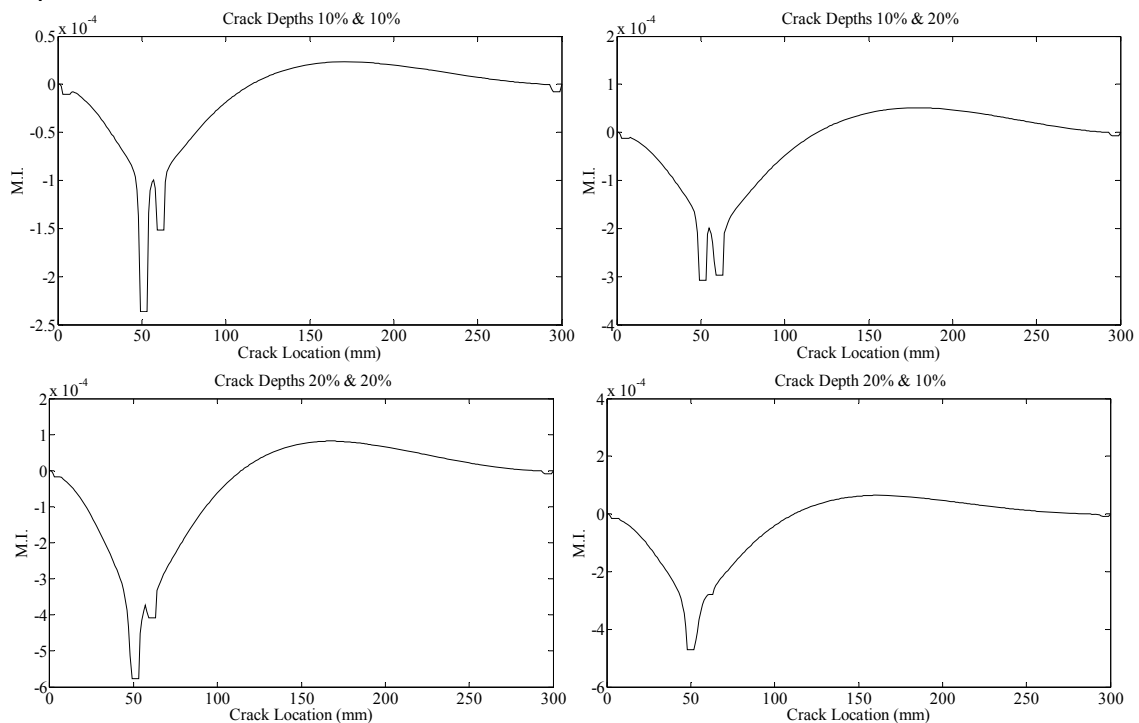
Σχήμα 3-21: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M. 1 με σχετικό βάθος ρωγμής 10%, ANL=0%, αμφιέριστη δοκό και (α) Θέση ρωγμής στα 60 mm (Αριστερά), (β) Θέση ρωγμής στα 150 mm (Δεξιά).



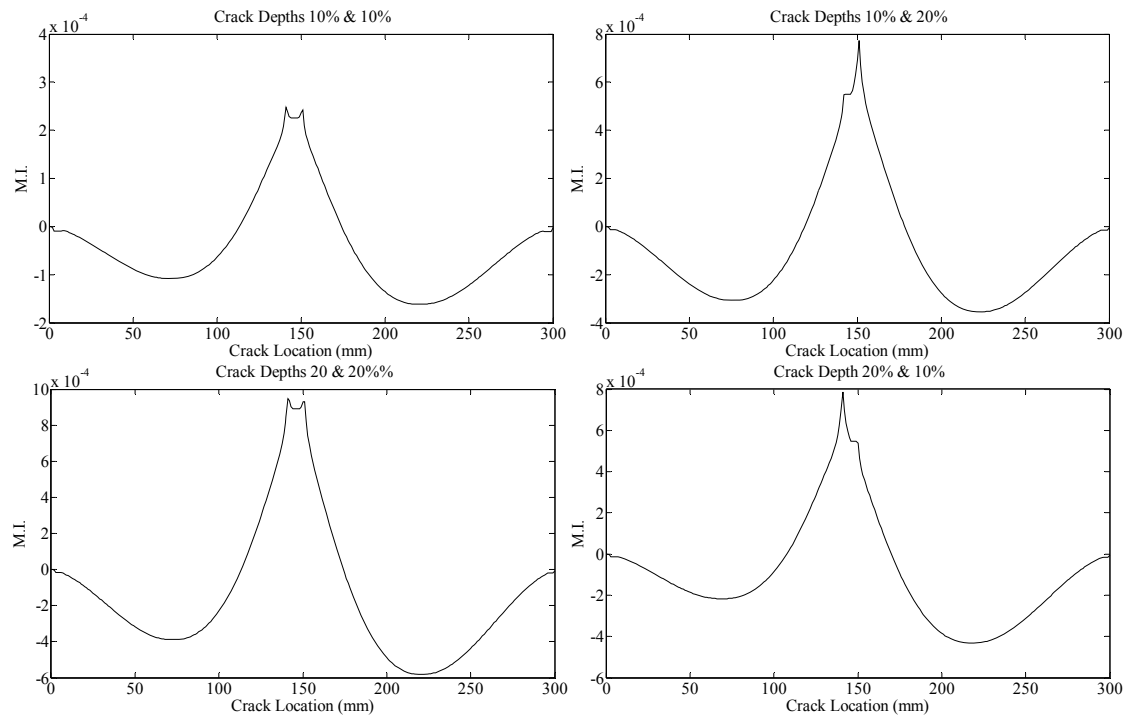
Σχήμα 3-22: Εξέλιξη του Μορφολογικού Δείκτη (Διάβρωση) σε δύο (2) διαφορετικές θέσεις και έξι (6) διαφορετικά σχετικά βάθη (ANL=0%, αμφιέριστη δοκός).

3.7.2 Επίδραση ύπαρξης πολλαπλών ρωγμών

Έπειτα, δύο αναπνέουσες ρωγμές εισάγονται ταυτόχρονα σε διάφορα σημεία της δοκού. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 3-23 και 3-24, αιχμές που αντιστοιχούν στη θέση των ρωγμών παρατηρούνται και πάλι. Οι αιχμές αυτές είναι ιδιαίτερες εμφανείς στην περίπτωση ρωγμών ίσου βάθους, με σχετικά βάθη ρωγμών ίσα με 10%. Ωστόσο, στην περίπτωση άνισων βαθών ρωγμών, η μέθοδος φτάνει στα όριά της, με τη ρωγμή με το μικρότερο βάθος να είναι μόλις ορατή.



Σχήμα 3-23: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 για δύο ρωγμές με θέσεις ρωγμής στα 50 mm και 60 mm, ANL=0%, αμφιέριστη δοκός, με διάφορα σχετικά βάθη ρωγμών.



Σχήμα 3-24: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 για δύο ρωγμές με θέσεις ρωγμής στα 140 mm και 150 mm, ANL=0%, αμφιέριστη δοκός, με διάφορα σχετικά βάθη ρωγμών.

3.7.3 Επίδραση του θορύβου

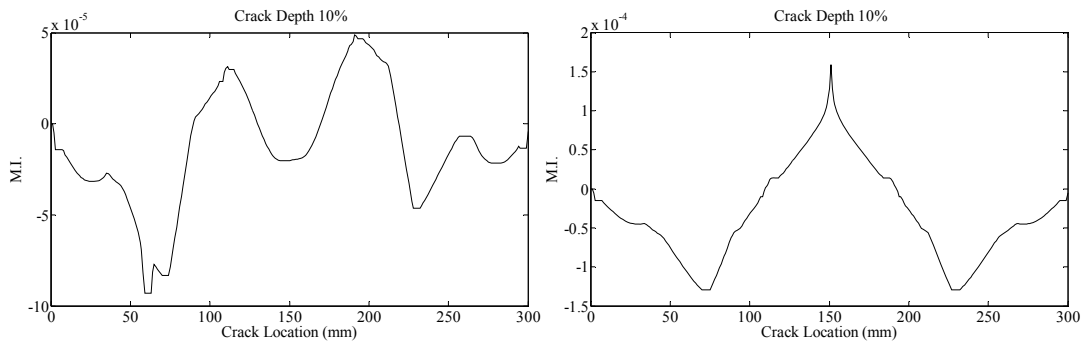
Προκειμένου να εξεταστούν οι επιπτώσεις του θορύβου και τα σφάλματα μέτρησης για την ευαισθησία της μεθόδου, τεχνητός θόρυβος προστέθηκε στις κυματομορφές των μετατοπίσεων, με ένα πρόσθετο επίπεδο θορύβου ANL μέχρι το ποσό του 30% (ποσό που κρίνεται ιδιαίτερος υψηλό). Στην περίπτωση μιας ενιαίας ρωγμής, τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά, ακόμη και για το μικρότερο βάθος ρωγμής του 10%, όταν η ρωγμή βρίσκεται στο μέσο της δοκού σε απόσταση $l_c = 150$ mm (Σχήμα 3-25).

Σε περίπτωση που μια ρωγμή που βρίσκεται σε απόσταση $l_c = 60$ mm, η ανίχνευση της θέσης της ρωγμής είναι πιο εύκολη στην περίπτωση των μεγάλων ρωγμών (μεγαλύτερες από 20%), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-26. Ωστόσο, παρατηρώντας το Σχήμα 3-25, είναι προφανές ότι στη χειρότερη περίπτωση, η οποία αντιστοιχεί σε μια θέση ρωγμής σε $l_c = 60$ mm, μια ρωγμή σχετικού βάθους 10% και με ANL 30%, παρουσιάζει τα όρια της ικανότητας ανίχνευσης της μεθόδου.

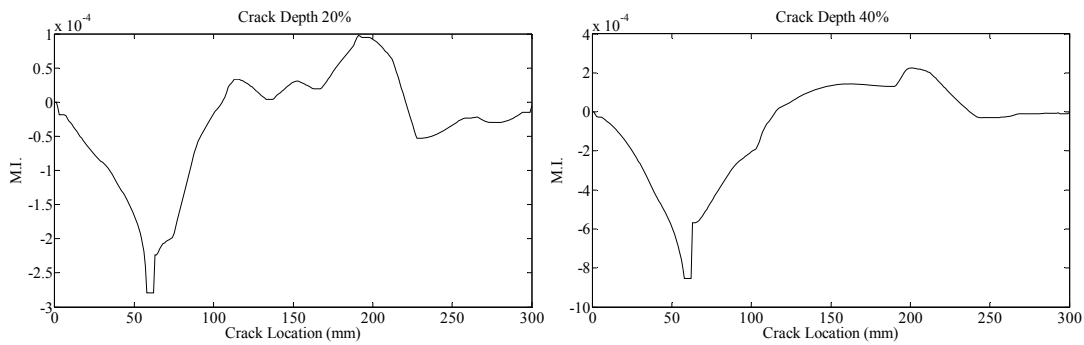
Η εξέλιξη του μορφολογικού δείκτη με την αύξηση του βάθους της ρωγμής παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-27. Αν και η μέθοδος έχει φτάσει τα όρια της ικανότητας ανίχνευσης της, ο μορφολογικός δείκτης είναι ακόμη σε θέση να ακολουθήσει την αύξηση του βάθους της ρωγμής.

Σε περίπτωση πολλαπλών ρωγμών, όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 3-28 και 3-29, η επίδραση του θορύβου είναι οριακή, σε σύγκριση με το αποτέλεσμα άνισων ρωγμών, όπως περιγράφεται στην ενότητα 3.7.2.

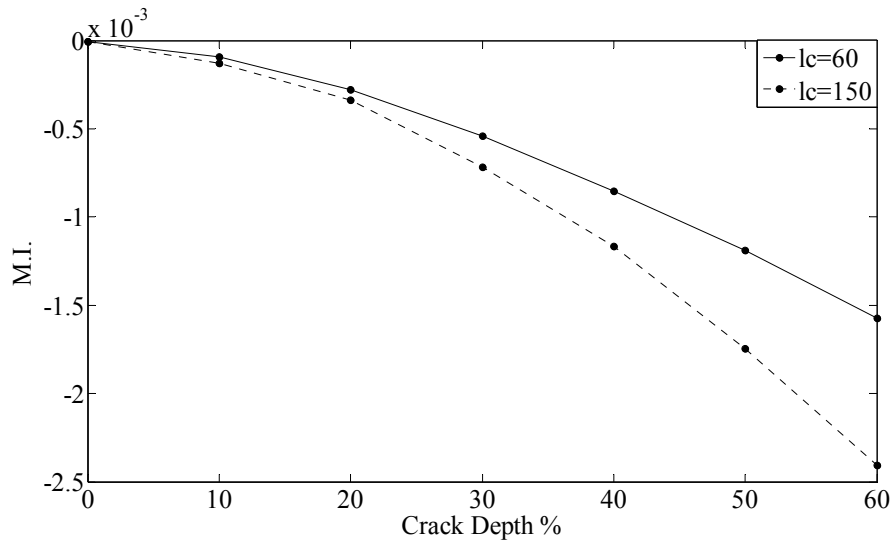
Μορφολογική Επεξεργασία Δυναμικής Απόκρισης Κατασκευών



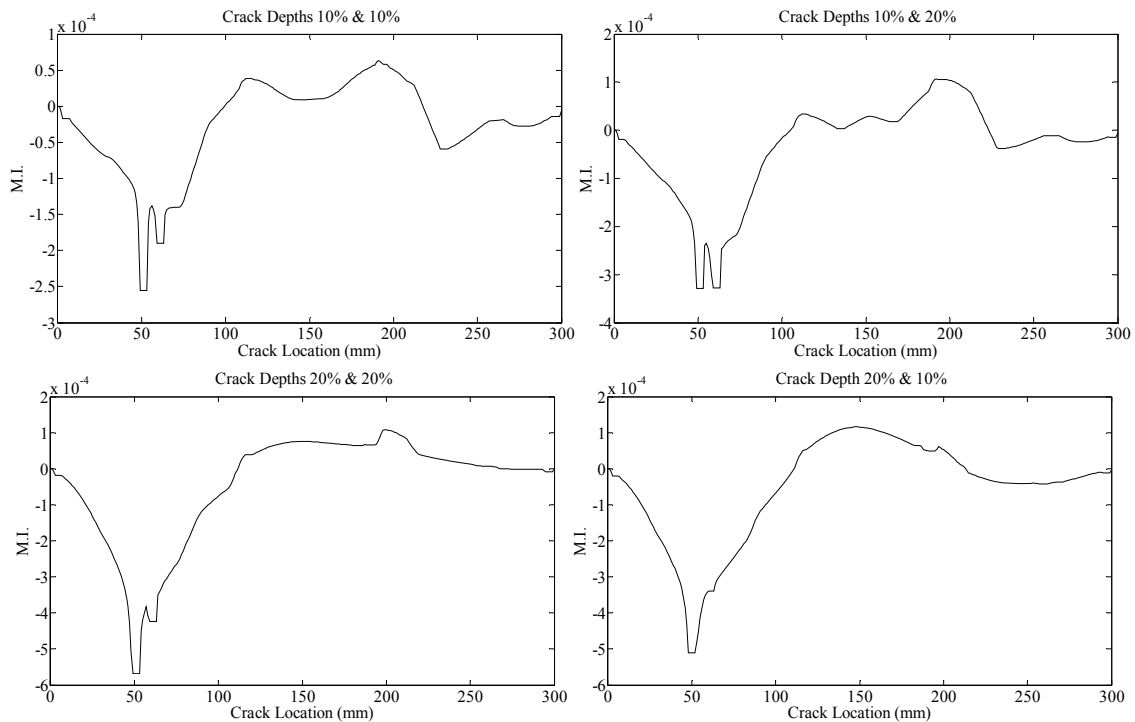
Σχήμα 3-25: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με σχετικό βάθος ρωγμής 10%, ANL=30%, αμφιέριστη δοκό και Θέση ρωγμής στα (α) 60 mm (Αριστερά), (β) 150mm (Δεξιά).



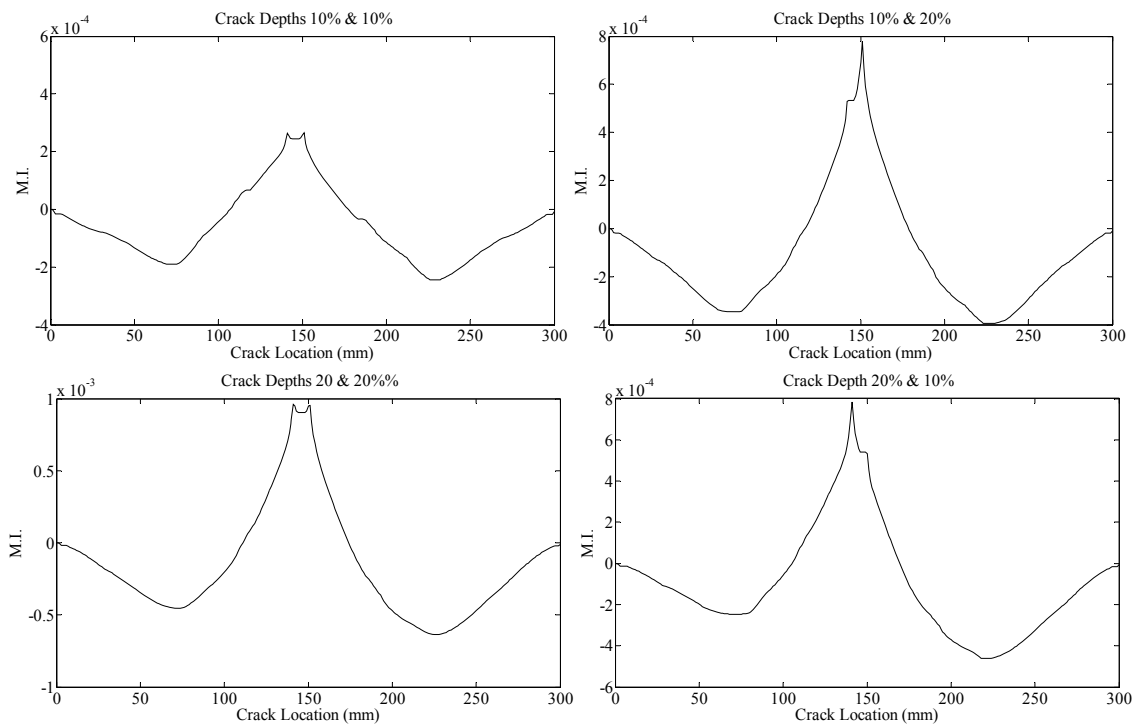
Σχήμα 3-26: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με θέση ρωγμής στα 60 mm, ANL=30%, αμφιέριστη δοκός και σχετικό βάθος ρωγμής (α) 20% (Αριστερά), (β) 40% (Δεξιά).



Σχήμα 3-27: Εξέλιξη του Μορφολογικού Δείκτη (Διάβρωση) σε δύο (2) διαφορετικές θέσεις και έξι (6) διαφορετικά σχετικά βάθη (ANL=30%, αμφιέριστη δοκός).



Σχήμα 3-28: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 για δύο ρωγμές με θέσεις στα 50 mm και 60 mm, ANL=30%, αμφιέριστη δοκός, με διάφορα σχετικά βάθη ρωγμών.

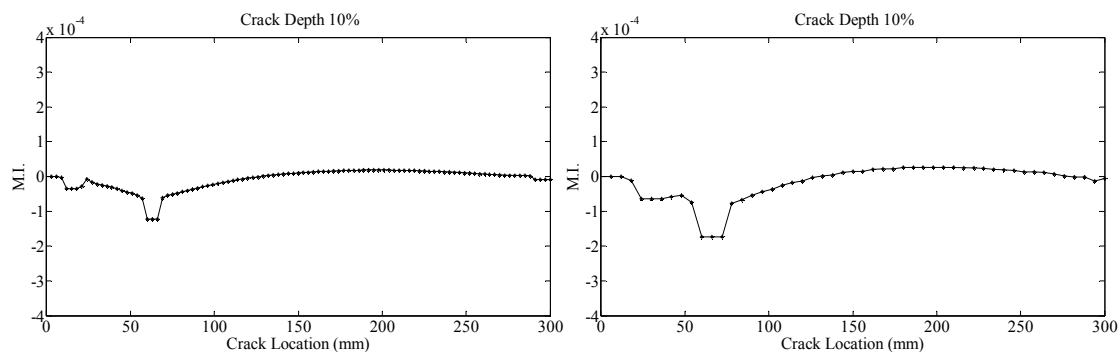


Σχήμα 3-29: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 για δύο ρωγμές με θέσεις στα 140 mm και 150 mm, ANL=30%, αμφιέριστη δοκός, με διάφορα σχετικά βάθη ρωγμών.

3.7.4 Επίδραση της χωρικής ευκρίνειας των σημείων μέτρησης

Στη συνέχεια αξιολογείται εκ νέου η επίδραση της μείωσης του αριθμού των σημείων μέτρησης στις δυνατότητες ανίχνευσης της μεθόδου. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μια δοκός με ρωγμή που βρίσκεται σε απόσταση $l_c = 60$ mm από το πακτωμένο άκρο της δοκού.

Παρατηρώντας το Σχήμα 3-30, ο αριθμός των απαιτούμενων σημείων μέτρησης μπορεί να μειωθεί από $M = 301$ σε λιγότερο από $M = 51$ σημεία. Ωστόσο, όπως αναμένεται και πάλι, στις περιπτώσεις όπου οι δύο ρωγμές είναι κοντά η μία στην άλλη, η μέθοδος ενδεχομένως να τις αναγνωρίσει ως μια ενιαία ρωγή. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί με την αύξηση της χωρικής ευκρίνειας των σημείων μέτρησης μόνο τοπικά στην περιοχή των ρωγμών.



Σχήμα 3-30: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με θέση ρωγμής στα 60 mm για σχετικό βάθος ρωγμής 10%, ANL=0%, αμφιέριστη δοκός, μήκος του δομικού στοιχείου ίσο με $L/100$ και αριθμό χρησιμοποιούμενων μετρούμενων σημείων (α) $M=101$ σημεία (Αριστερά), (β) $M= 51$ σημεία (Δεξιά).

3.8 Συμπεράσματα

Η σύγκριση των διαφόρων μοντέλων Πεπερασμένων Στοιχείων FEM (δισδιάστατο επίπεδης εντατικής κατάστασης, δισδιάστατο επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης, τρισδιάστατο), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση μιας πρόβολου δοκού με μια ρωγή, δείχνει ότι το δισδιάστατο μοντέλο επίπεδης εντατικής κατάστασης μπορεί με ακρίβεια και αξιοπιστία να μοντελοποιήσει το αποτέλεσμα της εμφάνισης μιας ρωγμής σε μια κατασκευή, ανεξάρτητα αν η ρωγή είναι ανοικτή, κλειστή ή την “αναπνέουσα”. Από τους τέσσερις βασικούς μορφολογικούς τελεστές, δηλαδή την Διάβρωση, την Διαστολή, το Άνοιγμα, και το Κλείσιμο, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των Κανονικών Ορθογώνιων Μορφών μιας δοκού με ρωγή, ο τελεστής Διάβρωση χρησιμοποιώντας ένα καμπύλο Δομικό Στοιχείο παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά.

Η προτεινόμενη μέθοδος, όπως αξιολογήθηκε σε μια πρόβολου και μια αμφιέριστη δοκό, μπορεί να οδηγήσει στην αποτελεσματική ανίχνευση τόσο της θέσης της ρωγμής όσο και του μεγέθους της. Λόγω του γεγονότος ότι τα POMs χρησιμοποιούνται αντί των ιδιομορφών, μη-γραμμικά αποτελέσματα μπορούν να λαμβάνονται υπόψη και οι επιπτώσεις του θορύβου μπορούν να εξαλειφθούν. Ο μορφολογικός δείκτης μπορεί να παρακολουθήσει την εξέλιξη του βάθους της ρωγμής, ακόμη και όταν ο λόγος σήματος προς θόρυβο φτάνει στο 30%. Τα αποτελέσματα γίνονται σαφέστερα όταν περισσότερα από ένα POM χρησιμοποιούνται. Στην περίπτωση δοκών με δύο ρωγμές, η ανάλυση των επιπτώσεων των διαφόρων βαθών ρωγμών, του επιπέδου θορύβου και της χωρικής διακριτικής ικανότητας των σημείων μέτρησης δείχνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί επίσης να παρουσιάσει εύρωστα αποτελέσματα.

Equation Section (Next)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μέθοδοι Αυτόματης Διάγνωσης Βλαβών

4.1 Εισαγωγή

Οι ένσφαιροι τριβείς αποτελούν ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα βιομηχανικά στοιχεία μηχανών, καθώς αποτελούν το στοιχείο σύνδεσης μεταξύ του σταθερού και του περιστρεφόμενου τμήματος της μηχανής. Η ικανότητα για γρήγορο, ακριβή και εύκολο εντοπισμό της ύπαρξης και της σοβαρότητας μιας βλάβης σε μια εγκατάσταση κατά την διάρκεια της λειτουργίας της είναι πολύ σημαντική, καθώς μια αναπάντεχη – απρόοπτη αστοχία της μηχανής μπορεί να οδηγήσει σε ανεπίτρεπτα μεγάλες διακοπές συντήρησης. Κατά συνέπεια, εξαιτίας της σημασίας τους, μια πληθώρα μεθόδων παρακολούθησης και προσεγγίσεις διάγνωσης βλαβών έχουν αναπτυχθεί για ένσφαιρους τριβείς.

Οι παραδοσιακές μηχανικές προσεγγίσεις – όπως η HFRT – απαιτούν έμπειρους χρήστες. Για τον λόγο αυτό, ένας εντυπωσιακός αριθμός μεθόδων έχει παρουσιαστεί για τον εντοπισμό βλαβών ένσφαιρων τριβέων και γενικότερα για την Παρακολούθηση Κατάστασης Μηχανής (Machine Condition Monitoring), που βασίζονται σε ευφυή και/ή έμπειρα συστήματα. Οι μέθοδοι αυτοί περιλαμβάνουν Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks - ANN), Ασαφή Έμπειρα Συστήματα (Fuzzy Expert Systems), Συλλογιστική βασισμένη σε Περιπτώσεις (Condition-Based Reasoning), Τυχαία Δάση (Random Forest) κλπ. Οι Τεχνητές Ευφυείς τεχνικές (Artificial intelligent) συνδυάζονται με έμπειρα συστήματα, επιχειρώντας να μεταφέρουν την εμπειρία από τον άνθρωπο στα υπολογιστικά συστήματα.

Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις ANN έχουν περιορισμούς στην γενίκευση (generalization), αναδεικνύοντας μοντέλα που μπορούν να υπερπροσαρμοστούν στα δεδομένα. Επιπλέον, ένα μεγάλο μειονέκτημα των ANNs, όπως επίσης και όλων των μεθόδων επιβλεπόμενης μάθησης (supervised learning methods), είναι η ανάγκη - απαίτηση ενός συγκεκριμένου (σχετικά μεγάλου) αριθμού δειγμάτων δεδομένων για εκπαίδευση. Ως δεδομένα εκπαίδευσης, χρησιμοποιούνται συχνά εμπειρικά μοντελοποιημένα δεδομένα (empirical modeled data) ή παραδείγματα. Επιπροσθέτως, συνήθως υπάρχει έλλειψη ενός αναλυτικού μοντέλου προσομοίωσης της μηχανής.

Προς την κατεύθυνση αυτή, μεταξύ διαφόρων αυτόματων διαγνωστικών μεθόδων, η μέθοδος Μηχανής Διανυσματικής Υποστήριξης (Support Vector Machine) παρουσιάζει έναν

αριθμό πλεονεκτημάτων. Αποτελεί μια σχετικά νέα υπολογιστική μέθοδος εκμάθησης βασισμένη στην Θεωρία Στατιστικής Εκμάθησης (Statistical Learning Theory) και συνδυάζει τις θεμελιώδεις έννοιες και αρχές που σχετίζονται με την εκμάθηση, την σαφώς καθορισμένη χάραξη και την αυτο-συνεπή μαθηματική θεωρία. Σε αντίθεση με τις περισσότερες μεθόδους ταξινόμησης, οι Μηχανές Διανυσματικής Υποστήριξης (Support Vector machines - SVM) δεν απαιτούν μεγάλο αριθμό δειγμάτων δεδομένων [Burges 1998], [Gunn 1998]. Επιπλέον, η μέθοδος SVM μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα εκμάθησης ακόμα και όταν μόνο ένα μικρό σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης είναι διαθέσιμο. Εξαιτίας του γεγονότος ότι είναι δύσκολο να αποκτηθούν ικανοποιητικός αριθμός δειγμάτων με βλάβη στην πράξη, η SVM παρουσιάστηκε στην παρακολούθηση της κατάστασης λειτουργίας μηχανής εξαιτίας την μεγάλης ακρίβειάς της και της καλής γενίκευσης της για μικρό αριθμό δειγμάτων. Οι δυνατότητες χρησιμοποίησης των SVMs στην διάγνωση βλαβών ένσφαιρων τριβέων, και γενικότερα στην Παρακολούθηση Κατάστασης της Υγείας της Μηχανής (Machine Health Condition Monitoring), έχει πρόσφατα μελετηθεί και διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν προταθεί.

Οι Jack και Nandi [Jack and Nandi 2001] εξέτασαν την επίδοση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (Artificial Neural Networks - ANN) και των Μηχανών διανυσματικής Υποστήριξης (Support Vector Machines - SVMs) σε ένα δεδομένο σενάριο, ένα παράδειγμα χαρακτηρισμού βλάβης πολλών κλάσεων. Ένας αριθμός διαφορετικών ειδών προεπεξεργασίας χρησιμοποιήθηκαν, περιλαμβάνοντας στοιχειώδης στατιστική, προσθέσεις και αφαιρέσεις σήματος, Υψίσυχο και χαμηλόσυχο φιλτράρισμα καθώς επίσης και δεδομένα φάσματος από το πεδίο συχνότητας. Τα SVMs εμφάνισαν στην χειρότερη περίπτωση αποτελέσματα συγκρινόμενα με το καλύτερα ANN. Η τιμή της παραμέτρου του πυρήνα που απαιτείται για καλή επίδοση ταξινόμησης επιλέχτηκε χρησιμοποιώντας μια μέση τιμή της τυπικής απόκλισης όλων των μελών της δεδομένης κλάσης (class). Οι Jack και Nandi [Jack and Nandi 2002] χρησιμοποίησαν Γενετικούς Αλγόριθμους (Genetic Algorithms) με σκοπό την επιλογή της παραμέτρου πυρήνα. Μόνο η χωριζόμενη (separable) περίπτωση εξετάζεται (Ο όρος ποινής λανθασμένης ταξινόμησης (misclassification penalization term) θεωρείται ίσος με άπειρο). Οι Rojas και Nandi [Rojas and Nandi 2006] πρότειναν έναν μηχανισμό για την επιλογή ικανοποιητικών παραμέτρων εκπαίδευσης.

Ο Samanta [Samanta et al. 2003] παρουσίασε μερικά αποτελέσματα για την διάγνωση της κατάστασης ένσφαιρων τριβέων χρησιμοποιώντας σήματα κραδασμών. Συγκρίσεις πραγματοποιούνται μεταξύ της επίδοσης των ANNs και των SVMs, χωρίς και με αυτόματη επιλογή των χαρακτηριστικών και των παραμέτρων ταξινόμησης. Η βασική διαφορά ανάμεσα στο [Samanta et al. 2003] και το [Jack and Nandi 2002] είναι η διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών από το χρονικό σήμα. Η επιλογή των χαρακτηριστικών εισόδου και των παραμέτρων του ταξινομητή βελτιστοποιούνται χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση βασιζόμενη στους Γενετικούς Αλγόριθμους.

Ο Yang [Yang et al. 2005] παρουσίασαν ένα σύστημα διάγνωσης βλαβών βασιζόμενο σε SVMs πολλών κλάσεων για περιστρεφόμενο μηχανολογικό εξοπλισμό (rotating machinery). Το άρθρο αυτό προσφέρει μια σύγκριση δύο ειδών αλγορίθμων, των SVMs και άλλων παραδοσιακών Νευρωνικών Δικτύων, όπως ο Αυτοοργανώμενος Χάρτης Δεδομένων

(Self-Organizing Feature Map - SOFM), η Διανυσματική Κβαντοποίηση Εκμάθησης (Learning Vector Quantization - LVQ), η Συνάρτηση Ακτινικής Βάσης (Radial Basic Function - RBF) και τα Δίκτυα Θεωρίας Προσαρμοζόμενου Συντονισμού (Adaptive Resonance Theory - ART Networks). Τα πειράματα απέδειξαν ότι η προσέγγιση αυτή μπορεί επιτυχώς να διαγνώσει κάθε κατάσταση και η μέση τιμή της ακρίβειας διάγνωσης της βλάβης είναι άνω του 90%.

Ο Yang εφήρμοσε την διάσταση χωρητικότητας (capacity dimension), την διάσταση πληροφορίας (information dimension) και την διάσταση συσχέτισης (correlation dimension) για να ταξινομήσουν τους διάφορους τύπους βλάβης και να αξιολογήσουν τις ποικίλες συνθήκες βλάβης ένσφαιρων τριβέων, ενώ η επίδοση ταξινόμησης της κάθε μορφοκλασματικής διάστασης (fractal dimension) και των συνδυασμών τους αξιολογούνται χρησιμοποιώντας SVMs [Yang et al. 2007]. Πειράματα έδειξαν ότι η απόδοση ταξινόμησης μίας μόνο μορφοκλασματικής διάστασης (fractal dimension) είναι σχετικά φτωχή στα περισσότερα σύνολα δεδομένων. Επιπλέον, η επίδοση ταξινόμησης του SVM εκπαιδευμένου με έντεκα στατιστικά χαρακτηριστικά από το πεδίο του χρόνου παράλληλα με τρεις μορφοκλασματικές διαστάσεις υπερτερεί της επίδοσης του SVM που εκπαιδεύτηκε με μόνο τα έντεκα στατιστικά χαρακτηριστικά από το πεδίο του χρόνου ή μόνο με τις τρεις μορφοκλασματικές διαστάσεις.

Στο [Hu et al. 2007] μια πρωτότυπη μέθοδος για διάγνωση βλαβών βασισμένη σε έναν βελτιωμένο μετασχηματισμό κυματιδιακών πακέτων (Improved Wavelet Package Transform - IWPT), μια τεχνική εκτίμησης απόστασης και τις Μηχανές Διανυσματικής Υποστήριξης (SVMs) ως ενιαίο σύνολο παρουσιάζεται. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται στη διάγνωση βλαβών ένσφαιρων τριβέων και τα αποτελέσματα ελέγχου δείχνουν ότι τα “συνολικά” SVMs μπορούν αξιόπιστα να χωρίσουν διαφορετικές καταστάσεις βλαβών και να αναγνωρίσουν την σοβαρότητα αρχικών βλαβών, που έχουν μια καλύτερη επίδοση ταξινόμησης συγκριτικά με τα μοναδικά SVMs.

Οι Yuan και Chu [Yuan and Chu 2007b] χρησιμοποίησαν έναν Αλγόριθμο Τεχνητής Ανοσοποίησης (Artificial Immunisation Algorithm - AIA) με σκοπό να βελτιστοποιήσουν τις παραμέτρους στο SVM. Η AIA είναι μια νέα μέθοδος βελτιστοποίησης βασισμένη στην βιολογική ανοσοποιητική αρχή του ανθρώπου και άλλων έμβιων όντων. Με τις παραμέτρους βελτιστοποιημένες από την AIA, η συνολική δυνατότητα του ταξινομητή SVM βελτιώνεται. Η διάγνωση βλαβών ενός υπερτροφοδοτούμενου στροφέα αντλίας (turbo pump rotor) δείχνει ότι το SVM βελτιστοποιημένο από AIA μπορεί να δώσει υψηλότερη ακρίβεια αναγνώρισης από ένα απλό SVM.

Στο [Yuan and Chu 2007a] μια νέα μέθοδος που από κοινού βελτιστοποιεί την επιλογή χαρακτηριστικών και τις παραμέτρους του SVM με έναν τροποποιημένη διακριτή βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization) παρουσιάζεται. Η νέα αυτή μέθοδος μπορεί να επιλέξει τα καλύτερα χαρακτηριστικά βλάβης σε συντομότερο χρόνο και βελτιώνει την απόδοση του ταξινομητή SVM, παρουσιάζοντας λιγότερα λάθη και μια καλύτερα ικανότητα πραγματικού χρόνου σε σχέση με την μέθοδο που βασίζεται στην Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (principal component analysis - PCA) και στα SVM, η στη μέθοδο που βασίζεται στους Γενετικούς Αλγόριθμους (Genetic Algorithm - GA) και στα

SVM, όπως φαίνεται στην εφαρμογή της διάγνωσης βλαβών ενός υπετροφοδοτούμενου στροφέα αντλίας.

Στο [Samanta and Nataraj 2009], μια μελέτη παρουσιάζεται επί της εφαρμογής της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO) συνδυασμένη με άλλες τεχνικές Υπολογιστικής Νοημοσύνης (Computational Intelligence - CI) για διάγνωση βλαβών ένσφαιρων τριβέων σε μηχανές. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με άλλες τεχνικές όπως οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithm - GA) και η Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis - PCA). Η προσέγγιση που βασίζεται στην PSO έδωσε ποσοστό επιτυχούς ταξινόμησης δοκιμών της τάξης του 98.6–100% που είναι συγκρινόμενο με τους GA και πολύ καλύτερο από το PCA. Τα αποτελέσματα δείχνουν την αποτελεσματικότητα των επιλεγμένων χαρακτηριστικών και των ταξινομητών στην ανίχνευση της κατάστασης μηχανής.

Ωστόσο, δύο βασικά προβλήματα ανακύπτουν στις παραπάνω διαδικασίες: (i) Πειραματικά δεδομένα της μηχανής υπό πραγματικές συνθήκες βλάβης απαιτούνται για την εκπαίδευσή τους. Τέτοια δεδομένα είναι πολύ δύσκολο να αποκτηθούν σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον, καθώς ούτε τεχνητά σφάλματα μπορούν να εισαχθούν στον βιομηχανικό εξοπλισμό εν λειτουργία, ούτε η εφαρμογή της διαγνωστικής διαδικασίας μπορεί να αναβληθεί μετά την εμφάνιση μιας πραγματικής βλάβης. (ii) Αρκετά πολύπλοκα σύνολα χαρακτηριστικών χρησιμοποιούνται, βασιζόμενα περισσότερο σε γενικά κριτήρια που εξάγονται από την Θεωρία Πληροφορίας (Information Theory) ή την στατιστική επεξεργασία, παρά σε χαρακτηριστικά και μεγέθη που απορρέουν από την μηχανολογική γνώση της συγκεκριμένης εφαρμογής. Τα δύο αυτά προβλήματα μπορούν να καταστήσουν τις παραπάνω μεθόδους πρακτικά ανεφάρμοστες σε βιομηχανικά περιβάλλοντα.

Με σκοπό να ξεπεραστούν τα δύο αυτά προβλήματα, η SVM προσέγγιση που προτείνεται στην ενότητα αυτή μπορεί να εκπαιδευτεί χρησιμοποιώντας προσομοιωμένα σήματα, που παράγονται από ένα καλά καθορισμένο μοντέλο που περιγράφει την δυναμική απόκριση φθαρμένων ένσφαιρων τριβέων ως αποτέλεσμα της εφαρμογής της “Τεχνικής Υψίσυχνου Συντονισμού” (High Frequency Resonance Technique - HFRT) [McFadden and Smith 1984a] με κατάλληλες επεκτάσεις και βελτιώσεις [Randall 1987], [Antoni and Randall 2002]. Μια βασική πτυχή της μεθόδου είναι η προσέγγιση προεπεξεργασίας δεδομένων, η οποία, μεταξύ άλλων, περιλαμβάνει την Ανάλυση Τάξης (order analysis), προκειμένου να ξεπεράσουν τα προβλήματα που σχετίζονται με απότομες μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής του άξονα. Επιπλέον, χαρακτηριστικά του πεδίου συχνότητας τόσο από το αρχικό, καθώς και από την αποδιαμορφωμένο σήμα χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στο SVM.

4.2 Θεωρία Στατιστικής Μάθησης (Statistical Learning Theory)

Μόλις τον 14^ο αιώνα ο Άγγλος φιλόσοφος Λογικής και φραγκισκανός μοναχός Γουλιέλμος του Όκαμ (William of Occam) διατύπωσε την επιστημονική αρχή “*Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem*”, που είναι γνωστή ως “Το ξυράφι του Όκαμ” και μεταφράζεται ως “Οι οντότητες δεν θα πρέπει να πολλαπλασιάζονται πέραν του απολύτως απαραίτητου”. Η αρχή αυτή αποτελεί την βάση της μεθοδολογικής απαγωγής και

αποκαλείται επίσης αρχή της οικονομίας. Μια άλλη διατύπωση της αρχής αυτής είναι: “*Pluralitas non est ponenda sine necessitate*” που μεταφράζεται ως εξής: “Κανείς δεν θα πρέπει να προβαίνει σε περισσότερες εικασίες από όσες είναι απαραίτητες”.

Στη μηχανική μάθηση (machine learning), “Το ξυράφι του Όκαμ” δηλώνει ότι η απλούστερη υπόθεση που ταιριάζει στα δεδομένα είναι η καλύτερη. Γενικά, καθώς η πολυπλοκότητα των μοντέλων μεγαλώνει, το ταίριασμα (fit) βελτιώνεται στο σύνολο εκπαίδευσης ενώ παράλληλα μπορεί να προκύψει υπερεκμάθηση (over-learning) με απώλεια της γενίκευσης (generalization) στο σύνολο ελέγχου-δοκιμών.

Ο άνθρωπος προσπαθεί να κατανοήσει το περιβάλλον του παρατηρώντας το και δημιουργώντας μια απλοποιημένη (αφαιρετική) εκδοχή του που ονομάζεται μοντέλο. Η δημιουργία ενός τέτοιου μοντέλου, ονομάζεται επαγωγική μάθηση (inductive learning) ενώ η διαδικασία γενικότερα ονομάζεται επαγωγή (induction). Επιπλέον ο άνθρωπος έχει την δυνατότητα να οργανώνει και να συσχετίζει τις εμπειρίες και τις παραστάσεις του δημιουργώντας νέες δομές που ονομάζονται πρότυπα (patterns). Η δημιουργία μοντέλων ή προτύπων από ένα σύνολο δεδομένων, από ένα υπολογιστικό σύστημα, ονομάζεται μηχανική μάθηση (machine learning). Έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τη φύση του προβλήματος και εμπίπτουν σε ένα από τα παρακάτω δύο είδη: Μάθηση με επίβλεψη (supervised learning) ή Μάθηση με παραδείγματα (learning from examples), Μάθηση χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning) ή μάθηση από παρατήρηση (learning from observation). Στη μάθηση με επίβλεψη το σύστημα καλείται να “μάθει” μια έννοια ή συνάρτηση από ένα σύνολο δεδομένων, η οποία αποτελεί περιγραφή ενός μοντέλου. Στη μάθηση χωρίς επίβλεψη το σύστημα πρέπει μόνο του να ανακαλύψει συσχετίσεις ή ομάδες σε ένα σύνολο δεδομένων, δημιουργώντας πρότυπα, χωρίς να είναι γνωστό αν υπάρχουν, πόσα και ποια είναι.

Στη μάθηση με επίβλεψη το σύστημα πρέπει να “μάθει” επαγωγικά μια συνάρτηση που ονομάζεται συνάρτηση στόχος (target function) και αποτελεί έκφραση του μοντέλου που περιγράφει τα δεδομένα. Η συνάρτηση στόχος χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της τιμής μιας μεταβλητής, που ονομάζεται εξαρτημένη μεταβλητή ή μεταβλητή εξόδου, βάσει των τιμών ενός συνόλου μεταβλητών, που ονομάζονται ανεξάρτητες μεταβλητές ή μεταβλητές εισόδου ή χαρακτηριστικά. Η επαγωγική μάθηση στηρίζεται στην “υπόθεση επαγωγικής μάθησης” (inductive learning hypothesis), σύμφωνα με την οποία:

Κάθε υπόθεση h που προσεγγίζει καλά τη συνάρτηση - στόχο για ένα αρκετά μεγάλο σύνολο παραδειγμάτων, θα προσεγγίζει το ίδιο καλά τη συνάρτηση - στόχο και για περιπτώσεις που δεν έχει εξετάσει.

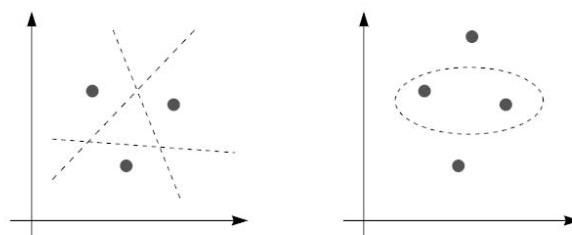
Στην μάθηση με επίβλεψη διακρίνονται δυο είδη προβλημάτων (learning tasks), τα προβλήματα ταξινόμησης και τα προβλήματα παρεμβολής.

- Η ταξινόμηση ή αλλιώς κατηγοριοποίηση (classification) αφορά στη δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης διακριτών τάξεων (κλάσεων / κατηγοριών) (π.χ. ομάδα αίματος).
- Η παρεμβολή (regression) αφορά στη δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης αριθμητικών τιμών (π.χ. πρόβλεψη ισοτιμίας νομισμάτων ή τιμής μετοχής).

Σήμερα το πρόβλημα της Εμπειρικής Μοντελοποίησης Δεδομένων (Empirical Data Modelling) σχετίζεται με πολλά πεδία εφαρμογής της Μηχανικής. Στην Εμπειρική Μοντελοποίηση Δεδομένων, μια επαγωγική διαδικασία χρησιμοποιείται για την κατασκευή ενός μοντέλου του συστήματος, από το οποίο ελπίζεται να εξαχθούν αποκρίσεις του συστήματος που δεν έχουν ή δεν μπορούν εύκολα να αποκτηθούν φυσικά. Τελικά η ποσότητα και η ποιότητα των παρατηρήσεων καθορίζουν την απόδοση του εμπειρικού μοντέλου. Όμως τα παρατηρούμενα φυσικά δεδομένα είναι πεπερασμένα και έχουν προκύψει κατόπιν δειγματοληψίας. Τυπικά η δειγματοληψία αυτή είναι ανομοιόμορφη και εξαιτίας της υψηλών διαστάσεων φύσης του προβλήματος τα δεδομένα θα σχηματίζουν μόνο μια αραιή (sparse) κατανομή στον διανυσματικό χώρο εισόδου. Κατά συνέπεια το πρόβλημα είναι σχεδόν πάντα ασθενώς ορισμένο με την έννοια του Hadamard [Hadamard 1923]. Τα παραδοσιακά Νευρωνικά Δίκτυα υποφέρουν από προβλήματα γενίκευσης καθώς παράγουν μοντέλα που μπορεί να υπερταυριάζουν (overfit) με τα δεδομένα, ως συνέπεια των αλγορίθμων βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται για την επιλογή παραμέτρων και των στατιστικών μέτρων που χρησιμοποιούνται για την επιλογή του “καλύτερου” μοντέλου. Τα θεμέλια των Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης (Support Vector Machines) αναπτύχθηκαν από τον Vapnik και αποκτούν ολοένα και περισσότερη δημοσιότητα χάρη στα πολλά ελκυστικά χαρακτηριστικά και τις ελπιδοφόρες εμπειρικές επιδόσεις.

Η διατύπωση των SVM ενσωματώνει την έννοια της Ελαχιστοποίησης Δομικού Κινδύνου (Structural Risk Minimisation - SRM), που έχει αποδειχθεί ότι είναι ανώτερη, από την έννοια της παραδοσιακής Ελαχιστοποίησης Εμπειρικού Κινδύνου (Empirical Risk Minimisation - ERM), που χρησιμοποιείται από τα συμβατικά Νευρωνικά Δίκτυα. Το SRM ελαχιστοποιεί το άνω όριο του αναμενόμενου κινδύνου σε αντίθεση με το ERM που ελαχιστοποιεί το σφάλμα στα δεδομένα εκπαίδευσης. Αυτή ακριβώς η διαφορά καθιστά την μέθοδο SVM ικανότερη για γενίκευση, που είναι ο στόχος στην Στατιστική Μάθηση (statistical learning). Τα SVMs αναπτύχθηκαν αρχικά για να λύσουν το πρόβλημα της Ταξινόμησης (Classification) αλλά πλέον έχουν επεκταθεί στο πεδίο των προβλημάτων Παρεμβολής – Παλινδρόμησης (Regression).

Για την επιλογή της πολυπλοκότητας του μοντέλου, εκτός από τις μεθόδους απλής Σταυρωτής Επικύρωσης (Cross Validation) εναλλακτικά χρησιμοποιούνται το Κριτήριο Πληροφορίας του Akaike, το Κριτήριο Πληροφορίας του Bayes και η Διάσταση Vapnik-Chervonenkis. Η τελευταία αποκαλύπτει πτυχές της ταξινόμησης με χρήση SVMs και για αυτό περιγράφεται λεπτομερώς παρακάτω.



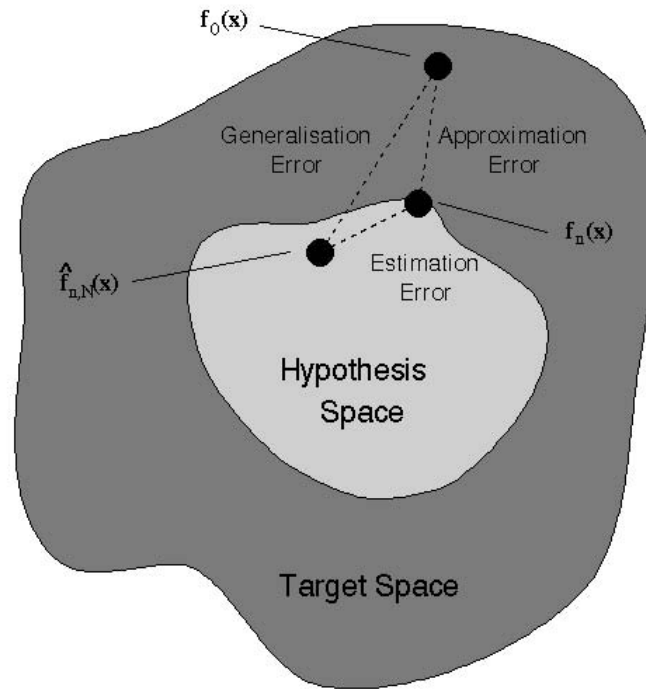
Σχήμα 4-1: Διάσταση VC.

Για την καλύτερη κατανόηση του ορισμού της διάστασης Vapnik-Chervonenkis χρησιμοποιείται ένα σύνολο συνεχών συναρτήσεων ταξινόμησης $h(\mathbf{x}, \mathbf{w})$ που μαθαίνουν να απεικονίζουν τα δεδομένα \mathbf{x} σε έναν χώρο y ρυθμίζοντας το \mathbf{w} . Η διάσταση Vapnik-Chervonenkis, d , είναι ένα μονοδιάστατο μέγεθος και αποτελεί ιδιότητα των συναρτήσεων ταξινόμησης $h(\mathbf{x}, \mathbf{w})$. Μετράει την χωρητικότητα των συναρτήσεων ταξινόμησης, δηλαδή πόση πολυπλοκότητα στα δεδομένα μπορεί η συνάρτηση να μοντελοποιήσει. Η διάσταση VC για ένα σύνολο συναρτήσεων ορίζεται ως ο μέγιστος αριθμός δειγμάτων εκπαίδευσης που μπορεί να κατακερματιστεί από την συνάρτηση $h(\mathbf{x}, \mathbf{w})$. Η συνάρτηση $h(\mathbf{x}, \mathbf{w})$ μπορεί να κατακερματίσει ένα σύνολο σημείων $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_M$ αν και μόνο αν για κάθε πιθανό σύνολο εκπαίδευσης της μορφής $(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_M, y_M)$ υπάρχει μια τιμή \mathbf{w} που καταλήγει σε σφάλμα εκπαίδευσης μηδέν [Vapnik 1995]. Για γραμμικές μηχανές εκπαίδευσης η VC διάσταση είναι ίση με $n+1$, όπου n είναι η διάσταση του χώρου, χωρίς όμως να ισχύει αυτό για όλα τα σύνολα των συναρτήσεων ταξινόμησης. Για παράδειγμα αν χρησιμοποιηθεί η οικογένεια των συναρτήσεων μίας παραμέτρου που ορίζεται ως $h(x, w) = \text{sign}(\sin(wx))$, $w, x \in \mathbb{R}^1$, το σύνολο των συναρτήσεων έχει μια άπειρη διάσταση VC, αν και έχει μόνο μία παράμετρο [Vapnik 1995].

4.3 Θεωρία Σφαλμάτων

Ο στόχος της Μοντελοποίησης είναι η επιλογή ενός μοντέλου από τον Χώρο Υπόθεσης που είναι πλησιέστερο (συγκριτικά με βάση κάποιες μετρήσεις σφάλματος) στην εξεταζόμενη συνάρτηση στο Χώρο Στόχου. Στην πορεία προς την επίτευξη του στόχου εμφανίζονται δύο ειδών σφάλματα, το Σφάλμα Προσέγγισης και το Σφάλμα Εκτίμησης:

- Το Σφάλμα Προσέγγισης (Approximation Error) είναι συνέπεια του γεγονότος ότι ο Χώρος Υπόθεσης είναι μικρότερος από τον Χώρο Στόχου και κατά συνέπεια η εξεταζόμενη λειτουργία μπορεί να βρίσκεται έχω από τον Χώρο Υπόθεσης. Η φτωχή επιλογή του Χώρου του Μοντέλου καταλήγει σε ένα μεγάλο Σφάλμα Προσέγγισης και αναφέρεται ως αναντιστοιχία μοντέλου.
- Το Σφάλμα Εκτίμησης (Estimation Error) είναι το σφάλμα που εμφανίζεται εξαιτίας της διαδικασίας μάθησης που καταλήγει σε μια τεχνική επιλογής του μη βέλτιστου μοντέλου από τον Χώρο Υπόθεσης.



Σχήμα 4-2: Σφάλματα Μοντελοποίησης.

Τα δύο Σφάλματα μαζί σχηματίζουν το Σφάλμα Γενίκευσης (Generalisation Error). Τελικά στόχος είναι η εύρεση μια συνάρτησης f που να ελαχιστοποιεί τον Κίνδυνο (Risk),

$$R[f] = \int_{X \times Y} L(y, h(\mathbf{x}, w)) dP(\mathbf{x}, y) = \int_{X \times Y} \frac{1}{2} |y - h(\mathbf{x}, w)| dP(\mathbf{x}, y) \quad (4.1)$$

όπου τα δεδομένα ελέγχου και εκπαίδευσης θεωρούνται ανεξάρτητα τοποθετημένα και ιδανικά κατανομημένα με μια σωρευτική κατανομή πιθανότητα $P(\mathbf{x}, y)$. Όταν η πυκνότητα $p(\mathbf{x}, y)$ υπάρχει, ο όρος $dP(\mathbf{x}, y)$ μπορεί να γραφεί ως $p(\mathbf{x}, y) dx dy$

Στις τυπικές περιπτώσεις η $P(\mathbf{x}, y)$ δεν είναι διαθέσιμη και οι περισσότεροι συμβατικοί αλγόριθμοι για μηχανές εκμάθησης στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του Εμπειρικού Κινδύνου,

$$R_{emp}[w] = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l L(y^i, h(x^i)) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l L(y - h(\mathbf{x}_i, w)) \quad (4.2)$$

που ελαχιστοποιεί τον εμπειρικό κίνδυνο,

$$\hat{h}_{n,l}(x) = \arg \min_{w \in H_n} R_{emp}[w] \quad (4.3)$$

Τέτοιο είδος αλγορίθμων δεν λαμβάνουν υπ' όψιν την χωρητικότητα της μηχανής εκπαίδευσης και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερταίριασμα, δηλαδή στη χρήση μιας μηχανής εκμάθησης με πολύ μεγάλη χωρητικότητα για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Η ελαχιστοποίηση του Εμπειρικού Κινδύνου έχει νόημα μόνο όταν,

$$\lim_{l \rightarrow \infty} R_{emp}[w] = R[w] \quad (4.4)$$

που ισχύει από τον Νόμο των Μεγάλων αριθμών. Βέβαια, πρέπει επίσης να ικανοποιείται,

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \min_{w \in H_n} R_{emp} [w] = \min_{w \in H_n} R [w] \quad (4.5)$$

που ισχύει μόνο όταν το H_n είναι “αρκετά” μικρό. Η συνθήκη αυτή είναι λιγότερο διαισθητική και απαιτεί την σύγκλιση και της ελάχιστης τιμής. Η αρχή της ελαχιστοποίησης του δομικού κινδύνου αναπτύχθηκε για να ξεπεράσει το προαναφερθέν πρόβλημα. Αντί για την ελαχιστοποίηση του εμπειρικού κινδύνου, στόχος της ελαχιστοποίησης δομικού κινδύνου είναι η εύρεση ενός ταξινομητή που να συμβιβάζεται μεταξύ μικρού εμπειρικού κινδύνου και μικρής χωρητικότητας.

Ελαχιστοποίηση Δομικού Κινδύνου (Structural Risk Minimisation)

Θεωρώντας μια δομή τέτοια ώστε S_d να είναι ένας χώρος υπόθεσης μιας d διάστασης VC, $S_1 \subset S_2 \subset \dots \subset S_\infty$, ο SRM υπολογίζεται επιλύοντας το παρακάτω πρόβλημα

$$\min_{S_d} R_{emp} [w] + \sqrt{\frac{d \ln \left(\frac{2l}{d} + 1 \right) - \ln \left(\frac{\delta}{4} \right)}{l}} \quad (4.6)$$

Με πιθανότητα $1-\delta$,

$$R [w] \leq R_{emp} [w] + \sqrt{\frac{d \ln \left(\frac{2l}{d} + 1 \right) - \ln \left(\frac{\delta}{4} \right)}{l}} \quad (4.7)$$

όπου d είναι η διάσταση VC του ταξινομητή. Η έκφραση αυτή για τον αναμενόμενο κίνδυνο είναι ανεξάρτητη από την κατανομή πιθανότητα. Το δεξί μέρος της σχέσης ονομάζεται επίσης “όριο κινδύνου” και ο δεύτερος όρος καλείται “VC εμπιστοσύνη”. Σημειώνεται ότι η σχέση δεν περιλαμβάνει $P(\mathbf{x}, y)$ και είναι εύκολη να υπολογιστεί εάν η διάσταση d είναι γνωστή. Κατά συνέπεια, εάν επιλεγθεί ένα μικρό δ και ένας ταξινομητής που ελαχιστοποιεί το δεξί μέλος της εξίσωσης, ο ταξινομητής είναι αυτός που δίνει το μικρότερο άνω όριο του πραγματικού κινδύνου. Αυτό είναι θεμελιώδης για την ελαχιστοποίηση του δομικού κινδύνου. Σημειώνεται ότι η VC εμπιστοσύνη αυξάνεται όταν η διάσταση VC αυξάνεται και μειώνεται όταν ο αριθμός των δειγμάτων αυξάνεται. Κατά συνέπεια, όταν εξετάζονται γραμμικές μηχανές εκμάθησης, όσο μεγαλύτερη είναι η διάσταση του χώρου χαρακτηριστικών τόσο περισσότερα δεδομένα εκπαίδευσης χρειάζονται για την επίτευξη καλής γενίκευσης του ταξινομητή. Οι υπολογιστικές δυσκολίες που προκύπτουν από διανύσματα χώρων χαρακτηριστικών μεγάλων διαστάσεων είναι προφανείς, όμως το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι επηρεάζουν επίσης την δυνατότητα γενίκευσης του ταξινομητή. Το φαινόμενο αυτό αποκαλείται “Κατάρρα” της διαστασιμότητας.

Οι Μηχανές Διανυσματικής Υποστήριξης είναι μηχανές εκμάθησης που είναι ικανές να αποφύγουν την “κατάρρα” της διαστασιμότητας όσον αφορά τόσο το υπολογιστικό κόστος όσο και την γενίκευση. Η θεωρία των Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης παρουσιάζεται αναλυτικά στα βιβλία [Vapnik 1995], [Cristianini and Shawe-Taylor 2000], [Kecman 2001] και σε ένα εγχειρίδιο [Burges 1998]. Η εφαρμογή τους σε προβλήματα ταξινόμησης παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

4.4 Βασικά Στοιχεία Θεωρίας Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης (SVM)

Η θεωρία των Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης (Support Vector Machine - SVM) παρουσιάστηκε συστηματικά από τους Vapnik και Chervonenkis προς το τέλος της δεκαετίας του '60. Ωστόσο, δεν ήταν παρά μετά τα μέσα της δεκαετίας του 1990 που οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για SVMs άρχισαν να ανακάμπτουν χάρη στην μεγάλη διαθεσιμότητα της υπολογιστικής δύναμης, που οδήγησε σε πολλές πρακτικές εφαρμογές. Η βασική ιδέα της SVM [Vapnik 1995], [Cristianini and Shawe-Taylor 2000Vapnik 1998] είναι να μετατρέπει το σήμα σε έναν χώρο χαρακτηριστικών ανώτερων διαστάσεων και να βρίσκει το βέλτιστο υπερεπίπεδο στο χώρο που μεγιστοποιεί το περιθώριο μεταξύ των τάξεων. Εν συντομία, το SVM λύνει ένα δυαδικό πρόβλημα όπου τα δεδομένα χωρίζονται από ένα υπερεπίπεδο. Το υπερεπίπεδο ορίζεται μέσω της χρήσης των Διανυσμάτων Υποστήριξης (Support Vectors), τα οποία αποτελούν ένα υποσύνολο των διαθέσιμων δεδομένων για τις δύο περιπτώσεις και καθορίζουν τα όρια μεταξύ των δύο κατηγοριών.

4.4.1 Γραμμικές Μηχανές Διανυσματικής Υποστήριξης

4.4.1.1 Διαχωρίσιμη Περίπτωση

Αρχικά παρουσιάζεται η πιο απλή περίπτωση: γραμμικές μηχανές που εκπαιδεύονται με διαχωρίσιμα δεδομένα (όπως παρουσιάζεται παρακάτω, η ανάλυση της γενικής περίπτωσης των μη γραμμικών μηχανών που εκπαιδεύονται με μη διαχωρίσιμα δεδομένα καταλήγει σε ένα παρόμοιο πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού). Για τα δεδομένα εκπαίδευσης χρησιμοποιείται ο ακόλουθος συμβολισμός $\{x_i, y_i\}, i = 1, \dots, l, y_i \in \{-1, 1\}, x_i \in \mathbf{R}^d$.

Θεωρούνται υπερεπίπεδα τα οποία διαχωρίζουν τα θετικά από τα αρνητικά παραδείγματα (ένα υπερεπίπεδο διαχωρισμού). Τα σημεία x που βρίσκονται στο υπερεπίπεδο ικανοποιούν την σχέση $w \cdot x + b = 0$, όπου το w είναι κάθετο στο υπερεπίπεδο, $|b|/\|w\|$ είναι η κατακόρυφη απόσταση του υπερεπιπέδου από την αρχή των αξόνων και $\|w\|$ είναι η Ευκλείδεια Νόρμα του w . Ορίζεται ως d_+ (d_-) ως η μικρότερη απόσταση του υπερεπιπέδου διαχωρισμού από το κοντινότερο θετικό (αρνητικό) παράδειγμα. Επίσης ορίζεται το "περιθώριο" του υπερεπιπέδου διαχωρισμού ίσο με $d_+ + d_-$. Για την γραμμικά διαχωρίσιμη περίπτωση, ο αλγόριθμος διανυσμάτων υποστήριξης απλά αναζητεί το διαχωριστικό επίπεδο με το μέγιστο περιθώριο. Το γεγονός αυτό μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: θεωρείται ότι όλα τα δεδομένα εκπαίδευσης ικανοποιούν τους παρακάτω περιορισμούς:

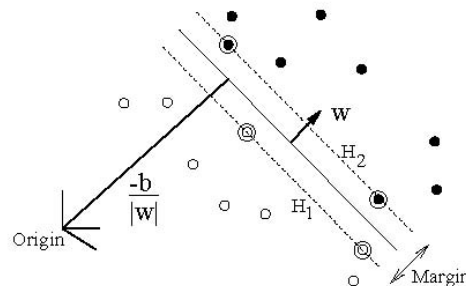
$$x_i \cdot w + b \geq +1 \text{ για } y_i = +1 \quad (4.8)$$

$$x_i \cdot w + b \leq -1 \text{ για } y_i = -1 \quad (4.9)$$

Οι δύο αυτές σχέσεις μπορούν να συνδυαστούν σε ένα σύνολο ανισοτήτων:

$$y_i (x_i \cdot w + b) - 1 \geq 0 \quad \forall i \quad (4.10)$$

Θεωρούνται τα σημεία για τα οποία ισχύει η ισότητα στη σχέση (4.8) (ζητώντας η ύπαρξη ενός τέτοιου σημείου είναι ισοδύναμη με την επιλογή της κλίμακας του \mathbf{w} και του b). Τα σημεία αυτά βρίσκονται στο υπερεπίπεδο $H_1 : \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{w} + b = 1$ με κάθετο \mathbf{w} και κατακόρυφη απόσταση από την αρχή των αξόνων $|1-b|/\|\mathbf{w}\|$. Παρόμοια, τα σημεία για τα οποία ισχύει η Σχέση (4.9) βρίσκονται στο υπερεπίπεδο $H_2 : \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{w} + b = -1$, με κάθετο \mathbf{w} πάλι και κατακόρυφη απόσταση από την αρχή των αξόνων $|-1-b|/\|\mathbf{w}\|$. Κατά συνέπεια $d_+ = d_- = 1/\|\mathbf{w}\|$ και το περιθώριο είναι ίσο με $2/\|\mathbf{w}\|$. Σημειώνεται ότι τα επίπεδα H_1 και H_2 είναι παράλληλα (έχουν την ίδια κάθετη) και ότι κανένα σημείο εκπαίδευσης δεν βρίσκεται μεταξύ τους. Κατά συνέπεια μπορεί να βρεθεί ένα ζεύγος υπερεπιπέδων που δίνει το μέγιστο περιθώριο ελαχιστοποιώντας το $\|\mathbf{w}\|^2$, υποκείμενο στους περιορισμούς (4.10).



Σχήμα 4-3: Γραμμικά Υπερεπίπεδα Διαχωρισμού για την διαχωρίσιμη περίπτωση. Οι Μηχανές Υποστήριξης είναι κυκλωμένες.

Σημειώνεται ότι η λύση αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι ολική. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα εξαιρετικό πλεονέκτημα συγκριτικά με τα MLPs ή τα RBF δίκτυα τα οποία μπορεί να έχουν πολλά τοπικά ελάχιστα και κατά συνέπεια συνήθως δεν είναι εγγυημένη η ολική βέλτιστη λύση.

Η λύση μιας τυπικής περίπτωσης δύο διαστάσεων αναμένεται να έχει την μορφή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-3. Τα σημεία εκπαίδευσης για τα οποία ισχύει η ισότητα της σχέσης (4.10) (δηλαδή, εκείνα τα οποία καταλήγουν σε ένα από τα υπερεπίπεδα H_1 και H_2) και η αφαίρεση τους θα άλλαζε την λύση που βρέθηκε, ονομάζονται Διανύσματα Υποστήριξης και παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-3 με επιπλέον κύκλους.

Στη συνέχεια χρησιμοποιείται μια διατύπωση Lagrange του προβλήματος. Υπάρχουν δύο λόγοι για αυτό. Ο πρώτος λόγος είναι ότι οι περιορισμοί (4.10) θα αντικατασταθούν από περιορισμούς στους ίδιους τους πολλαπλασιαστές Lagrange, που είναι πιο εύκολα χειριζόμενοι. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι στην αναδιατύπωση του προβλήματος, τα δεδομένα εκπαίδευσης θα εμφανίζονται μόνο (στους υπάρχοντες αλγορίθμους εκπαίδευσης και ελέγχου) στην μορφή εσωτερικών πηλίκων μεταξύ των διανυσμάτων. Η ιδιότητα αυτή είναι

ζωτικής σημασίας, γιατί επιτρέπει την γενίκευση της διαδικασίας στην μη γραμμική περίπτωση.

Κατά συνέπεια, εισάγονται θετικοί πολλαπλασιαστές Lagrange $a_i, i=1, \dots, l$, ένας για κάθε έναν από τους περιορισμούς ανισότητας (4.10). Υπενθυμίζεται ο κανόνας σύμφωνα με τον οποίο για περιορισμούς της μορφής $c_i \geq 0$, οι σχέσεις περιορισμού πολλαπλασιάζονται με θετικούς πολλαπλασιαστές Lagrange και αφαιρούνται από την αντικειμενική συνάρτηση για να σχηματιστεί η Lagrangian συνάρτηση. Για περιορισμούς ισότητας, οι πολλαπλασιαστές Lagrange δεν δεσμεύονται από περιορισμούς. Η Lagrangian συνάρτηση λαμβάνει την μορφή:

$$L_P = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^l a_i y_i (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{w} + b) + \sum_{i=1}^l a_i \quad (4.11)$$

Η L_P ελαχιστοποιείται ως προς w , b και ταυτόχρονα απαιτείται οι παράγωγοι της L_P ως προς όλα τα a_i να εξαφανίζονται, υποβαλλόμενα όλα στους περιορισμούς $a_i \geq 0$ (το συγκεκριμένο σύνολο περιορισμών θα ονομάζεται C_1). Το πρόβλημα πλέον είναι ένα κυρτό πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού καθώς η αντικειμενική συνάρτηση είναι κυρτή και τα σημεία που ικανοποιούν τους περιορισμούς σχηματίζουν επίσης ένα κυρτό σύνολο (κάθε γραμμικός περιορισμός ορίζει έναν κυρτό σύνολο και ένα σύνολο N ταυτόχρονων γραμμικών περιορισμών ορίζει την τομή των N κυρτών συνόλων, το οποίο είναι επίσης ένα κυρτό σύνολο). Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι μπορεί ισοδύναμα να επιλυθεί το ακόλουθο “διττό” (“dual”) πρόβλημα: Μεγιστοποίηση της Lagrangian συνάρτησης L_P , υπό τους περιορισμούς ότι η παράγωγος της L_P ως προς το w και το b εξαφανίζεται και υπόκειται επίσης στους περιορισμούς ότι $a_i \geq 0$ (το ιδιαίτερο αυτό σύνολο των περιορισμών θα αναφέρεται ως C_2). Η διττή αυτή διατύπωση του προβλήματος ονομάζεται διττό Wolfe [Fletcher 1987]. Παρουσιάζει την ιδιότητα, το μέγιστο της Lagrangian συνάρτησης L_P , υπό τους περιορισμούς C_2 , εμφανίζεται στις ίδιες τιμές των w , b και a , όπου εμφανίζεται το ελάχιστο της Lagrangian συνάρτησης L_P , υπό τους περιορισμούς C_1 .

Η απαίτηση, να εξαφανίζεται η παράγωγος της Lagrangian συνάρτησης L_P ως αναφορά τα w και b , δίνει τις παρακάτω συνθήκες:

$$\mathbf{w} = \sum_i a_i y_i \mathbf{x}_i \quad (4.12)$$

$$\sum_i a_i y_i = 0 \quad (4.13)$$

Εφόσον οι σχέσεις αυτές είναι περιορισμοί στην διττή διατύπωση, μπορούν να αντικατασταθούν στην σχέση (4.11):

$$L_D = \sum_i a_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} a_i a_j y_i y_j \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j \quad (4.14)$$

Σημειώνεται ότι έχει δοθεί διαφορετικό σύμβολο στην συνάρτηση Lagrangian (P για το αρχικό (primal), D για διττό (dual)) για να τονιστεί ότι οι δύο διατυπώσεις είναι διαφορετικές: οι L_P και L_D προέρχονται από την ίδια αντικειμενική συνάρτηση αλλά με διαφορετικούς περιορισμούς και η λύση βρίσκεται ελαχιστοποιώντας την L_P ή μεγιστοποιώντας την L_D . Σημειώνεται επίσης ότι αν το πρόβλημα διατυπωθεί με $b=0$, που καταλήγει να απαιτεί όλα τα υπερεπίπεδα να περιλαμβάνουν την αρχή των αξόνων, ο περιορισμός (4.13) δεν εμφανίζεται. Αυτό αποτελεί έναν ήπιο περιορισμό για χώρους υψηλών διαστάσεων, καθώς μειώνει τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας κατά έναν.

Η εκπαίδευση των Διανυσμάτων Υποστήριξης (για την γραμμικά διαχωρίσιμη περίπτωση καταλήγει κατά συνέπεια στην μεγιστοποίηση της L_D ως προς τα α_i , υπό τους περιορισμούς (4.13) και την θετικότητα των α_i , ενώ η λύση δίνεται από την σχέση (4.12). Σημειώνεται ότι υπάρχει ένας πολλαπλασιαστής Lagrange α_i , για κάθε σημείο εκπαίδευσης. Στην λύση, τα σημεία εκείνα για τα οποία $\alpha_i > 0$ καλούνται Διανύσματα Υποστήριξης και βρίσκονται σε ένα από τα υπερεπίπεδα H_1, H_2 . Όλα τα υπόλοιπα σημεία εκπαίδευσης έχουν $\alpha_i = 0$ και βρίσκονται πάνω στο υπερεπίπεδο H_1 ή στο H_2 (έτσι ώστε να ισχύει η ισότητα (4.10) ή σε εκείνη την πλευρά του H_1 ή του H_2 ώστε να ισχύει η αυστηρή ανισότητα της σχέσης (4.10). Για τις μηχανές αυτές, τα Διανύσματα Υποστήριξης είναι τα κρίσιμα στοιχεία του συνόλου εκπαίδευσης και δίνουν το όνομα στην μηχανή μάθησης γιατί αποδεικνύονται πολύ σημαντικά για την ταξινόμηση όσον αφορά την γενίκευση και τους υπολογισμούς. Τοποθετούνται κοντά στο όριο απόφασης και εάν όλα τα υπόλοιπα σημεία εκπαίδευσης αφαιρεθούν (ή μετακινηθούν χωρίς όμως να τέμνουν το H_1 ή το H_2), η επανάληψη της εκπαίδευσης θα οδηγήσει στην εύρεση του ίδιου υπερεπιπέδου διαχωρισμού. Προσφέρουν μια αραιή λύση στο πρόβλημα της ταξινόμησης ενώ ο Vapnik παρουσίασε ένα απλό και ισχυρό αποτέλεσμα που συνδέει τον αριθμό των Διανυσμάτων Υποστήριξης και την δυνατότητα γενίκευσης του ταξινομητή [Vapnik 1995]. Εάν τα δεδομένα εκπαίδευσης περιλαμβάνουν M δείγματα που διαχωρίζονται από τον υπερεπίπεδο μέγιστου περιθωρίου, το φράγμα της αναμενόμενης πιθανότητας του σφάλματος ελέγχου μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$E[P_{error}] \leq \frac{\#SV}{M} \quad (4.15)$$

όπου $\#SV$ είναι ο αριθμός των SVs. Η σχέση αυτή δίνει έναν εύκολο τρόπο για την εκτίμηση της ικανότητας γενίκευσης του ταξινομητή με ένα φράγμα που είναι ανεξάρτητο από την διαστασιμότητα του χώρου εισόδου.

4.4.1.2 Συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker

Οι Karush-Kuhn-Tucker (KKT) συνθήκες διαδραματίζουν έναν κεντρικό ρόλο τόσο στην θεωρία όσο και στην πρακτική της βελτιστοποίησης με περιορισμούς (Constrained Optimization). Για το παραπάνω διττό πρόβλημα, οι KKT συνθήκες ορίζονται ως [Fletcher 1987]:

$$\frac{\partial L_P}{\partial w_\nu} = w_\nu - \sum_i a_i y_i x_{i\nu} = 0 \quad \nu = 1, \dots, d \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial L_P}{\partial b} = -\sum_i a_i y_i = 0 \quad (4.17)$$

$$y_i (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{w} + b) - 1 \geq 0 \quad i = 1, \dots, l \quad (4.18)$$

$$a_i \geq 0 \quad \forall i \quad (4.19)$$

$$a_i (y_i (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{w} + b) - 1) = 0 \quad \forall i \quad (4.20)$$

Οι συνθήκες KKT ικανοποιούνται στη επίλυση κάθε προβλήματος βελτιστοποίησης με περιορισμούς (κυρτό ή όχι), με οποιοδήποτε είδος περιορισμών, δεδομένου ότι η τομή του συνόλου των εφικτών κατευθύνσεων για γραμμικούς περιορισμούς με το σύνολο των διευθύνσεων καθόδου [Fletcher 1987], [McCormick 1983]. Η υπόθεση τεχνητής ομαλότητας ισχύει για όλες τις μηχανές διανυσματικής υποστήριξης, καθώς οι περιορισμοί είναι πάντα γραμμικοί. Επιπλέον το πρόβλημα των SVMs είναι κυρτό (μια κυρτή αντικειμενική συνάρτηση, με περιορισμούς που δίνουν εφικτή κυρτή περιοχή) και για κυρτά προβλήματα (εάν ισχύει η συνθήκη ομαλότητας), οι συνθήκες KKT είναι απαραίτητες και ικανές ώστε τα \mathbf{w} , b και a να είναι μία λύση [Fletcher 1987]. Κατά συνέπεια, η επίλυση του προβλήματος SVM είναι ισοδύναμο με την επίλυση των συνθηκών KKT, Το γεγονός αυτό καταλήγει σε διάφορες προσεγγίσεις για την εύρεση λύσης.

Ως μια άμεση εφαρμογή, σημειώνεται ότι ενώ το \mathbf{w} είναι καθορισμένο από υπολογιστική σχέση της μορφής $y = f(x)$ κατά την διαδικασία εκπαίδευσης, το όριο (threshold) b δεν είναι, αν και υπολογίζεται από σχέση της μορφής $R(x,y) = 0$. Όμως το b βρίσκεται εύκολα χρησιμοποιώντας την “συμπληρωματική” συνθήκη KKT της σχέσης (4.20) επιλέγοντας κάποιο i για το οποίο ισχύει $a_i \neq 0$ και υπολογίζοντας το b (επισημαίνεται ότι είναι αριθμητικά ασφαλέστερο να λαμβάνεται η μέση τιμή των b που υπολογίζονται από όλες αυτές τις σχέσεις).

4.4.2 Μη διαχωρίσιμη περίπτωση

Ο παραπάνω αλγόριθμος για διαχωρίσιμα δεδομένα, αν εφαρμοστεί σε μη διαχωρίσιμα δεδομένα, δεν θα οδηγήσει σε εφικτή λύση. Αυτό είναι εμφανές από την αντικειμενική συνάρτηση (π.χ. την διττή Lagrangian) που μεγαλώνει τυχαία. Για να επέκταση των προαναφερθέντων ιδεών στην μη διαχωρίσιμη περίπτωση πρέπει να χαλαρώσουν οι περιορισμοί (4.8) και (4.9), όμως μόνο όταν είναι απαραίτητο, δηλαδή πρέπει να εισαχθεί ένα επιπλέον κόστος, μια αύξηση στη αρχική αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί εισάγοντας θετικές μεταβλητές χαλάρωσης ξ_i , $i=1, \dots, l$ στους περιορισμούς [Cortes and Vapnik 1995], οι οποίοι γίνονται:

$$\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{w} + b \geq +1 - \xi_i \quad \text{για } y_i = +1 \quad (4.21)$$

$$\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{w} + b \leq -1 + \xi_i \quad \text{για } y_i = -1 \quad (4.22)$$

$$\xi_i \geq 0 \quad \forall i \quad (4.23)$$

Κατά συνέπεια, για να προκύψει ένα σφάλμα, το αντίστοιχο ξ_i πρέπει να ξεπεράσει την μονάδα κι έτσι το $\sum_i \xi_i$ είναι ένα άνω όριο στον αριθμό των σφαλμάτων εκπαίδευσης. Έτσι ένα φυσικός τρόπος για να ανατεθεί ένα παραπάνω κόστος για σφάλματα είναι να αλλαχθεί η αντικειμενική συνάρτηση και αντί από $\|w\|^2 / 2$ να ελαχιστοποιείται από $\|w\|^2 / 2 + C \left(\sum_i \xi_i \right)^k$. Η παράμετρος C επιλέγεται από τον χρήστη και μεγάλη τιμή αντιστοιχεί σε μεγάλη ποινή στα σφάλματα. Η διατύπωση αυτή δείχνει ένα κυρτό πρόβλημα προγραμματισμού για κάθε θετικό ακέραιο k . Για $k=2$ και $k=1$ το πρόβλημα είναι επίσης πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού ενώ η επιλογή $k=1$ έχει το επιπλέον πλεονέκτημα ότι ούτε τα ξ_i ούτε οι πολλαπλασιαστές τους Langrange εμφανίζονται στο Wolfe διττό πρόβλημα, το οποίο καθίσταται:

Μεγιστοποίηση:

$$L_D = \sum_i a_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} a_i a_j y_i y_j \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j \quad (4.24)$$

υπό τους περιορισμούς:

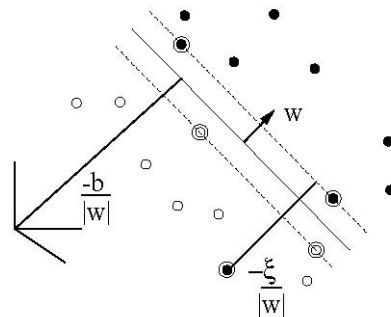
$$0 \leq a_i \leq C \quad (4.25)$$

$$\sum_i a_i y_i = 0 \quad (4.26)$$

Η λύση δίνεται πάλι από την σχέση

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^{N_S} a_i y_i \mathbf{x}_i \quad (4.27)$$

όπου N_S είναι ο αριθμός των Διανυσμάτων Υποστήριξης. Κατά συνέπεια η μόνη διαφορά από την περίπτωση βέλτιστου υπερεπιπέδου είναι ότι τα a_i παρουσιάζουν ένα άνω όριο της παραμέτρου C . Η κατάσταση συνοπτικά περιγράφεται στο Σχήμα 4-4.



Σχήμα 4-4: Γραμμικά Υπερεπίπεδα Διαχωρισμού για την μη διαχωρίσιμη περίπτωση.

Οι Karush-Kuhn-Tucker συνθήκες χρησιμοποιούνται για το αρχικό πρόβλημα. Η αρχική Lagrangian είναι

$$L_p = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_i \xi_i - \sum_i a_i \{y_i (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{w} + b) - 1 + \xi_i\} - \sum_i \mu_i \xi_i \quad (4.28)$$

όπου τα μ_i είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange που εισάγονται για να επιβάλλουν την θετικότητα των ξ_i . Οι συνθήκες KKT για το αρχικό πρόβλημα είναι κατά συνέπεια (σημειώνεται ότι το i λαμβάνει τιμές από ένα (1) έως τον αριθμό των σημείων εκπαίδευσης και το v από ένα (1) έως την διάσταση των δεδομένων)

$$\frac{\partial L_p}{\partial w_v} = w_v - \sum_i a_i y_i x_{iv} = 0 \quad v = 1, \dots, d \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial L_p}{\partial b} = -\sum_i a_i y_i = 0 \quad (4.30)$$

$$\frac{\partial L_p}{\partial \xi_i} = C - a_i - \mu_i = 0 \quad (4.31)$$

$$y_i (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{w} + b) - 1 + \xi_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, l \quad (4.32)$$

$$\xi_i \geq 0 \quad \forall i \quad (4.33)$$

$$a_i \geq 0 \quad \forall i \quad (4.34)$$

$$\mu_i \geq 0 \quad \forall i \quad (4.35)$$

$$a_i \{y_i (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{w} + b) - 1 + \xi_i\} = 0 \quad \forall i \quad (4.36)$$

$$\mu_i \xi_i = 0 \quad \forall i \quad (4.37)$$

Όπως προηγουμένως, χρησιμοποιούνται οι συμπληρωματικές KKT συνθήκες, των σχέσεων (4.36) και (4.37), για να καθορισθεί το όριο b . Σημειώνεται ότι η Σχέση (4.31) συνδυασμένη με την Σχέση (4.37), δείχνει ότι $\xi_i = 0$ εάν $a_i < C$. Κατά συνέπεια μπορεί να ληφθεί οποιοδήποτε σημείο εκπαίδευσης για το οποίο ισχύει $0 < a_i < C$ και να χρησιμοποιηθεί η σχέση (4.36) (με $\xi_i = 0$) για να υπολογισθεί το b (όπως προηγουμένως είναι σοφότερο να λαμβάνεται η μέση τιμή από όλα τα αντίστοιχα σημεία εκπαίδευσης).

Η προσέγγιση του Cortes εισάγει την παράμετρο C , η οποία πρέπει να καθορισθεί. Η παράμετρος αυτή εισάγει έναν επιπλέον έλεγχο της ικανότητας του ταξινομητή. Η παράμετρος C μπορεί να συνδεθεί με μια παράμετρος κανονικοποίησης [Girosi 1997], [Smola and Schölkopf 1998]. Οι [Blanz et al. 1996] χρησιμοποίησαν την τιμή $C=5$ όμως συνολικά η παράμετρος C πρέπει να επιλεγθεί ώστε να αντικατοπτρίζει την γνώση του θορύβου των δεδομένων.

4.4.3 Ταξινόμηση Δεδομένων

Μετά την εκπαίδευση της Μηχανής Διανυσματικής Υποστήριξης, κάθε ελεγχόμενο στοιχείο καθορίζεται σε ποια πλευρά του ορίου απόφασης (δηλαδή του υπερεπιπέδου που βρίσκεται στην μέση απόσταση μεταξύ των H_1 και H_2 και παράλληλο με αυτά) βρίσκεται και ταξινομείται στην Κλάση εκείνη σύμφωνα με τον υπολογισμό της παρακάτω σχέσης:

$$f(x) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^{N_s} a_i y_i \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x} + b \right) \quad (4.38)$$

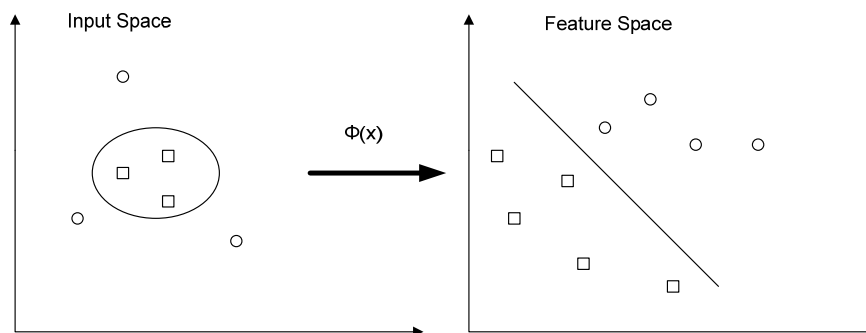
4.4.4 Μη Γραμμικές Μηχανές Διανυσματικής Υποστήριξης

Στην περίπτωση όπου ένα γραμμικό όριο δεν μπορεί να διαχωρίσει τα δεδομένα, τότε τα SVM μπορούν να αναπαραστήσουν το διάνυσμα εισόδου σε έναν ανώτερης διάστασης χώρο χαρακτηριστικών. Επιλέγοντας εκ των προτέρων (a priori) μια μη γραμμική απεικόνιση, η SVM κατασκευάζει ένα βέλτιστο υπερεπίπεδο διαχωρισμού σε ένα χώρο ανώτερης διάστασης. Οι [Boser et al. 1992] έδειξαν ότι ένα παλιό μαθηματικό τρικ [Aizerman et al. 1964] μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την γενίκευση των μεθόδων όταν η συνάρτηση απόφασης δεν είναι γραμμική συνάρτηση των δεδομένων με έναν εκπληκτικά απλό τρόπο.

Αρχικά παρατηρείται ότι ο μοναδικός τρόπος με τον οποίο εμφανίζονται τα δεδομένα εκπαίδευσης στις σχέσεις (4.24)-(4.26) είναι στην μορφή εσωτερικών γινομένων, $\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j$ και θεωρείται ότι τα δεδομένα απεικονίζονται σε έναν άλλο ευκλείδειο χώρο H , χρησιμοποιώντας μια απεικόνιση Φ :

$$\Phi : R^d \mapsto H \quad (4.39)$$

Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης εξαρτάται μόνο από τα δεδομένα μέσω εσωτερικών γινομένων στον χώρο H , δηλαδή από συναρτήσεις τις μορφής $\Phi(\mathbf{x}_i) \cdot \Phi(\mathbf{x}_j)$. Αν υπήρχε μια συνάρτηση πυρήνα K τέτοια ώστε $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \Phi(\mathbf{x}_i) \cdot \Phi(\mathbf{x}_j)$, θα χρειαζόταν να χρησιμοποιηθεί μόνο ο πυρήνας K στον αλγόριθμο εκπαίδευσης και δεν θα χρειαζόταν ούτε καν να είναι γνωστή με αναλυτική σχέση η Φ .



Σχήμα 4-5: Μη γραμμικός διαχωρισμός στο Χώρο Εισόδου και στο Χώρο Χαρακτηριστικών.

Με χρήση συνάρτησης πυρήνα K το πρόβλημα βελτιστοποίησης γράφεται:

Μεγιστοποίηση:

$$L_D = \sum_i a_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} a_i a_j y_i y_j K(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) \quad (4.40)$$

όπου $K(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j)$ είναι η συνάρτηση πυρήνα που πραγματοποιεί την μη γραμμική απεικόνιση στον χώρο χαρακτηριστικών

υπό τους περιορισμούς:

$$0 \leq a_i \leq C \quad (4.41)$$

$$\sum_i a_i y_i = 0 \quad (4.42)$$

Επιλύοντας την (4.40) με τους περιορισμούς (4.41)-(4.42) καθορίζονται οι πολλαπλασιαστές Langrange και ο ταξινομητής που στο χώρο χαρακτηριστικών δίνεται από την σχέση:

$$f(x) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^{N_S} a_i y_i \Phi(\mathbf{s}_i) \cdot \Phi(\mathbf{x}) + b \right) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^{N_S} a_i y_i K(\mathbf{s}_i, \mathbf{x}) + b \right) \quad (4.43)$$

όπου τα \mathbf{s}_i είναι τα Διανύσματα Υποστήριξης,

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^{N_S} a_i y_i K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) \quad (4.44)$$

$$\text{και } b = -\frac{1}{2} \sum_i a_i y_i [K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_r) + K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_r)] \quad (4.45)$$

Η σταθερά b υπολογίζεται χρησιμοποιώντας δυο Διανύσματα Υποστήριξης, όμως μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας όλα τα SV που βρίσκονται στο περιθώριο για λόγους ευστάθειας [Vapnik et al. 1997]. Εάν ο πυρήνας περιλαμβάνει σταθερό όρο, τότε η σταθερά μπορεί να ενταχθεί στον πυρήνα και κατά συνέπεια ο ταξινομητής απλοποιείται περαιτέρω.

4.4.4.1 Συναρτήσεις Πυρήνα

Η παρακάτω θεωρία βασίζεται στην Αναπαραγωγή Πυρήνων Χώρων Hilbert [Aronszajn 1950], [Girosi 1997], [Heckman 1997], [Wahba 1990]. Σύμφωνα με την Συνθήκη του Mercer, υπάρχει μια απεικόνιση Φ και μια επέκταση

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_i \Phi(\mathbf{x})_i \Phi(\mathbf{y})_i \quad (4.46)$$

αν και μόνο αν, για κάθε $g(\mathbf{x})$ τέτοιο ώστε το $\int g(\mathbf{x})^2 d\mathbf{x}$ να είναι πεπερασμένο ισχύει

$$\int K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) g(\mathbf{x}) g(\mathbf{y}) d\mathbf{x} d\mathbf{y} \geq 0 \quad (4.47)$$

Η σχέση (4.47) πρέπει να ισχύει για κάθε g με πεπερασμένη νόρμα L_2 .

Εάν ο πυρήνας K είναι μια συμμετρική και θετικά ορισμένη συνάρτηση, ικανοποιεί την Συνθήκη του Mercer και ισχύει:

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{p=0}^{\infty} c_p \Phi_p(\mathbf{x}) \Phi_p(\mathbf{y}), \quad c_p \geq 0$$

τότε ο πυρήνας αναπαριστά ένα γνήσιο εσωτερικό γινόμενο στο χώρο χαρακτηριστικών.

Η κατασκευή και η επιλογή της συνάρτησης πυρήνα (kernel function) είναι γενικά πολύ σημαντικές στα SVM. Κάθε συνάρτηση που ικανοποιεί το Θεώρημα Mercer μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συνάρτηση πυρήνα για να υπολογίσει το εσωτερικό γινόμενο σε έναν διανυσματικό χώρο χαρακτηριστικών (feature space). Υπάρχουν ποικίλες συναρτήσεις πυρήνα όπως η πολυωνυμική (polynomial), η σιγμοειδής (sigmoid) και η συνάρτηση ακτινικής βάσης (radial basis function - RBF) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα SVM. Οι πιο χαρακτηριστικές είναι:

- **Πολυωνυμική Συνάρτηση (Polynomial Function)**

Η πολυωνυμική απεικόνιση είναι μια δημοφιλής μέθοδος για μη-γραμμική μοντελοποίηση,

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (\mathbf{x} \cdot \mathbf{y})^d$$

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (\mathbf{x} \cdot \mathbf{y} + 1)^d$$

Η δεύτερη συνάρτηση πυρήνα προτιμάται συνήθως καθώς αποφεύγει προβλήματα που προκύπτουν όταν ο Hessian πίνακας γίνεται μηδέν. Η πολυωνυμική συνάρτηση πυρήνα περιγράφει την ομοιότητα των δύο διανυσμάτων καθώς το εσωτερικό γινόμενο απεικονίζει την κανονική συσχέτιση. Η επιλογή μιας διαφορετικής τιμής της δύναμης p , θα οδηγούσε σε διαφορετικές μετρήσεις ομοιότητας και κατά συνέπεια σε διαφορετικά αποτελέσματα.

- **Κανονική Συνάρτηση Ακτινικής Βάσης (Gaussian Radial Basis Function)**

Οι συναρτήσεις ακτινικής βάσης έχουν λάβει αξιοσημείωτη προσοχή και συνήθως χρησιμοποιείται μια κανονική (Gaussian) συνάρτηση της μορφής:

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2}{2\sigma^2}\right)$$

Μερικές κλασικές τεχνικές που χρησιμοποιούν συναρτήσεις ακτινικής βάσης υιοθετούν μεθόδους καθορισμού ενός υποσυνόλου κέντρων. Τυπικά μια μέθοδος συστάδων (clusters) χρησιμοποιείται πρώτα για την επιλογή των κέντρων. Ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό της SVM είναι ότι η επιλογή γίνεται σαφώς μέσω μιας σχέσης, με κάθε Διάνυσμα Υποστήριξης να συνεισφέρει μια τοπική κανονική (Gaussian) συνάρτηση, επικεντρωμένη στο συγκεκριμένο σημείο δεδομένων. Χρησιμοποιώντας μερικές άλλες μελέτες είναι δυνατόν να επιλεχθεί το ολικό πλάτος συνάρτησης βάσης χρησιμοποιώντας της αρχή τους SRM [Vapnik 1995].

Η συνάρτηση πυρήνα RBF προσεγγίζει τη σχέση μεταξύ των δύο διανυσμάτων χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση σχήματος καμπάνας. Η ρύθμιση της παραμέτρου σ είναι παρόμοια διαδικασία με την ρύθμιση της συνδιακύμανσης. Το πλάτος της παραμέτρου πυρήνα RBF (σ) μπορεί να καθοριστεί σε γενικές γραμμές από μια επαναληπτική διαδικασία επιλέγοντας τη βέλτιστη τιμή με βάση το πλήρες σύνολο χαρακτηριστικών. Το Διάνυσμα Υποστήριξης είναι το κέντρο της RBF και η παράμετρος σ καθορίζει την έκταση της επιρροής την οποία το Διάνυσμα Υποστήριξης έχει επί του χώρου δεδομένων. Μια μεγαλύτερη τιμή του σ δίνει μια πιο λεία επιφάνεια απόφασης και ένα κανονικότερο όριο απόφασης. Αυτό συμβαίνει επειδή η RBF με μεγάλο σ επιτρέπει στο Διάνυσμα Υποστήριξης να έχει μια ισχυρή επιρροή σε μια ευρύτερη περιοχή. Μια μεγαλύτερη αξία σ αυξάνει επίσης την α -τιμή (πολλαπλασιαστής του Lagrange) για την ταξινομητή. Όταν ένα Διάνυσμα Υποστήριξης επηρεάζει μια ευρύτερη περιοχή, όλα τα άλλα Διανύσματα Υποστήριξης αυξάνουν την α -τιμή για να αντιμετωπίσουν αυτήν την επιρροή. Εξ ου και όλες οι α -τιμές φθάνουν σε ισορροπία σε ένα μεγαλύτερο πλάτος. Μια μεγαλύτερη σ -τιμή μειώνει επίσης τον αριθμό των Διανυσμάτων Υποστήριξης. Δεδομένου ότι κάθε Διάνυσμα Υποστήριξης μπορεί να καλύπτει ένα μεγαλύτερο χώρο, λιγότεροι είναι αναγκαίοι για τον καθορισμό του ορίου. Μικρότερες σ -τιμές μπορούν να οδηγήσουν σε υπερταίριασμα (overfitting) και στην έλλειψη γενίκευσης (generalization).

- **Εκθετική Συνάρτηση Ακτινικής Βάσης (Exponential Radial Basis Function)**

Μια εκθετική συνάρτηση της μορφής:

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|}{2\sigma^2}\right)$$

Παράγει μια κλαδική γραμμική λύση που μπορεί να είναι ελκυστική όταν ασυνέχειες μπορούν να γίνουν αποδεκτές.

- **Πολυεπίπεδο Perceptron (Multi-Layer Perceptron)**

Το καθιερωμένο MLP, με ένα μόνο κρυφό επίπεδο, έχει επίσης μια αναπαράσταση πυρήνα:

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \tanh(\mathbf{v}\mathbf{x} \cdot \mathbf{y} + c)$$

για συγκεκριμένες τιμές της κλίμακας ν και μετατόπισης c . Εδώ το SV αντιστοιχεί σε ένα πρώτο επίπεδο και οι πολλαπλασιαστές Lagrange στα βάρη.

Η Σιγμοειδής (sigmoid) συνάρτηση πυρήνα είναι παρόμοια με την πολυωνυμική συνάρτηση πυρήνα. Οι παράμετροι ν και c μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσαρμόσουν το σχήμα της σιγμοειδούς συνάρτησης.

- **Σειρές Fourier (Fourier Series)**

Μια σειρά Fourier μπορεί να θεωρηθεί ως μια έκταση στον ακόλουθο $2N+1$ διαστάσεων χώρο χαρακτηριστικών. Ο πυρήνας ορίζεται στο διάστημα $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$,

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\sin\left(N + \frac{1}{2}\right)(\mathbf{x} - \mathbf{y})}{\sin\left(\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{y})\right)}$$

Βέβαια, ο πυρήνας αυτός είναι μάλλον κακή επιλογή καθώς η ικανότητα νομιμοποίησης (regularization) (στον χώρο των Μαθηματικών, η νομιμοποίηση περιλαμβάνει την εισαγωγή επιπλέον πληροφοριών με σκοπό την επίλυση ασθενώς τοποθετημένων προβλημάτων ή την αποφυγή του υπερταυριάζματος) είναι φτωγή, που είναι εμφανές από την μελέτη του αντίστοιχου μετασχηματισμού Fourier [Smola and Schölkopf 1998].

- **Καμπύλες (Splines)**

Οι καμπύλες (Splines) αποτελούν μια δημοφιλή επιλογή για μοντελοποίηση εξαιτίας της ευκαμψίας τους. Μια πεπερασμένη καμπύλη, τάξης κ , με N κόμβους τοποθετημένους σε θέσεις τ_s , δίνεται από την σχέση:

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{r=0}^{\kappa} \mathbf{x}^r \mathbf{y}^r + \sum_{s=1}^N (\mathbf{x} - \tau_s)^{\kappa} + (\mathbf{y} - \tau_s)^{\kappa}$$

Μια άπειρη καμπύλη ορίζεται στο διάστημα $[0,1]$ από:

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{r=0}^{\kappa} \mathbf{x}^r \mathbf{y}^r + \int_0^1 (\mathbf{x} - \tau_s)^{\kappa} + (\mathbf{y} - \tau_s)^{\kappa} d\tau$$

Στην περίπτωση όπου $\kappa=1$, (S_1^{∞}) ο πυρήνας δίνεται από:

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 1 + \mathbf{xy} + \frac{1}{2} \mathbf{xy} \min(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - \frac{1}{6} \min(\mathbf{x}, \mathbf{y})^3$$

Όπου η λύση είναι κλαδική τρίτου βαθμού.

- **Καμπύλες Βήτα (B Splines)**

Οι καμπύλες Βήτα είναι ακόμα μια δημοφιλής διατύπωση καμπύλης. Ο πυρήνας ορίζεται στο διάστημα $[-1,1]$ και έχει μια ελκυστική κλειστή μορφή:

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = B_{2N}(\mathbf{x} - \mathbf{y})$$

- **Αθροιζόμενοι Πυρήνες (Additive Kernels)**

Πιο περίπλοκοι πυρήνες μπορούν να αποκτηθούν αθροίζοντας πυρήνες, καθώς η άθροιση δύο θετικών ορισμένων συναρτήσεων είναι θετικά ορισμένη:

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_i K_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$

4.4.4.2 Σχεδιασμός και Ρύθμιση Συναρτήσεων Πυρήνα

Ο σχεδιασμός Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης για ταξινόμηση δεδομένων απαιτεί την εκπλήρωση δύο καθηκόντων: την επιλογή της συνάρτησης πυρήνα και την επιλογή της τιμής της παραμέτρου C . Η παράμετρος C αποκαλείται ποινή σφάλματος καθώς επιχειρεί να επιτύχει μια ισορροπία μεταξύ του μέγιστου περιθωρίου, της πολυπλοκότητας υπολογισμού και του σφάλματος ταξινόμησης κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης. Για την διαχωριζόμενη περίπτωση, η παράμετρος C είναι άπειρη, ενώ για την μη διαχωρίσιμη περίπτωση, μπορεί να ποικίλλει, ανάλογα με τον αριθμό των επιτρεπόμενων σφαλμάτων στην εκπαιδευμένη λύση. Τα λίγα λάθη επιτρέπονται για την υψηλή τιμή C , ενώ χαμηλή τιμή της C επιτρέπει την υψηλότερη αναλογία των λαθών στη λύση. Για τον έλεγχο της ικανότητας γενίκευσης της SVM, υπάρχουν μερικές ελεύθερες παράμετροι όπως ο περιορισμός του όρου C και τις παραμέτρους του πυρήνα όπως το πλάτος σ της RBF.

Μια μεγάλη τιμή ποινής σφάλματος αναγκάζει την εκπαίδευση της SVM να αποφύγει τα σφάλματα ταξινόμησης. Είναι σαφές ότι με μεγάλη ποινή σφάλματος, ο ταξινομητής δίνει ένα όριο που ταξινομεί όλα τα σημεία εκπαίδευσης σωστά. Το γεγονός αυτό όμως ενδέχεται να δώσει πολύ ακανόνιστα όρια που μπορεί να μην παρουσιάζουν καλές επιδόσεις του ταξινομητή στο σύνολο ελέγχου. Η επιλογή της συνάρτησης πυρήνα επιδρά επίσης στο όριο απόφασης. Συχνά RBFs χρησιμοποιούνται αντί για γραμμικές ή πολυωνυμικές συναρτήσεις πυρήνα, καθώς δεν είναι ευαίσθητες στις ακραίες τιμές και δεν χρειάζεται οι είσοδοι να έχουν ίσες διακυμάνσεις. Βέβαια σε πολλές περιπτώσεις οι γραμμικές – πολυωνυμικές συναρτήσεις παρουσιάζουν άριστες επιδόσεις ταξινόμησης. Οι πιο σύνθετες συναρτήσεις πυρήνα οδηγούν σε περιπλοκότερα και πιο ακανόνιστα όρια απόφασης. Ο αριθμός των Διανυσμάτων Υποστήριξης είναι ένα σημαντικό μέτρο της γενίκευσης όταν επιλέγεται η συνάρτηση πυρήνα. Γενικά όσοι λιγότερα Διανύσματα Υποστήριξης υπάρχουν, τόσο καλύτερη γενίκευση επιτυγχάνεται. Η συνάρτηση πυρήνα RBF με μεγάλη τιμή σ καταλήγει σε ένα κανονικό όριο το οποίο μοιάζει πολύ με το όριο που επιτυγχάνεται με την χρήση μιας απλής συνάρτησης πρώτης τάξης (γραμμική). Επιπροσθέτως στην επιλογή της συνάρτησης πυρήνα, διάφορες παράμετροι ρύθμισης της συνάρτησης πυρήνα πρέπει να επιλεγθούν. Όταν

χρησιμοποιείται μια πολυωνυμική συνάρτηση πυρήνα ή μια RBF, η τάξη του πολυωνύμου και η έκταση επιρροής, σ , πρέπει να επιλεγούν, αντίστοιχα.

Όσον αφορά στην ορθή επιλογή των παραπάνω παραμέτρων, δεν υπάρχει μια αποτελεσματικότερη μέθοδος μέχρι τώρα. Μια σειρά από προσεγγίσεις έχουν παρουσιαστεί συμπεριλαμβανομένων Γενετικούς Αλγόριθμους Genetic Algorithms [Jack and Nandi 2002], [Samanta et al. 2003], Αλγορίθμους Τεχνητής Ανισοποίησης (Artificial Immunisation Algorithm) [Yuan and Chu 2007b], Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) [Samanta and Nataraj 2009], [Yuan and Chu 2007a], Διασταυρωμένη Επικύρωση (Cross validation) [Christianini and Shawe-Taylor 2000], [Hsu et al. 2005], επαναληπτική διαδικασία και επιλογή ορισμένη από τον χρήστη.

4.5 Στρατηγικές Ταξινόμησης Πολλαπλών Κλάσεων

Οι Μηχανές Διανυσματικής Υποστήριξης αναπτύχθηκαν και σχεδιάστηκαν αρχικά ως δυαδικοί ταξινομητές. Ωστόσο στα πραγματικά προβλήματα, συνήθως υπάρχουν διαθέσιμες προς επιλογή πάνω από δύο κλάσεις, π.χ. στην διαγνωστική βλαβών περιστρεφόμενου εξοπλισμού υπάρχουν διάφορες κλάσεις (τύποι βλαβών) όπως η μηχανική αζυγοσταθμία, η κακή ευθυγράμμιση, οι φθορές ένσφαιρων τριβέων κλπ. Η επιτυχής επέκταση της μεθόδου αποτελεί ένα ανοιχτό πεδίο έρευνας. Για να αντιμετωπιστεί η ιδιαιτερότητα αυτή των SVMs, έχουν προταθεί μια σειρά από μεθόδους και στρατηγικές που αποσκοπούν στην προσαρμογή της μεθόδου ώστε να καταστεί εφικτή η χρήση της για ταξινόμηση πολλαπλών κλάσεων [Hsu and Lin 2002]. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι προσεγγίσεων για SVM πολλών κλάσεων. Στην μια προσέγγιση κατασκευάζονται και συνδυάζονται μεταξύ τους δυαδικοί ταξινομητές ενώ στην άλλη προσέγγιση διατυπώνεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης λαμβάνοντας απευθείας και από την αρχή όλα τα δεδομένα.

Η μέθοδος Ένας-Εναντίον-Όλων (One-against-all - OAA) ήταν η πρώτη που χρησιμοποιήθηκε για την ταξινόμηση πολλών κλάσεων με την χρήση της μεθόδου SVM. Περιγράφοντας συνοπτικά την μέθοδο, κατασκευάζονται αρχικά ένας αριθμός k SVM μοντέλων, όπου k είναι ο αριθμός των κλάσεων. Το i -οστό SVM εκπαιδεύεται, με όλα τα παραδείγματα που ανήκουν στην i -οστή κλάση να έχουν θετική ετικέτα (+1), ενώ όλα τα υπόλοιπα παραδείγματα σημειώνονται ως αρνητικές ετικέτες (-1). Μετά την επίλυση των k ταξινομητών υπάρχουν k συναρτήσεις απόφασης. Το εξεταζόμενο δείγμα ανήκει στην κλάση που παρουσιάζει την μέγιστη τιμή της συνάρτησης απόφασης.

Στη μέθοδο Ένας – Εναντίον - Ενός (One-against-one - OAO), κατασκευάζονται αρχικά $k(k-1)/2$ ταξινομητές και κάθε ένας εκπαιδεύεται στα δεδομένα από δύο κλάσεις κάθε φορά. Για το επόμενο βήμα, δηλαδή το βήμα απόφασης, διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί, όπως π.χ. η στρατηγική ψηφοφορίας “Το μέγιστο κερδίζει” (the Max Win). Ακολουθώντας αυτήν την στρατηγική, το ελεγχόμενο δείγμα εξετάζεται από όλους του ταξινομητές. Η κλάση που επιλέγεται κάθε φορά από των ταξινομητή, λαμβάνει μια ψήφο. Τελικά το εξεταζόμενο δείγμα κατατάσσεται στην κλάση που συγκέντρωσε τις περισσότερες ψήφους.

Στην μέθοδο Κατευθυνόμενων Άκυκλων Γράφων (Directed Acyclic Graph) SVM (DAGSVM) η φάση εκπαίδευσης είναι η ίδια με την μέθοδο Ένας-Εναντίον-Ενός (One-

Against-One) οπότε $k(k-1)/2$ δυαδικά SVMs επιλύονται. Ωστόσο, στην φάση ελέγχου, χρησιμοποιείται ένας κατευθυνόμενος δυαδικός κατευθυνόμενο άκυκλο γράφο με ρίζες (rooted binary directed acyclic graph) που έχει $k(k-1)/2$ εσωτερικούς κόμβους και k φύλλα. Κάθε κόμβος είναι ένα δυαδικό SVM των κλάσεων i και j . Το εξεταζόμενο δείγμα ελέγχου, ξεκινάει από τον κόμβο ρίζας και σε κάθε κόμβο η δυαδική συνάρτηση απόφασης εκτιμάται. Ανάλογα με την τιμή εξόδου, το δείγμα ελέγχου κινείται είτε αριστερά είτε δεξιά. Τελικά ακολουθώντας το μονοπάτι, το δείγμα ελέγχου φτάνει σε έναν κόμβο φύλλου που σηματοδοτεί την κλάση στην οποία ανήκει.

4.6 Υβριδική Στρατηγική “Ενός Εναντίον Όλων” για την Σειριακή Ταξινόμηση SVM βάσει μοντέλου

4.6.1 Προεπεξεργασία Δεδομένων και Εξαγωγή Χαρακτηριστικών

Το δυναμικό μοντέλο απόκρισης φθαρμένων ένσφαιρων τριβέων που περιγράφεται στο Παράρτημα, προβλέπει ότι η ύπαρξη τοπικών ελαττωμάτων (φθοράς) στο εσωτερικό ή στον εξωτερικό δακτύλιο ενός τριβέα προκαλεί κρούσεις, με συχνότητα επανάληψης ίση με τις χαρακτηριστικές Συχνότητες Διέλευσης από τον Εξωτερικό (BPFO) και τον Εσωτερικό (BPMFI) Δακτύλιο. Οι συχνότητες αυτές εξαρτώνται από την συχνότητα περιστροφής του άξονα της μηχανής και από την γεωμετρία των εδράνων. Οι κρούσεις έχουν ως αποτέλεσμα την διέγερση κάποιων φυσικών συχνοτήτων συντονισμού της κατασκευής-μηχανήσενώ παράλληλα μια αιχμηρή συμπεριφορά είναι εμφανής στα μετρούμενα χρονικά σήματα. Ο μετασχηματισμός του χρονικού σήματος στο πεδίο συχνότητας με την χρήση του Μετασχηματισμού Fourier οδηγεί σε φάσματα που παρουσιάζουν έντονα διεγερμένες υψίσυχνες συνήθως περιοχές γύρω από τις φυσικές συχνότητες. Οι διεγερμένες αυτές περιοχές συνήθως κυριαρχούνται από την παρουσία πλευρικών αιχμών εκατέρωθεν των διεγερμένων ιδιοσυχνοτήτων σε αποστάσεις ίσες με τις χαρακτηριστικές συχνότητες βλαβών.

Η χαρακτηριστική αυτή συμπεριφορά, οδήγησε μηχανικούς και ερευνητές στην πρόταση μια μεγάλης ποικιλίας και αριθμού μεθόδων επεξεργασίας σήματος, τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας, τύπων χαρακτηριστικών (features) και μεθόδων εξαγωγής των χαρακτηριστικών αυτών. Βασικές μέθοδοι που προτάθηκαν είναι ο Μετασχηματισμός Fourier, η εφαρμογή χαμηλοπερατών και υψιπερατών φίλτρων, η κανονικοποίηση (normalization) και η χρήση μεθόδων εξομάλυνσης (smoothing), η εφαρμογή χρονικής διαφόρισης (differentiation) και ολοκλήρωσης (integration) σημάτων, η Στατιστική Ανάλυση Σήματος στο πεδίο του χρόνου ή στο πεδίο της συχνότητας με χρήση μεθόδων Ανώτερης Τάξης (Higher Order Statistics – HOS), ο Κυματιδιακός Μετασχηματισμός (Wavelet Transform).

Η Αυτόματη Διάγνωση Βλαβών μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικά τμήματα, στην εισαγωγή-προεπεξεργασία των σημάτων και στην μέθοδο ταξινόμησης. Στη μάθηση με επίβλεψη το σύστημα καλείται να “μάθει” μια έννοια ή συνάρτηση από ένα σύνολο δεδομένων, η οποία αποτελεί περιγραφή μιας κατάστασης. Κατά συνέπεια έχει πολύ μεγάλη σημασία η ορθή, ακριβής και επιτυχής περιγραφή της κατάστασης αυτής με την χρήση καταλλήλων χαρακτηριστικών (features). Στην περίπτωση της διάγνωσης βλαβών ένσφαιρων

τριβέων, βασικό κριτήριο για την επιτυχία της μεθόδου είναι η επιτυχής περιγραφή της Κατάστασης Καλής Λειτουργίας του Τριβέα, της Κατάστασης Λειτουργίας με Φθορά στον Εσωτερικό Δακτύλιο, της Κατάστασης Λειτουργίας με Φθορά στον Εξωτερικό Δακτύλιο. Για την περιγραφή των προαναφερθέντων καταστάσεων, έχουν προταθεί μια σειρά από μεγέθη – χαρακτηριστικά τόσο από το πεδίο της συχνότητας όσο και από το πεδίο του χρόνου.

Μερικά δημοφιλή Στατιστικά Χαρακτηριστικά του σήματος στο πεδίου του χρόνου που χρησιμοποιούνται είναι:

- Η Μέση Τιμή (Mean Value). Είναι στατιστική ιδιότητα 1^{ης} τάξης και δίνει μια μέτρηση της θέσης της Συνάρτησης Πυκνότητας Πιθανότητας.
- Η Μεταβλητότητα (Variance). Είναι στατιστική ιδιότητα 2^{ης} τάξης και αποτελεί ένα μέτρο της εξάπλωσης – κατανομής της κυματομορφής γύρω από την Μέση Τιμή της.
- Η Λοξότητα (Skewness). Είναι στατιστική ιδιότητα 3^{ης} τάξης και δίνει μια μέτρηση της συμμετρίας ή της έλλειψης συμμετρίας ενός σήματος.
- Η Κύρτωση (Kurtosis). Είναι στατιστική ιδιότητα 4^{ης} τάξης και χαρακτηρίζει τη σχετική οξύτητα (“αιχμηρότητα”) ή ομαλότητα μιας κατανομής, σε σύγκριση με την κανονική κατανομή. Θετική κύρτωση υποδηλώνει κατανομή με σχετικές οξύνσεις. Αρνητική κύρτωση υποδηλώνει σχετικά ομαλή κατανομή.
- Η Μέση Τετραγωνική Τιμή (Root Mean Square – RMS) του σήματος, που υποδεικνύει την σοβαρότητα της βλάβης ένσφαιρου τριβέα.

Οι παράμετροι αυτοί – και ειδικότερα η Λοξότητα και η Κύρτωση – θεωρούνται ότι είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για “αιχμηρά” σήματα, όπως αυτά που χαρακτηρίζουν την συμπεριφορά φθαρμένων ένσφαιρων τριβέων. Άλλα χαρακτηριστικά που έχουν προταθεί στο πεδίο του χρόνου είναι: η Τυπική Απόκλιση (Standard Deviation), οι Στατιστικές Ροπές Ν Τάξης ($N > 5$), η Μέγιστη Τιμή (Max), ο Δείκτης Κορυφής (Crest Factor), ο Δείκτης Ανοχής (Clearance Factor), ο Δείκτης Σχήματος (Shape Factor), ο Δείκτης Κρουστικότητας (Impulse Factor), η Μέση Τετραγωνική Ρίζα (Square Mean Root), η Παράμετρος Σχήματος (Shape) και η Παράμετρος Κλίμακας (Scale) μιας Κατανομής Weibull, η Μορφοκλασματική Διάσταση Χωρητικότητας (Fractal Capacity Dimension), η Μορφοκλασματική Διάσταση Συσχέτισης (Fractal Correlation Dimension), η Μορφοκλασματική Διάσταση Πληροφορίας (Fractal Information Dimension).

Εναλλακτικά στα χαρακτηριστικά που εξάγονται από το πεδίο του χρόνου, στην ενότητα αυτή εξετάζονται χαρακτηριστικά που μπορούν να εξαχθούν από το πεδίο της συχνότητας και αποτελούν περιγραφικούς δείκτες της μεταβολής της Κατάστασης Λειτουργίας της Μηχανής. Ως κύριο μέτρο-χαρακτηριστικό λαμβάνεται ο υπολογισμός της ενέργειας που κατανέμεται και αναπτύσσεται σε προσεκτικά, ορθά και αυστηρά καθορισμένες ζώνες συχνοτήτων, που μπορούν να καθοριστούν με βάση την καλή κατανόηση της φύσης του φαινομένου εμφάνισης της βλάβης από την σκοπιά ενός μηχανικού. Ο πετυχημένος ορισμός των συχνοτικών αυτών ζωνών μπορεί να οδηγήσει σε ακριβέστερη, πιο αξιόπιστη και αυτοματοποιημένη παρακολούθηση της κατάστασης

λειτουργίας περιστρεφόμενου εξοπλισμού και στην έγκυρη και έγκαιρη διάγνωση βλαβών που ενδέχεται να εμφανιστούν στο σύστημα.

Εάν μια χρονοσειρά (σήμα) $x(t)$ δεν είναι περιοδική, η Ανάλυση Συχνοτήτων και οι Σειρές Fourier μπορούν να γενικευτούν, υποθέτοντας ότι το σήμα μπορεί να προσεγγισθεί από ένα αντίστοιχο περιοδικό σήμα $x_p(t)$, του οποίου η περίοδος επανάληψης T_p τείνει στο άπειρο. Αυτή η προσέγγιση ισχύει με την πρόσθετη προϋπόθεση ότι η συνολική ενέργεια που περιέχεται στο σήμα παραμένει πεπερασμένη:

$$x(t) = \lim_{T_p \rightarrow \infty} \{x_p(t)\} \quad (4.48)$$

$$\text{όταν } E_x = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t)]^2 dt < \infty \quad (4.49)$$

Όταν η περίοδος επανάληψης T_p τείνει στο άπειρο, η συχνότητα f_0 της βασικής αρμονικής τείνει στο μηδέν και κατά συνέπεια, το φάσμα του σήματος γίνεται πλέον συνεχές. Το ζεύγος του μετασχηματισμού Fourier του $x(t)$ αποτελείται από δύο (2) ολοκληρώματα:

$$\text{Αντίστροφος Μετασχηματισμός: } x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \quad (4.50)$$

$$\text{Ευθύς Μετασχηματισμός: } X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.51)$$

Σε ένα περιοδικά επαναλαμβανόμενο σήμα, η συνολική ενέργεια που περιέχεται είναι άπειρη. Για το λόγο αυτό το ενεργειακό περιεχόμενο του σήματος εκφράζεται από το αντίστοιχο φάσμα ισχύος. Αντίθετα, σε ένα μη περιοδικά επαναλαμβανόμενο σήμα, η ύπαρξη του αντίστοιχου μετασχηματισμού Fourier προϋποθέτει πεπερασμένη ενέργεια. Σε αυτήν την περίπτωση, το θεώρημα του Parseval διατυπώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} E_x &= \int_{-\infty}^{\infty} [x(t)]^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) x^*(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) dt \left[\int_{-\infty}^{\infty} X^*(f) e^{-j2\pi ft} df \right] \Rightarrow \\ E_x &= \int_{-\infty}^{\infty} X^*(f) df \left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \right] = \int_{-\infty}^{\infty} X^*(f) X(f) df = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df \end{aligned} \quad (4.52)$$

όπου E_x το Φάσμα Ενέργειας.

Τα σήματα κραδασμών περιστρεφόμενου εξοπλισμού κατά τη διάρκεια εμφάνισης μεταβατικών φαινομένων, όπως π.χ. κατά την έναρξη λειτουργίας (επιτάχυνση) και της διακοπής λειτουργίας (επιβράδυνση), είναι κατά βάση μη στάσιμα σήματα. Ως αποτέλεσμα, η εφαρμογή της φασματικής ανάλυσης απευθείας σε αυτά τα είδη σημάτων αλλοιώνει το φάσμα συχνοτήτων και οδηγεί στη λεγόμενη “Φασματική Διαρροή”. Για να ξεπεραστεί η αδυναμία αυτή, προτείνεται η χρήση της Γωνιακής Δειγματοληψίας (Angular Sampling) και η Ανάλυση Τάξης (Order Analysis). Με την εφαρμογή των μεθόδων αυτών, τα μη στάσιμα αυτά σήματα στο πεδίο του χρόνου καθίστανται στάσιμα σήματα στο πεδίο γωνιών μέσω μιας ισογώνιου δειγματοληψίας για μια ταχύτητα αναφοράς περιστροφής

άξονα. Με την εφαρμογή συμβατικής ανάλυσης φάσματος σε αυτά τα στάσιμα σήματα στο πεδίο γωνιών, ένα σαφές και ευκρινές φάσμα μπορεί να επιτευχθεί, το οποίο ονομάζεται “Φάσμα Τάξης” (Order Spectrum).

Για τους προαναφερθέντες λόγους πριν από την ανάλυση συχνοτήτων, τα σήματα υπόκεινται πρώτα σε ένα στάδιο προεπεξεργασίας χρησιμοποιώντας την Ανάλυση Τάξης (Order Analysis). Η διαδικασία υπολογισμού του Φάσματος Τάξης είναι όμοια με την συμβατική μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του Φάσματος Συχνοτήτων, δηλαδή χρησιμοποιείται ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier αλλά στην θέση των δεδομένων που αποκτήθηκαν με δειγματοληψία στο πεδίο του χρόνου, χρησιμοποιούνται δεδομένα που αποκτήθηκαν μέσω δειγματοληψίας στο πεδίο γωνιών. Κάθε γραμμή του φάσματος αναπαριστά το πηλίκο της συχνότητας προς την συχνότητα περιστροφής του άξονα και καλείται Τάξη. Οι Τάξεις κατά συνέπεια αναπαριστούν τις συχνοτικές συνιστώσες ενός σήματος που συνδέονται άμεσα με την ταχύτητα περιστροφής του άξονα. Ειδικότερα,

$$\text{Ταξη (Order)} = \frac{\text{Συχνότητα Σήματος}}{\text{Συχνότητα Περιστροφής Άξονα}} \quad (4.53)$$

Το Φάσμα Ενέργειας Τάξης δίνεται από την σχέση:

$$A(l)^2 = \left[\frac{2}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi \frac{n}{N} l} \right| \right]^2 \quad (4.54)$$

όπου $A(l)$ είναι το πλάτος της τάξης, N το μήκος του σήματος και $x(n)$ η διακριτή δειγματοληπτημένη κατά γωνία σειρά.

Ειδικά για ένσφαιρους τριβείς, εξαιτίας της παρουσίας των χαρακτηριστικών πλευρικών Συχνοτήτων Διέλευσης Σφαιρών στον Εσωτερικό ή στον Εξωτερικό Δακτύλιο γύρω από τις κατασκευαστικές φυσικές συχνότητες, ένας αριθμός μεθόδων αποδιαμόρφωσης έχει προταθεί. Η αποδιαμόρφωση και οι λοιπές μέθοδοι εξαγωγής της περιβάλλουσας του σήματος προσφέρουν μια ισχυρή και αξιόπιστη διαγνωστική δυναμική, καθώς βασίζονται σε ένα συμπαγές και καλά θεωρητικά καθορισμένο φυσικό πλαίσιο. Ο αντίστοιχος φυσικός μηχανισμός περιγράφεται στο [McFadden and Smith 1984a]. Συνοπτικά, στόχος της εξαγωγής της περιβάλλουσας είναι η απομόνωση σε πρώτη φάση του μετρούμενου σήματος σε μια σχετικά στενή ζώνη συχνοτήτων γύρω από μια συγκεκριμένη φυσική συχνότητα χρησιμοποιώντας ένα ζωνοπερατό φίλτρο και σε δεύτερη φάση, η αποδιαμόρφωση του με σκοπό την παραγωγή ενός χαμηλόσυχνου σήματος, που ονομάζεται περιβάλλουσα. Τα φέροντα σήματα (Carrier signals) αφαιρούνται και με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο θόρυβος και οι λοιπές άσχετες και άχρηστες πληροφορίες.

Η περιβάλλουσα του σήματος αποκτάται εφαρμόζοντας τον δημοφιλή Μετασχηματισμό Hilbert. Ο Μετασχηματισμός Hilbert $H[x(t)]$ μιας χρονοσειράς $x(t)$ ορίζεται στο πεδίο του χρόνου ως:

$$H[x(t)] = x_H(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau = \frac{1}{\pi} x(t) \otimes \left(\frac{1}{t} \right) \quad (4.55)$$

Εφαρμόζοντας το Θεώρημα της Συνέλιξης, ο Μετασχηματισμός παίρνει μια απλούστερη μορφή στο πεδίο συχνότητας:

$$F[x_H(t)] = X_H(f) = X(f) \cdot [-j \cdot \text{sign}(f)] \quad (4.56)$$

$$\text{sign}(f) = \begin{cases} +1, & f > 0 \\ -1, & f < 0 \end{cases} \quad (4.57)$$

Με τη βοήθεια του Μετασχηματισμού Hilbert ορίζεται μία χρονική μιγαδική ποσότητα, η οποία ονομάζεται “Αναλυτικό Σήμα”:

$$x_A(t) = x_R(t) + j \cdot x_I(t) = x(t) + x_H(t) \quad (4.58)$$

Το πραγματικό μέρος του αναλυτικού σήματος είναι το αρχικό σήμα και το φανταστικό μέρος είναι ο Μετασχηματισμός Hilbert του αρχικού σήματος. Το πλάτος του αναλυτικού σήματος είναι η περιβάλλουσα του αρχικού διαμορφωμένου σήματος και η γωνία του η φάση του διαμορφωμένου σήματος:

$$A(t) = |x_a(t)| = \sqrt{x^2(t) + x_H^2(t)} \quad (4.59)$$

$$\phi(t) = \tan^{-1} \left[\frac{x_H(t)}{x(t)} \right] \quad (4.60)$$

Το φάσμα της περιβάλλουσας του αρχικού διαμορφωμένου σήματος δίνεται από τη σχέση:

$$h(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{x^2(t) + H[x(t)]^2} e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.61)$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι Ενέργειες κραδασμών σε χαρακτηριστικές ζώνες του φάσματος της περιβάλλουσας. Οι δείκτες που προτείνονται για χρήση ως χαρακτηριστικά εισόδου, βασίζονται σε ενέργειες κραδασμών στο πεδίο της συχνότητας και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1. Οι δείκτες αυτοί είναι ενέργειες στο φάσμα της περιβάλλουσας του σήματος στις παρακάτω χαρακτηριστικές ζώνες συχνοτήτων:

- Η Ταχύτητα Περιστροφής του άξονα και οι αρμονικές της μέχρι την τέταρτη (4^η) τάξη.
- Η Συχνότητα Διέλευσης Σφαιρών στον Εξωτερικό Δακτύλιο (Ball Passing Frequency Outer Race - BPFO) και οι αρμονικές της μέχρι την τέταρτη (4^η) τάξη. Οι αιχμές στις αρμονικές της Συχνότητας BPFO χαρακτηρίζουν την ύπαρξη σφάλματος στον εξωτερικό δακτύλιο.
- Η Συχνότητα Διέλευσης Σφαιρών στον Εσωτερικό Δακτύλιο (Ball Passing Frequency Inner Race - BPF1) και οι αρμονικές της μέχρι την τέταρτη (4^η) τάξη. Οι αιχμές στις

αρμονικές της Συχνότητας BPF1 χαρακτηρίζουν την ύπαρξη σφάλματος στον εσωτερικό δακτύλιο.

- Το άθροισμα των τεσσάρων πρώτων αρμονικών της ταχύτητας περιστροφής του άξονα.

$$SSHE = \sum_{h=1}^4 p_{shaft}(h)$$

- Το άθροισμα των τεσσάρων πρώτων αρμονικών της Συχνότητας Διέλευσης Σφαιρών στον Εσωτερικό Δακτύλιο.

$$SIRH = \sum_{h=1}^4 p_{BPF1}(h)$$

- Το άθροισμα των τεσσάρων πρώτων αρμονικών της Συχνότητας Διέλευσης Σφαιρών στον Εξωτερικό Δακτύλιο.

$$SORH = \sum_{h=1}^4 p_{BPFO}(h)$$

- Το άθροισμα των παραπάνω δύο αθροισμάτων.

$$SIORH = \sum_{k=1}^4 p_{BPFO}(h) + \sum_{k=1}^4 p_{BPF1}(h)$$

Επίσης υπολογίζονται οι παρακάτω δείκτες στο φάσμα του αρχικού σήματος στις παρακάτω χαρακτηριστικές ζώνες συχνοτήτων:

- Το άθροισμα των τεσσάρων πρώτων αρμονικών της ταχύτητας περιστροφής του άξονα.

$$SSHE = \sum_{h=1}^4 p_{shaft}(h)$$

- Το άθροισμα της ενέργειας του σήματος στην υψίσυχη περιοχή άνω των f_H Hz.

$$HFE = \sum_{k=1}^K s(k)^2$$

Παράμετροι	Σύμβολα
Φάσματα της Περιβάλλουσας του Σήματος	
Αιχμή Φάσματος στην 1 ^η αρμονική της Συχνότητας Περιστροφής του Άξονα	<i>S1X</i>
Αιχμή Φάσματος στην 2 ^η αρμονική της Συχνότητας Περιστροφής του Άξονα	<i>S2X</i>
Αιχμή Φάσματος στην 3 ^η αρμονική της Συχνότητας Περιστροφής του Άξονα	<i>S3X</i>
Αιχμή Φάσματος στην 4 ^η αρμονική της Συχνότητας Περιστροφής του Άξονα	<i>S4X</i>
Αιχμή Φάσματος στην 1 ^η αρμονική της Συχνότητας Διέλευσης στον Εξωτερικό Δακτύλιο (BPFO)	<i>S1O</i>
Αιχμή Φάσματος στην 2 ^η αρμονική της Συχνότητας Διέλευσης στον Εξωτερικό Δακτύλιο (BPFO)	<i>S2O</i>
Αιχμή Φάσματος στην 3 ^η αρμονική της Συχνότητας Διέλευσης στον Εξωτερικό Δακτύλιο (BPFO)	<i>S3O</i>

Μέθοδοι Αυτόματης Διάγνωσης Βλαβών

Αιχμή Φάσματος στην 4 ^η αρμονική της Συχνότητας Διέλευσης στον Εξωτερικό Δακτύλιο (BPFO)	<i>S4O</i>
Αιχμή Φάσματος στην 1 ^η αρμονική της Συχνότητας Διέλευσης στον Εσωτερικό Δακτύλιο (BPFI)	<i>S1I</i>
Αιχμή Φάσματος στην 2 ^η αρμονική της Συχνότητας Διέλευσης στον Εσωτερικό Δακτύλιο (BPFI)	<i>S2I</i>
Αιχμή Φάσματος στην 3 ^η αρμονική της Συχνότητας Διέλευσης στον Εσωτερικό Δακτύλιο (BPFI)	<i>S3I</i>
Αιχμή Φάσματος στην 4 ^η αρμονική της Συχνότητας Διέλευσης στον Εσωτερικό Δακτύλιο (BPFI)	<i>S4I</i>
Άθροισμα των αιχμών Φάσματος Αρμονικών Συχνότητας Περιστροφής του Άξονα ($SSHE=S1X+S2X+S3X+S4X$)	<i>SSHE</i>
Άθροισμα των αιχμών Φάσματος Αρμονικών Συχνότητας Διέλευσης στον Εξωτερικό Δακτύλιο (BPFO) ($SORH=S1O+S2O+S3O+S4O$)	<i>SORH</i>
Άθροισμα των αιχμών Φάσματος Αρμονικών Συχνότητας Διέλευσης στον Εσωτερικό Δακτύλιο (BPFI) ($SIRH=S1I+S2I+S3I+S4I$)	<i>SIRH</i>
Άθροισμα των αιχμών Φάσματος Αρμονικών Συχνότητας Διέλευσης στον Εξωτερικό Δακτύλιο (BPFO) και Συχνότητας Διέλευσης στον Εσωτερικό Δακτύλιο (BPFI) ($SIORH= SORH+SIRH$)	<i>SIORH</i>
Φάσματα της Περιβάλλουσας του Σήματος	
Άθροισμα των αιχμών Φάσματος Αρμονικών Συχνότητας Περιστροφής του Άξονα ($SSHR=S1X+S2X+S3X+S4X$)	<i>SSHR</i>
Ενέργεια Υψίσυχνης Περιοχής	<i>HFE</i>

Πίνακας 4-1: Ενεργειακά Χαρακτηριστικά Κραδασμών υπολογισμένα στο πεδίο συχνότητας.

Οι πρώτες δεκαέξι ενέργειες στον Πίνακα 4-1 εξάγονται από το φάσμα της περιβάλλουσας του σήματος και κανονικοποιούνται από την Συνολική Ενέργεια του αποδιαμορφωμένου σήματος. Οι τελευταίες δύο ενέργειες εξάγονται από το φάσμα του αρχικού σήματος και κανονικοποιούνται από την αντίστοιχη Συνολική Ενέργεια του αρχικού σήματος.

Η κανονικοποίηση αποτελεί ένα εύχρηστο εργαλείο για τους σχεδιαστές συστημάτων αυτόματης αναγνώρισης καθώς συνήθως βελτιώνει τα αποτελέσματα των μεθόδων Μηχανικής Μάθησης. Η κανονικοποίηση είναι ο γραμμικός μετασχηματισμός των δεδομένων σε ένα εύρος τιμών (συνήθως στο διάστημα [0,1]) και αποτελεί ένα βασικό βήμα προεπεξεργασίας των σημάτων. Υπάρχουν διάφορα είδη κανονικοποίησης δεδομένων και η αναζήτηση του βέλτιστου είδους για κάθε μέθοδο μάθησης αποτελεί ακόμα ανοιχτό πεδίο έρευνας. Γενικά είναι επιθυμητό να υπάρχει το ίδιο εύρος τιμών για κάθε χαρακτηριστικό εισόδου έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η ροπή των μεθόδων ταξινόμησης για ένα χαρακτηριστικό εις βάρος άλλων και να αποφεύγεται η κυριαρχία χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές τιμών έναντι άλλες με μικρές τιμές.

Η μέτρηση των προς έλεγχο δεδομένων μπορεί να πραγματοποιείται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Κατά συνέπεια η δυνατότητα κανονικοποίησης των δεδομένων είναι εξαιρετικά σημαντική στην διαδικασία διάγνωσης βλαβών. Υπό μια έννοια μάλιστα, η κανονικοποίηση των δεδομένων είναι η διαδικασία διαχωρισμού των μεταβολών που μετρούνται από έναν

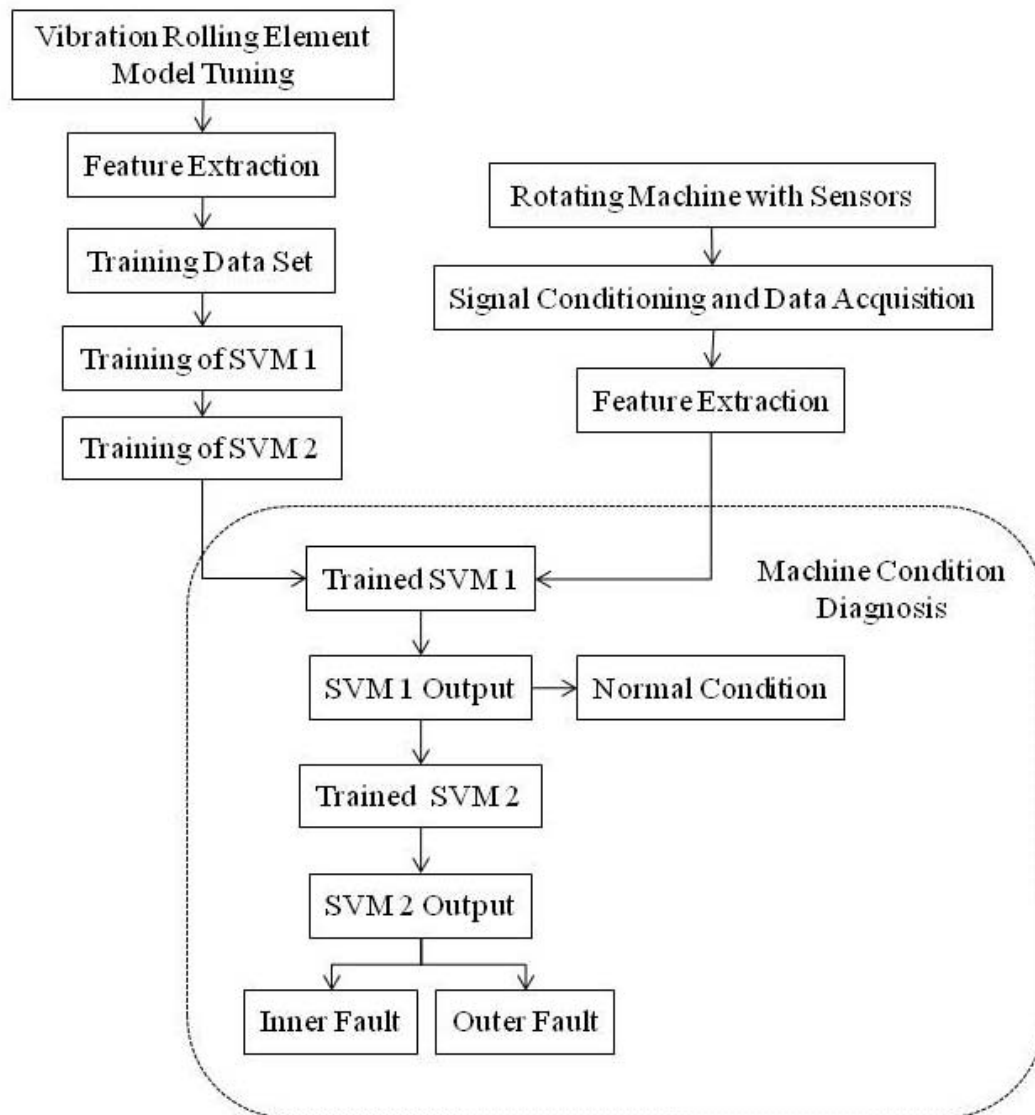
αισθητήρα εξαιτίας εμφάνισης βλάβης από τις μεταβολές που προκαλούνται από τις μεταβαλλόμενες λειτουργικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η αποφυγή εισαγωγής αριθμητικών δυσκολιών κατά την διάρκεια των υπολογισμών. Οι τιμές των συναρτήσεων πυρήνα συνήθως εξαρτώνται από τα εσωτερικά γινόμενα των διανυσμάτων χαρακτηριστικών, όπως π.χ. ο γραμμικός πυρήνας και ο πολυωνυμικός πυρήνας, και ως αποτέλεσμα μεγάλες τιμές μπορεί να προκαλέσουν αριθμητικά προβλήματα και να διευρύνουν το υπολογιστικό κόστος.

Η χαμηλότερη συχνότητα f_H , όπως χρησιμοποιήθηκε στον ορισμό του Δείκτη *HFE* στον Πίνακα 4-1, επιλέγεται ίση με 1000 Hz, καθώς η συχνότητα αυτή θεωρείται ότι χαρακτηρίζει το τυπικό χαμηλό όριο άνω του οποίου διεγείρονται υψίσυχνες ζώνες εξαιτίας των κρούσεων των ένσφαιρων τριβέων. Η συχνότητα $f_s/2$ συμβολίζει την συχνότητα Nyquist. Τα σήματα φιλτράρονται με ένα υπερατά φίλτρο Butterworth 10^{ης} τάξης με συχνότητα αποκοπής την f_H και στη συνέχεια αποδιαμορφώνονται, ώστε να εξαχθεί η περιβάλλουσα του σήματος.

4.6.2 Στρατηγική Ταξινόμησης

Απώτερος στόχος στην ενότητα αυτή αποτελεί ο σχεδιασμός ενός Αυτόματου Συστήματος Διάγνωσης Βλαβών Ένσφαιρων Τριβέων που θα ταξινομεί τα ελεγχόμενα σήματα σε τρεις (3) βασικές κλάσεις: α) Καλή Λειτουργία Μηχανής, β) Φθορά στον Εξωτερικό Δακτύλιο του ένσφαιρου τριβέα, γ) Φθορά στον Εσωτερικό Δακτύλιο του Ένσφαιρου Τριβέα. Προς την κατεύθυνση αυτή, σχηματίζεται ένας υβριδικός αλγόριθμος που βασίζεται σε ένα Στοχαστικό Μοντέλο Προσομοίωσης Δυναμικής Απόκρισης Ένσφαιρων Τριβέων, στην στρατηγική Ένας-Εναντίον-Όλων (One-Against-All) και στην χρησιμοποίηση της μεθόδου Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης SVM.

Δύο (2) ταξινομητές SVM δύο (2) κλάσεων τοποθετούνται σειριακά σε μορφή δυαδικού δένδρου. Η προτεινόμενη διαγνωστική διαδικασία ακολουθεί το οργανόγραμμα του Σχήματος 4-6. Στην πρώτη φάση, το μοντέλο προσομοίωσης της δυναμικής απόκρισης ένσφαιρων τριβέων ρυθμίζεται ανάλογα στις συγκεκριμένες συνθήκες της εφαρμογής και ένας αριθμός προσομοιωμένων σημάτων που παρουσιάζουν σφάλμα στον εσωτερικό ή στον εξωτερικό δακτύλιο παράγονται. Η φυσιολογική κατάσταση λειτουργίας προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας έναν αριθμό σημάτων λευκού θορύβου. Στη δεύτερη φάση, τα προσομοιωμένα σήματα επεξεργάζονται κατάλληλα και υπολογίζονται τα προαναφερθέντα Χαρακτηριστικά των σημάτων.



Σχήμα 4-6: Διάγραμμα του Συστήματος Διάγνωσης Βλαβών Πολλαπλών Τάξεων.

Στην Τρίτη φάση, οι δύο (2) ταξινομητές Support Vector Machines εκπαιδεύονται χρησιμοποιώντας ως Εισόδους τα εξαγχθέντα Χαρακτηριστικά. Ο πρώτος ταξινομητής SVM (SVM 1) εκπαιδεύεται με σκοπό την ανίχνευση της ύπαρξης ή μη βλάβης στον ένσφαιρο τριβέα. Για την εκπαίδευσή του χρησιμοποιούνται τρία Χαρακτηριστικά Εισόδου, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-2. Όταν τα Χαρακτηριστικά Εισόδου αντιστοιχούν σε σήμα Κλάσης Φυσιολογικής Κατάστασης Λειτουργίας, η έξοδος του ταξινομητή SVM 1 τίθεται ίση με +1 και η διαδικασία ταξινόμησης ολοκληρώνεται. Εάν αντιστοιχούν σε μια από τις Κλάσεις Βλάβης, η έξοδος τίθεται ίση με -1 και η διάγνωση της βλάβης μεταφέρεται στον δεύτερο ταξινομητή SVM (SVM 2). Ο δεύτερος ταξινομητής SVM χρησιμοποιείται με σκοπό την ανίχνευση του τύπου της βλάβης και την ταξινόμηση του σήματος στην Κλάση Βλάβης Εξωτερικού Δακτυλίου ή στην Κλάση Βλάβης Εσωτερικού Δακτυλίου. Στον δεύτερο ταξινομητή, χρησιμοποιούνται ένα σύνολο δεκαπέντε (15) Χαρακτηριστικών Εισόδου από το πεδίο συχνότητας όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-2. Όταν το σήμα παρουσιάζει φθορά

στην εσωτερικό δακτύλιο, η έξοδος του ταξινομητή SVM 2 τίθεται ίση με -1 ενώ όταν παρουσιάζει φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο, τίθεται ίση με +1. Αυτή η μορφή της διαδικασίας είναι απαραίτητη καθώς η μέθοδος SVM μπορεί να μεταχειριστεί μόνο δύο κλάσεις. Η επιλεγμένη δομή είναι σχετικά απλή και εύρωστη, γεγονός που αποτελεί πλεονέκτημα και ταυτόχρονα απαίτηση για χρήση σε βιομηχανικές εφαρμογές ενώ παράλληλα βελτιώνει την διαδικασία και επιταχύνει την διάγνωση της βλάβης. Μετά την ολοκλήρωση των τριών φάσεων, το σύστημα είναι έτοιμο προς χρήση.

<i>Χαρακτηριστικά Εισόδου 1^ο SVM</i>
<i>SSHR, SIORH, HFE</i>
<i>Χαρακτηριστικά Εισόδου 2^ο SVM</i>
<i>S1X, S2X, S3X, S4X, S1O, S2O, S3O, S4O, S1I, S2I, S3I, S4I, SSHE, SORH, SIRH</i>

Πίνακας 4-2: Ενεργειακά Χαρακτηριστικά Εισόδου υπολογισμένα στο πεδίο συχνότητας (Πίνακας 4-1), όπως χρησιμοποιήθηκαν στα Δύο Στάδια της προτεινόμενης SVMs ταξινόμησης βλάβης.

Κατά την χρησιμοποίηση του συστήματος, σήματα κραδασμών καταγράφονται με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού από τον εξεταζόμενο τριβέα. Τα μετρούμενα σήματα προεπεξεργάζονται και εξάγονται τα αντίστοιχα Ενεργειακά Χαρακτηριστικά Εισόδου που περιγράφονται στους Πίνακες 4-1 και 4-2. Τα Χαρακτηριστικά Εισόδου εισάγονται διαδοχικά στους εκπαιδευμένους ταξινομητές SVM 1 και SVM 2 και οι έξοδοι των Support Vector Machines αποκαλύπτουν την κατάσταση του ελεγχόμενου τριβέα.

Η επιλογή του τύπου της συνάρτησης πυρήνα και των αντίστοιχων παραμέτρων, καθώς επίσης και η επιλογή του συντελεστή ποινής C παρουσιάζουν σημαντική επιρροή στην επίδοση του SVM. Στην πράξη η παράμετρος C μεταβάλλεται σε ένα αρκετά πλατύ εύρος τιμών. Ο ρόλος της είναι η επίτευξη μιας κατάλληλης ισορροπίας μεταξύ της υπολογιστικής πολυπλοκότητας και του σφάλματος διαχωρισμού. Όταν η παράμετρος C, λαμβάνει τιμές πολύ μεγάλες ή πολύ μικρές, μπορεί να οδηγήσει στην μείωση της γενίκευσης (generalization) της SVM.

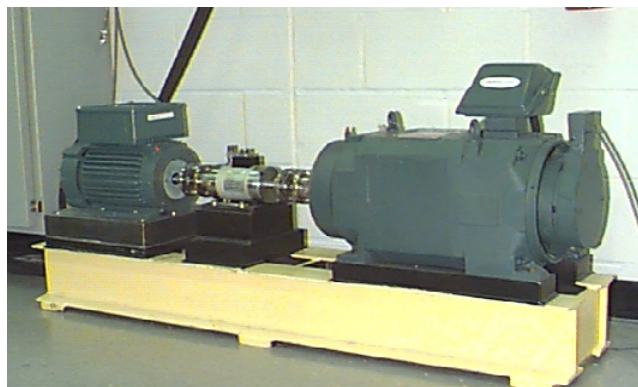
Για λόγους απλότητας και ευρωστίας σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, η Γραμμική Συνάρτηση επιλέγεται ως συνάρτηση πυρήνα. Η παράμετρος ποινής C τίθεται ίση με 100, παρουσιάζοντας μια μεγάλη τιμή, και ως αποτέλεσμα, λίγα σφάλματα ταξινόμησης επιτρέπονται.

4.7 Πειραματική Εφαρμογή

4.7.1 Περιγραφή της Πειραματικής Διάταξης

Η αξιολόγηση της προτεινόμενης διαγνωστικής προσέγγισης πραγματοποιείται πρώτα σε μια πειραματική εφαρμογή. Τα δεδομένα των μετρήσεων κραδασμών που χρησιμοποιούνται στην ενότητα αυτή προέρχονται από την Βάση Δεδομένων Μετρήσεων Ένσφαιρων Τριβέων (Ball Bearing Test Data Set) και αποκτήθηκαν από το Case Western Reserve University Bearing Data Center Website [Loparo 2006]. Στο Σχήμα 4-7,

παρουσιάζεται η κλίνη δοκιμών, η οποία αποτελείται από έναν κινητήρα 2 hp της εταιρίας Reliance Electric (αριστερά), έναν αισθητήρα/κωδικοποιητή ροπής (torque transducer/encoder) (κέντρο), ένα δυναμόμετρο (δεξιά), και ηλεκτρονικά ελέγχου. Οι ελεγχόμενοι τριβείς υποστηρίζουν τον άξονα του κινητήρα. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν χρησιμοποιώντας επιταχυνσιόμετρα, τα οποία τοποθετήθηκαν στο κέλυφος κοντά στις φωλιές των τριβέων με μαγνητικές βάσεις. Η συλλογή των σημάτων επιτάχυνσης πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ένα 16-κάναλο Καταγραφικό (16 channel DAT recorder). Τα σήματα στη συνέχεια επεξεργάστηκαν σε περιβάλλον MATLAB©. Τα ψηφιακά δεδομένα συλλέχθηκαν με συχνότητα δειγματοληψίας 12,000 δεδομένα ανά δευτερόλεπτο. Τα δεδομένα ταχύτητας και ιπποδύναμης συλλέχθηκαν χρησιμοποιώντας τον αισθητήρα/κωδικοποιητή και καταγράφηκαν με το χέρι. Κάθε σήμα έχει μήκος 8,192 δεδομένα.



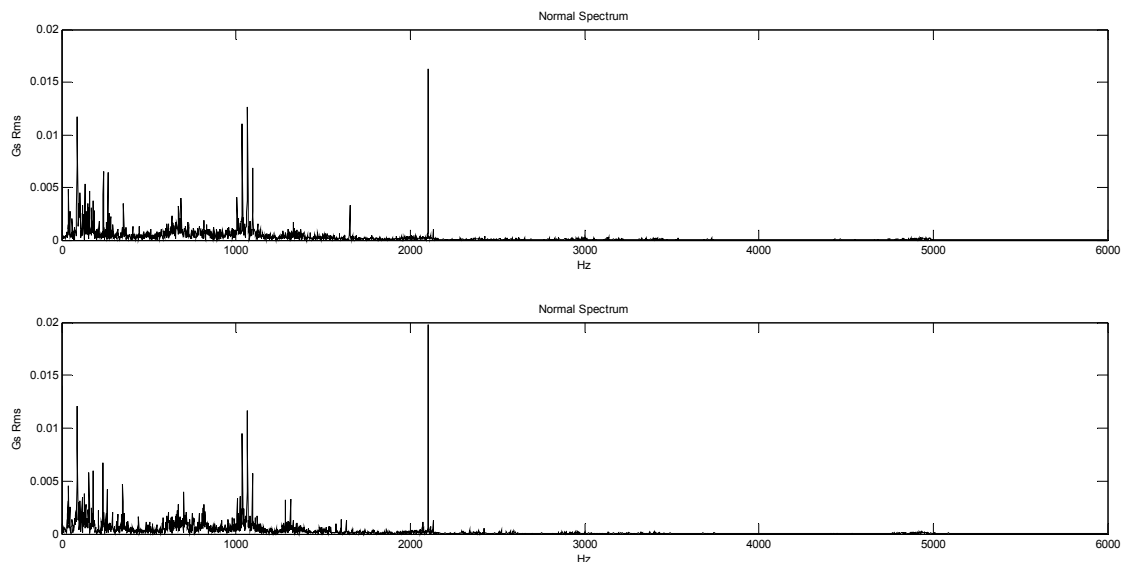
Σχήμα 4-7: Πειραματική Κλίνη Δοκιμών.

Το έδρανο που εξετάζεται είναι ένας ένσφαιρος τριβέας βαθιάς αύλακος (deep groove ball bearing) κατασκευασμένος από την εταιρία SKF. Ο ένσφαιρος τριβέας που βρίσκεται τοποθετημένος στην πλευρά του κινητήρα (drive end bearing) είναι τύπου 6205-2RS JEM με Συχνότητα BPF1 ίση με $5.4152x f_{shaft}$ και Συχνότητα BPFO ίση με $3.5848x f_{shaft}$, οδηγώντας στις θεωρητικές εκτιμήσεις των αναμενόμενων συχνοτήτων BPFO και BPF1 που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3. Η λειτουργία της μηχανής υπό βλάβης επιτυγχάνεται με την χρήση ένσφαιρων τριβέων στους οποίους έχουν προκληθεί σημειακά τοπικά σφάλματα. Τα σφάλματα αυτά εισάγονται στους εξεταζόμενους τριβείς χρησιμοποιώντας μια μηχανή ηλεκτροδιάβρωσης και έχουν διαμέτρους φθοράς 7 mils και 21 mils (1 mil=0.001 inches). Οι φθορές πραγματοποιούνται ανάλογα στον εσωτερικό και στον εξωτερικό δακτύλιο. Κάθε ένσφαιρος τριβέας δοκιμάστηκε υπό τέσσερα διαφορετικά φορτία (0, 1, 2 and 3 hp) που καταλήγουν σε τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες του κινητήρα. Τα εξεταζόμενα δεδομένα καταγράφηκαν στην πειραματική κλίνη δοκιμών υπό τρεις διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας: (α) κανονικές συνθήκες λειτουργίας (3 μετρήσεις), (β) με σφάλμα στον Εξωτερικό Δακτύλιο (8 μετρήσεις) and (γ) με σφάλμα στον εσωτερικό δακτύλιο (8 μετρήσεις) όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3.

Παρακάτω στα Σχήματα 4-8 έως 4-13 παρουσιάζονται ενδεικτικά φάσματα κάποιων από τα εξεταζόμενα σήματα και φάσματα των αντίστοιχων περιβαλλουσών τους.

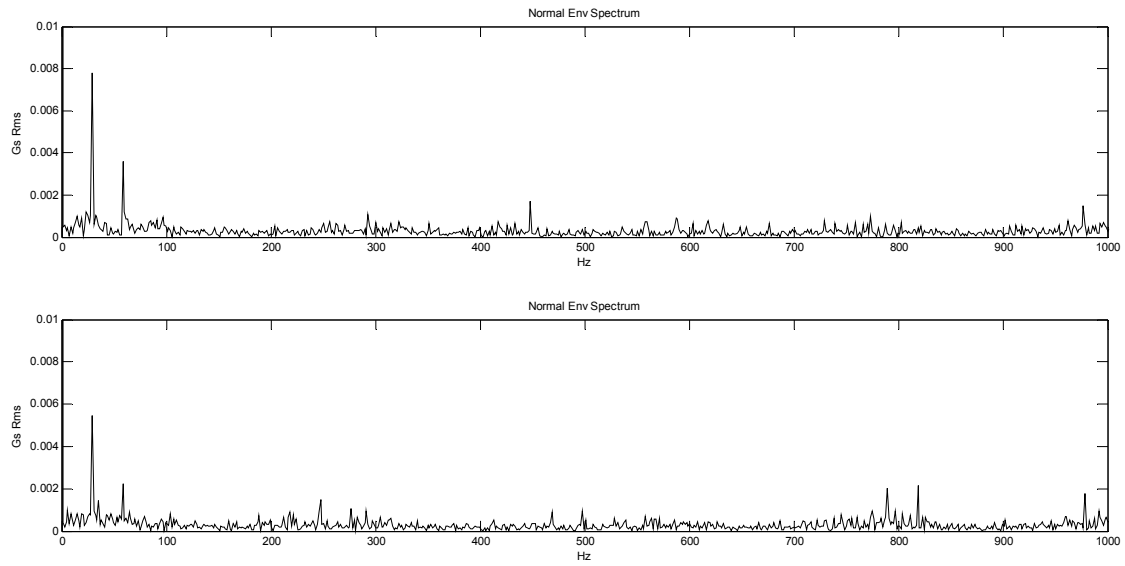
Meas	Fault Type	Fault Diameter (inches)	Motor Load (HP)	Approx. Motor Speed (rpm)	Characteristic Frequency (Hz)	SVM1		SVM2	
						Distance	Class	Distance	Class
EM1	Normal	-	1	1772	-	1,8022	+1	-	-
EM2	Normal	-	2	1750	-	1,6298	+1	-	-
EM3	Normal	-	3	1725	-	1,7187	+1	-	-
EM4	Inner Race	0.007"	0	1797	162,19	-1,1082	-1	-0,9922	-1
EM5	Inner Race		1	1772	159,93	-1,3672	-1	-1,0199	-1
EM6	Inner Race		2	1750	157,94	-1,2227	-1	-0,9689	-1
EM7	Inner Race		3	1730	156,14	-1,0219	-1	-0,8763	-1
EM8	Inner Race	0.021"	0	1797	162,19	-1,5451	-1	-1,0016	-1
EM9	Inner Race		1	1772	159,93	-1,5771	-1	-1,0156	-1
EM10	Inner Race		2	1750	157,94	-1,6426	-1	-1,0491	-1
EM11	Inner Race		3	1730	156,14	-1,6489	-1	-0,9068	-1
EM12	Outer Race	0.007"	0	1797	107,36	-2,9291	-1	0,6269	+1
EM13	Outer Race		1	1772	105,87	-2,9128	-1	0,4788	+1
EM14	Outer Race		2	1750	104,56	-3,2225	-1	0,5450	+1
EM15	Outer Race		3	1730	103,36	-2,9765	-1	0,6385	+1
EM16	Outer Race	0.021"	0	1797	107,36	-1,3260	-1	0,1039	+1
EM17	Outer Race		1	1772	105,87	-1,2395	-1	0,0651	+1
EM18	Outer Race		2	1750	104,56	-1,1132	-1	0,0662	+1
EM19	Outer Race		3	1730	103,36	-0,9343	-1	0,1225	+1

Πίνακας 4-3: Πειραματική Περίπτωση: Δεδομένα και Αποτελέσματα.

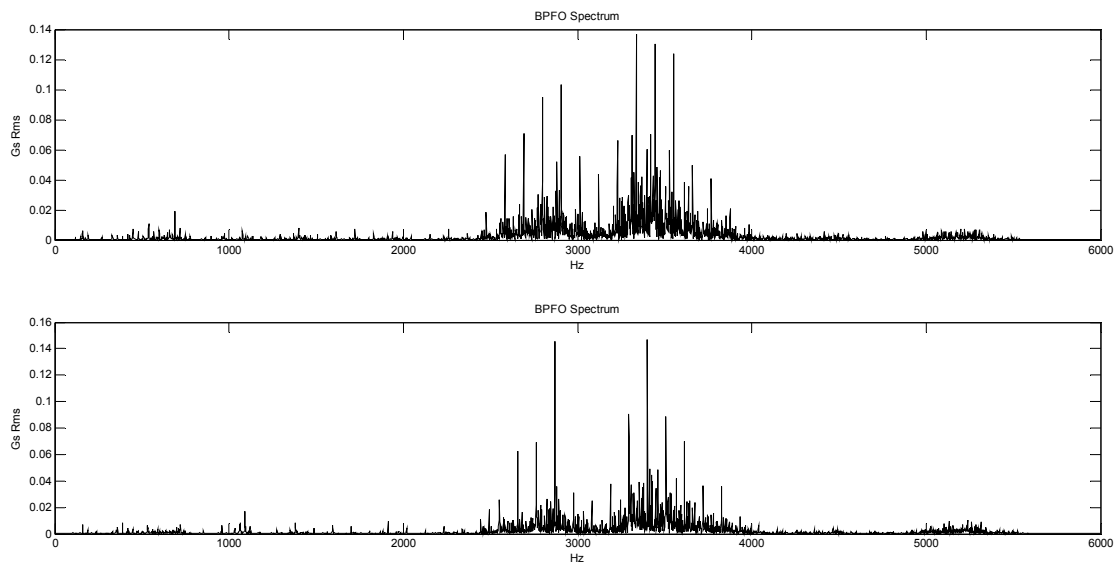


Σχήμα 4-8: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα αρχικών σημάτων υπό καλή λειτουργία. (α) EM1 και (β) EM2.

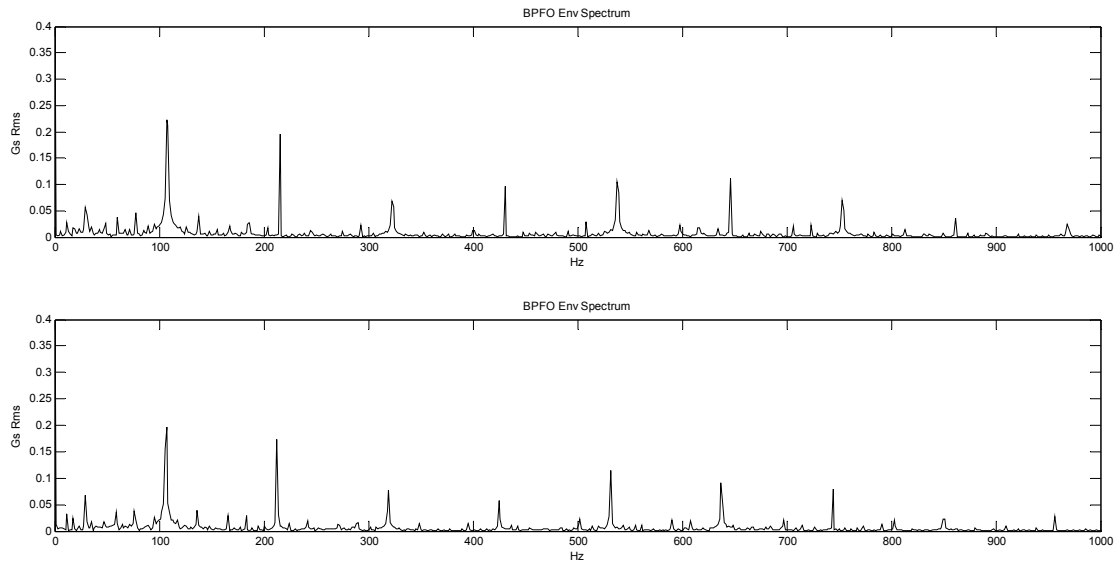
Μέθοδοι Αυτόματης Διάγνωσης Βλαβών



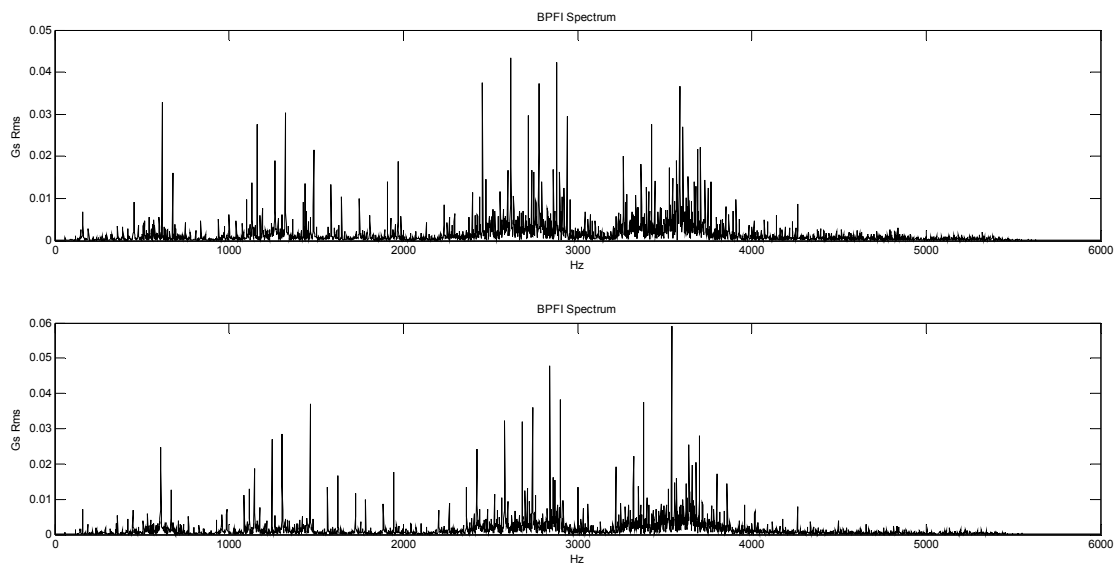
Σχήμα 4-9: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα Περιβάλλουσας σημάτων υπό καλή λειτουργία. (α) EM1 and (β) EM2.



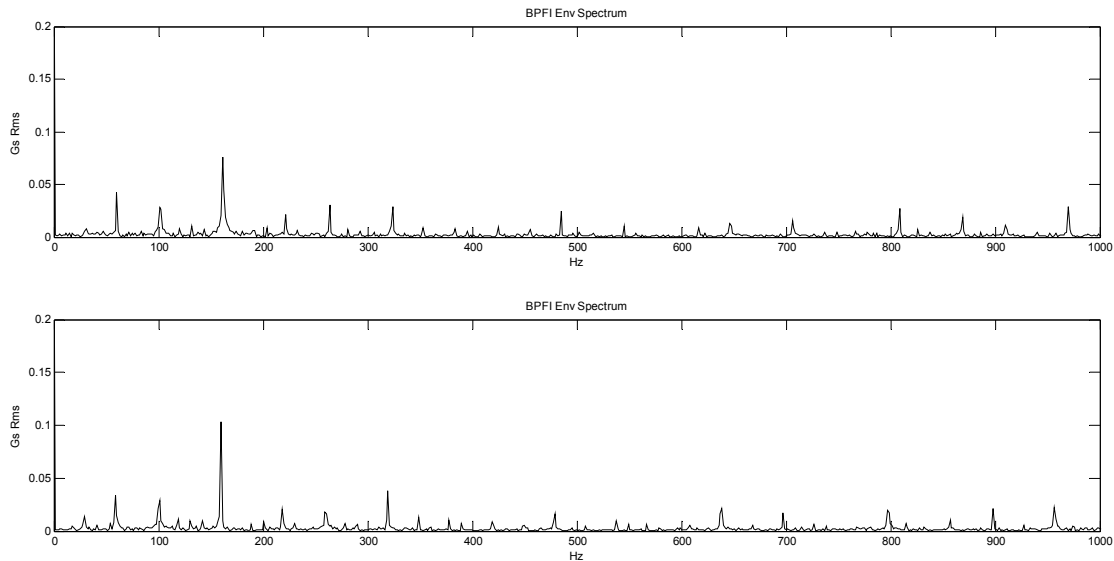
Σχήμα 4-10: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα σημάτων με φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα. (α) EM12 and (β) EM13.



Σχήμα 4-11: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα Περιβάλλουσας σημάτων με φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα. (α) EM12 and (β) EM13.



Σχήμα 4-12: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα σημάτων με φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα. (α) EM4 and (β) EM5.



Σχήμα 4-13: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα Περιβάλλουσας σημάτων με φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα. (α) EM4 and (β) EM5.

4.7.2 Εκτίμηση της Επίδοσης της διαδικασίας Εκπαίδευσης και Ταξινόμησης

Η διαγνωστική προσέγγιση δύο σταδίων που περιγράφηκε παραπάνω εφαρμόστηκε σε ένα σύνολο δεδομένων που προέρχονται από δεκαεννέα (19) περιπτώσεις. Το μοντέλο δυναμικής προσομοίωσης βλαβών ένσφαιρων τριβέων ρυθμίζεται καταλλήλως για να παραχθούν ένα συγκεκριμένος αριθμός προσομοιωμένων σημάτων. Το δεδομένα του μοντέλου ανανεώνονται με την ταχύτητα περιστροφής του άξονα και τις αναμενόμενες συχνότητες BPFO και BPF I του τριβέα.

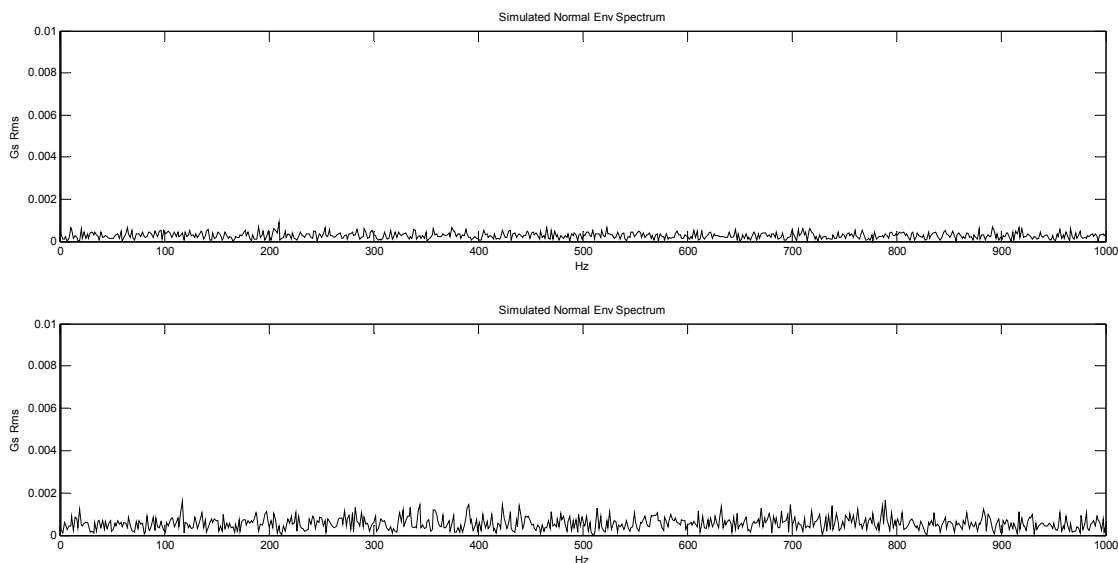
Στη συνέχεια, επιλέγονται τέσσερις (4) παράμετροι του μοντέλου όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-4: (α) Η Μέση Τιμή του Πλάτους του Σήματος (Gs), (β) το μέγιστο ποσοστό της Ολίσθησης (Slip) που μπορεί να εμφανίζουν οι σφαίρες σε σχέση με τους δακτυλίους (%), (γ) το επίπεδο του Θορύβου NL (%) και (δ) η διεγερόμενη από τις κρούσεις ιδιοσυχνότητα (Hz). Επιλέγονται τέσσερα διαφορετικά πλάτη στο εύρος 0 έως 40 Gs Rms έτσι ώστε να καλυφθεί όλο το εύρος τιμών της μέσης τιμής του πλάτους των σημάτων κραδασμού. Οι τιμές αυτές έχουν προκύψει με βάση αφενός μεν τα διεθνή πρότυπα αφετέρου δε από την μακροχρόνια εμπειρία στις μετρήσεων κραδασμών που διαθέτει το προσωπικό του Εργαστηρίου Δυναμικής και Κατασκευών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σε όλες τις περιπτώσεις η Τυπική Απόκλιση του Σήματος επιλέχθηκε ίση με 5%. Τα προσομοιωμένα σήματα, που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση των ταξινομητών SVM, παρήχθησαν χρησιμοποιώντας συνολικά τέσσερα διαφορετικά Πλάτη, τρεις Συχνότητες Συντονισμού, τρία επίπεδα θορύβου και τρία επίπεδα ολίσθησης. Ο θόρυβος που εισάγεται στα προσομοιωμένα σήματα είναι Λευκός της τάξης του 5% SNR ενώ το ποσοστό της Ολίσθησης κυμαίνεται έως 3%. Επιλέγεται μόνο μια ιδιοσυχνότητα καθώς η διακύμανση της καλύπτει το σύνολο του πεδίου συχνότητας. Τελικά το μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιείται για την παραγωγή εκατόν οχτώ (108) σημάτων που προσομοιώνουν σφάλμα

στον εσωτερικό δακτύλιο του τριβέα και άλλων εκατόν οχτώ (108) σημάτων που προσομοιώνουν σφάλμα στον εξωτερικό δακτύλιο. Η φυσιολογική λειτουργία προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας Λευκό Θόρυβο με δώδεκα (12) διαφορετικά επίπεδα θορύβου. Τα φάσματα της περιβάλλουσας χαρακτηριστικών προσομοιωμένων σημάτων παρουσιάζονται στα Σχήματα 4-14, 4-15 και 4-16. Τα προσομοιωμένα σήματα στο Σχήμα 4-14 είναι σήματα Λευκού Θορύβου που επιδεικνύουν την Κατάσταση Καλής Λειτουργίας. Τα σήματα του Σχήματος 4-15 παρουσιάζουν φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο ενώ τα σήματα του Σχήματος 4-16 παρουσιάζουν φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο.

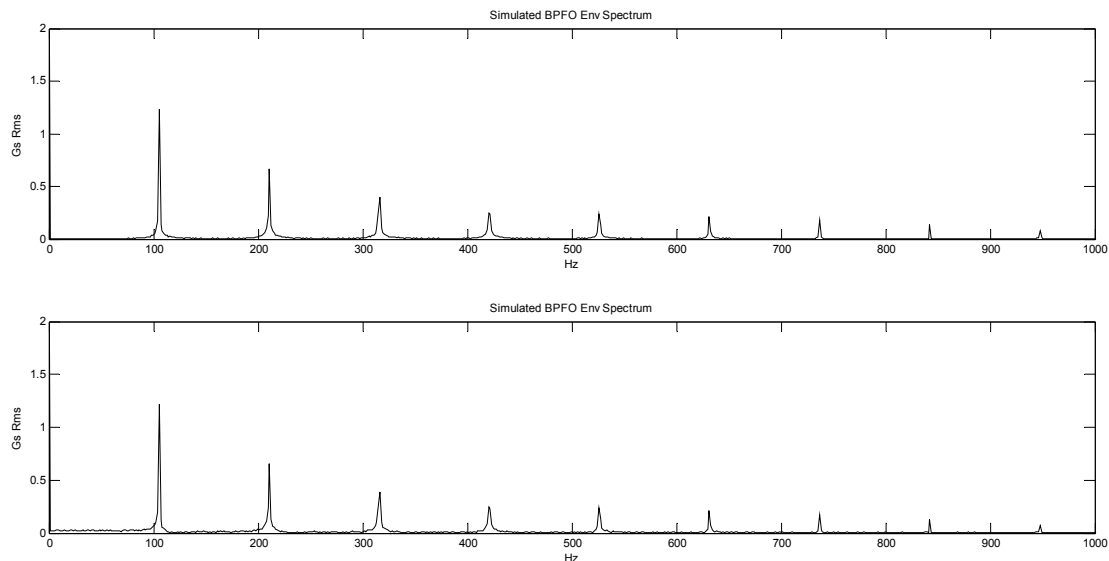
Model Parameters	Outer Race Defect		Inner Race defect	
	Industrial Signals	Experimental Signals	Industrial Signals	Experimental Signals
Amplitude (Gs)	0.5-40	0.5-40	0.5-40	0.5-40
Slip (%)	0.5-3	0.5-3	0.5-3	0.5-3
Noise Level NL (%)	0.1-5	0.1-5	0.1-5	0.1-5
Natural Frequency (Hz)	1500-4000	1000-6000	1500-4000	1000-6000

Πίνακας 4-4: Εύρος τιμών των παραμέτρων του στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης της δυναμικής απόκρισης ένσφαιρων τριβέων.

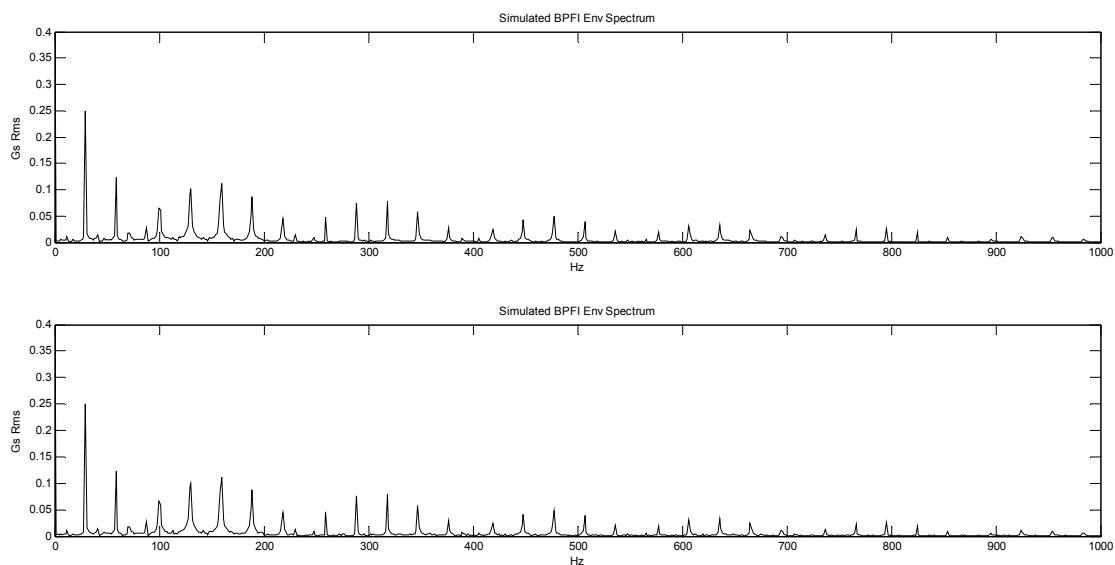


Σχήμα 4-14: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα Περιβάλλουσας σημάτων προσομοιωμένων σημάτων υπό καλή. (α) Amp 10 Gs, Noise level 0.01%, (β) Amp 20 Gs, NL 1%.

Μέθοδοι Αυτόματης Διάγνωσης Βλαβών



Σχήμα 4-15: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα Περιβάλλουσας προσομοιωμένων σημάτων με φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα. Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 2000 (α) slip up to 0.88%, (β) slip up to 1.75%.



Σχήμα 4-16: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα Περιβάλλουσας σημάτων με φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα. Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 2000 (α) slip up to 1.35%, (β) slip up to 1.5%.

Τα διακόσια είκοσι οχτώ (228) σήματα επεξεργάζονται περαιτέρω χρησιμοποιώντας την Ανάλυση Τάξης (Order Analysis) και υπολογίζονται τα Χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1. Έπειτα, οι δύο ταξινομητές SVMs εκπαιδεύονται. Τα Χαρακτηριστικά Εισόδου για κάθε ταξινομητή SVM παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-2. Η Γραμμική Συνάρτηση Βάσης (Linear Basis Function) επιλέγεται αρχικά για κάθε ταξινομητή SVM. Η παράμετρος ποινής C επιλέγεται ίση με 100 (υψηλή τιμή) και κατά συνέπεια λίγα λάθη επιτρέπονται. Τα Χαρακτηριστικά Εισόδου του πρώτου ταξινομητή SVM είναι: α) το

Άθροισμα των Αρμονικών της Ταχύτητας Περιστροφής (SSHR), υπολογισμένο στο αρχικό σήμα, β) το Άθροισμα των Αρμονικών της Χαρακτηριστικής Συχνότητας Διέλευσης Σφαιρών στο Εσωτερικό Δακτύλιο και των Αρμονικών της Χαρακτηριστικής Συχνότητας Διέλευσης Σφαιρών στο Εξωτερικό Δακτύλιο (SIORH), υπολογισμένο στο αποδιαμορφωμένο σήμα και γ) η Υψίσυχη Ενέργεια (High Frequency Energy - HFE), υπολογισμένη στο αρχικό σήμα. Το σύνολο εκπαίδευσης αποτελείται από διακόσια είκοσι οχτώ 228 παραδείγματα, 12 θετικά και 216 αρνητικά. Δύο (2) Διανύσματα Υποστήριξης (Support Vectors) επιλέχθηκαν ενώ κανένα από αυτά δεν βρίσκεται στο όριο C, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4-5.

sv	SSHR	SIORH	HFE
1	0.9123	0.1623	0.1361
2	0.9769	0.6278	0.0681

Πίνακας 4-5: Πειραματική Περίπτωση: Διανύσματα υποστήριξης (Support Vectors) του SVM 1.

Τα Χαρακτηριστικά Εισόδου του δεύτερου ταξινομητή παρουσιάζονται στους Πίνακες 1 και 2. Το σύνολο εκπαίδευσης αποτελείται από διακόσια δέκα έξι (216) παραδείγματα, εκατόν οχτώ θετικά και 108 αρνητικά. Τρία (3) Διανύσματα Υποστήριξης επιλέχθηκαν, ένα (1) από τα θετικά παραδείγματα και δύο (2) από τα αρνητικά παραδείγματα (Πίνακας 4-6).

sv	S1X	S2X	S3X	S4X	S1O	S2O	S3O	S4O
1	0,0306	0,2459	0,0192	0,1136	0,1320	0,0092	0,0512	0,0840
2	0,0214	0,2514	0,0209	0,0870	0,1598	0,0150	0,0394	0,1121
3	0,0022	0,0078	0,4519	0,0066	0,1768	0,2630	0,0121	0,0038
	S1I	S2I	S3I	S4I	SSHE	SORH	SIRH	
1	0,0709	0,0157	0,0496	0,0199	0,2111	0,5114	0,1192	
2	0,0867	0,0157	0,0854	0,0241	0,1634	0,6087	0,1467	
3	0,1784	0,0209	0,0223	0,1297	0,0418	0,2108	1,0230	

Πίνακας 4-6: Πειραματική Περίπτωση: Διανύσματα υποστήριξης (Support Vectors) του SVM 2.

Οι δεκαεννέα (19) διαθέσιμες μετρήσεις, που αντιστοιχούν σε διαφορετικά επίπεδα και σε διαφορετικούς τύπους βλάβης, χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον έλεγχο της επίδοσης του προτεινόμενου συστήματος. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης ταξινόμησης βλαβών δύο σταδίων χρησιμοποιώντας τις Μηχανές Διανυσματικής Υποστήριξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί το ποσοστό επιτυχίας αγγίζει το 100% και στα δύο στάδια σε όλες τις μετρήσεις και σε όλες τις περιπτώσεις.

4.8 Βιομηχανική Εφαρμογή

4.8.1 Περιγραφή Βιομηχανικής Εφαρμογής

Η αξιολόγηση της προτεινόμενης προσέγγισης πραγματοποιήθηκε επίσης σε τρεις διαφορετικές τυπικές περιπτώσεις (test cases) που περιλαμβάνουν διαδοχικές μετρήσεις της δυναμικής απόκρισης ελαττωματικών ένσφαιρων τριβέων και μετρήθηκαν στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις της εταιρίας Αλουμίνιο της Ελλάδας Α.Ε.

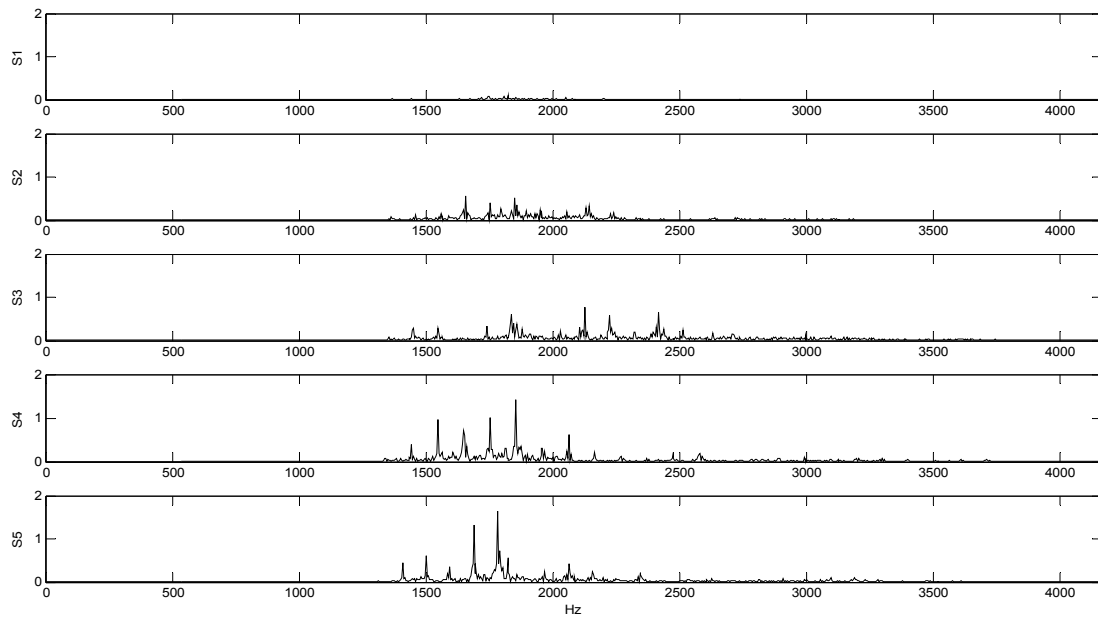
Η συσκευή καταγραφής των δεδομένων βασίζεται σε έναν φορητό H/Y Pentium II/266 MHz, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με την μετρητική κάρτα 6024E της National Instruments, η οποία ενσωματώνεται σε είσοδο PCMCIA. Ο A/D μετατροπέας της μετρητικής κάρτας έχει ανάλυση 12 bits, φέρει 16 αναλογικά κανάλια εισόδου και έχει μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας 200 KHz. Το αισθητήριο που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις ήταν επιταχυνσιόμετρο της Brüel & Kjaer με ευαισθησία 100 mV/g και δυναμική περιοχή από 1 Hz έως 10 KHz. Η καταγραφή των δεδομένων πραγματοποιείται με το λογισμικό LabVIEW της National Instruments.

Στην πρώτη εξεταζόμενη περίπτωση το σύνολο των δεδομένων περιλαμβάνει σήματα που μετρήθηκαν σε έδρανο βιομηχανικού ανεμιστήρα τροφοδοσίας αέρα λέβητα που παρουσιάζει σφάλμα στον εξωτερικό δακτύλιο. Ο κινητήρας έχει ιπποδύναμη 180 KW. Η πτερωτή αποτελείται από 12 πτερύγια. Ο άξονας του κινητήρα συνδέεται με μεταλλικό σύνδεσμο με τον άξονα της πτερωτής. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα κατά την διάρκεια των μετρήσεων είναι ίση κατά προσέγγιση με 1,200 ΣΑΛ (rpm), δηλαδή ίση με 20 Hz. Το υπό παρακολούθηση έδρανο είναι τύπου 2312 της εταιρίας SKF και παρουσιάζει χαρακτηριστική Συχνότητα Διέλευσης Σφαιρών στον Εξωτερικό δακτύλιο BPFO ίση με 4.72 επί την συχνότητα περιστροφής του άξονα, οδηγώντας σε μια θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης συχνότητας BPFO κατά προσέγγιση ίση με 94 Hz. Το σήμα έχει μήκος 4,096 δείγματα και καταγράφηκε με συχνότητα δειγματοληψίας ίση με 8.33 KHz. Το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων είναι περίπου δύο μήνες. Τα φάσματα των σημάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-17 και τα φάσματα των αντίστοιχων αποδιαμορφωμένων σημάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-18.

Στην δεύτερη εξεταζόμενη περίπτωση οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ένσφαιρο τριβέα αντλίας, που παρουσιάζει φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα κατά την διάρκεια των μετρήσεων ήταν περίπου ίση με 1,320 Σ.Α.Λ. (rpm), δηλαδή 22 Hz. Ο υπό παρακολούθηση ένσφαιρος τριβέας είναι τύπου 22205 EK, και η Συχνότητα Διέλευσης Σφαιρών στον Εσωτερικό δακτύλιο BPFI είναι ίση με 8.32 επί την συχνότητα περιστροφής του άξονα, οδηγώντας σε μια θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης χαρακτηριστικής συχνότητας BPFI περίπου ίση με 183 Hz. Το σήμα έχει μήκος 4,096 δείγματα και η συχνότητα δειγματοληψίας είναι ίση με 8.33 KHz. Τα φάσματα των σημάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-19 ενώ τα φάσματα των αντίστοιχων αποδιαμορφωμένων σημάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-20.

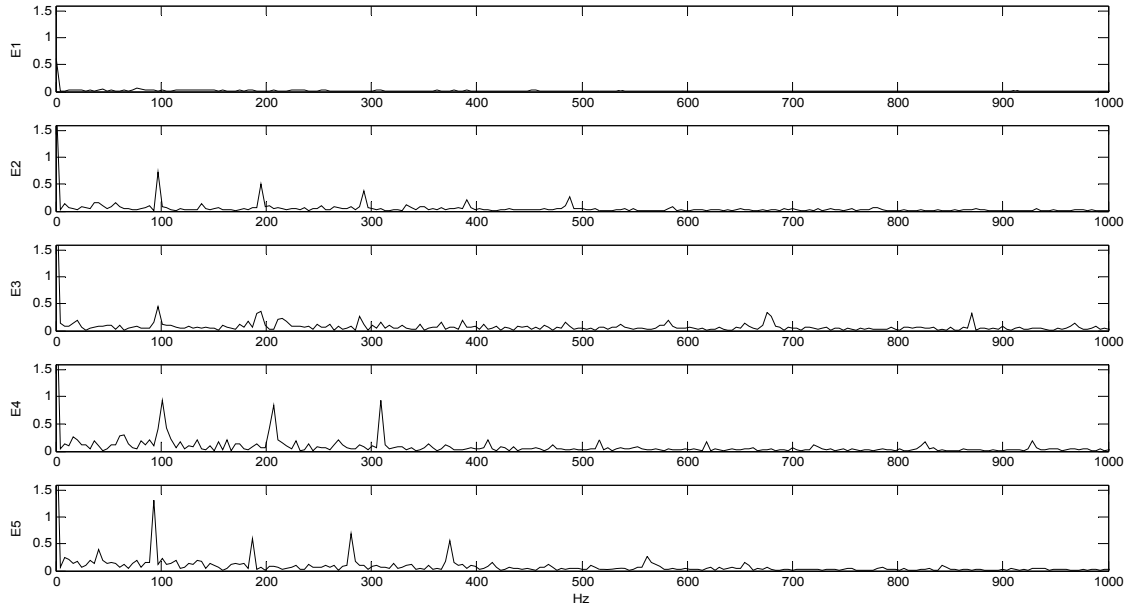
Το σύνολο δεδομένων της τρίτης περίπτωσης αποκτήθηκε από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε ένσφαιρο τριβέα ενός συμπιεστή, που παρουσιάζει φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα κατά την διάρκεια των μετρήσεων

ήταν γύρω στις 1,350 Σ.Α.Λ. (rpm), δηλαδή 22.5 Hz. Το ελεγχόμενο έδρανο είναι τύπου 22228 csk/w33 της εταιρίας SKF και παρουσιάζει Συχνότητα Διέλευσης Σφαιρών στον Εξωτερικό δακτύλιο BPFO ίση με 8.22 επί την συχνότητα περιστροφής του άξονα, οδηγώντας σε μια θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης συχνότητας BPFO γύρω στα 185 Hz. Το σήμα έχει μήκος 4,096 δείγματα και συχνότητα δειγματοληψίας ίση με 8.33 KHz. Η περίπτωση αυτή παρουσιάζει μια ταχύτατη εξέλιξη της βλάβης του τριβέα. Οι πρώτες τέσσερις μετρήσεις καταγράφηκαν σχεδόν ανά μία εβδομάδα. Το πέμπτο σήμα μετρήθηκε μετά την διακοπή λειτουργίας της μηχανής, την πραγματοποίηση εργασιών συντήρησης και την αντικατάσταση του ελεγχόμενου ένσφαιρου τριβέα. Τα φάσματα των σημάτων και τα φάσματα των αποδιαμορφωμένων σημάτων παρουσιάζονται στα Σχήματα 4-21 και 4-22.

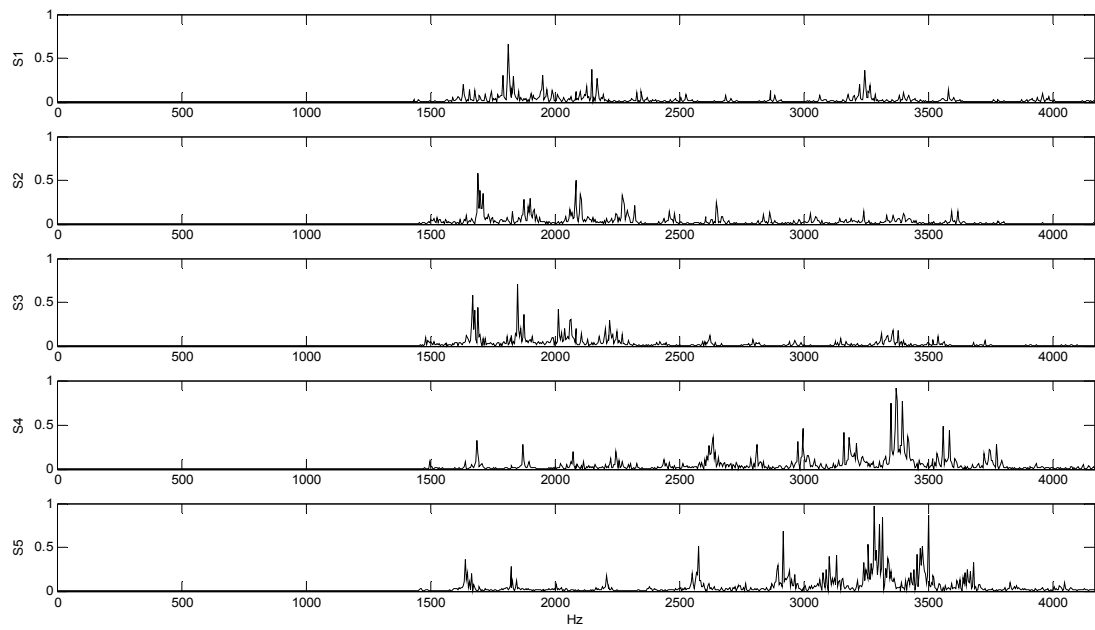


Σχήμα 4-17: Βιομηχανική Περίπτωση Ι: Φάσματα Σημάτων.

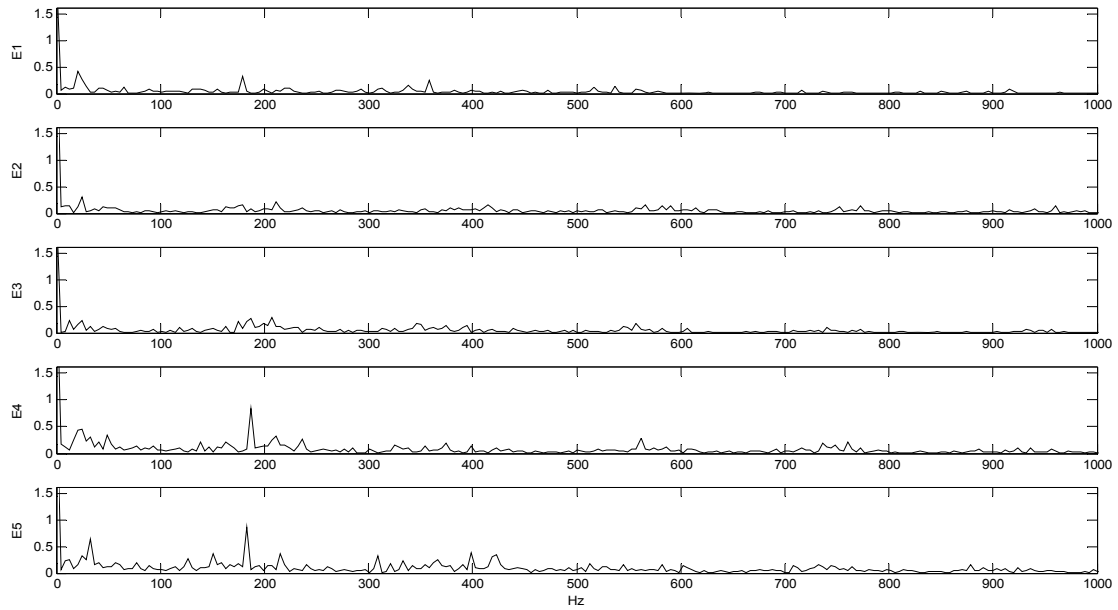
Μέθοδοι Αυτόματης Διάγνωσης Βλαβών



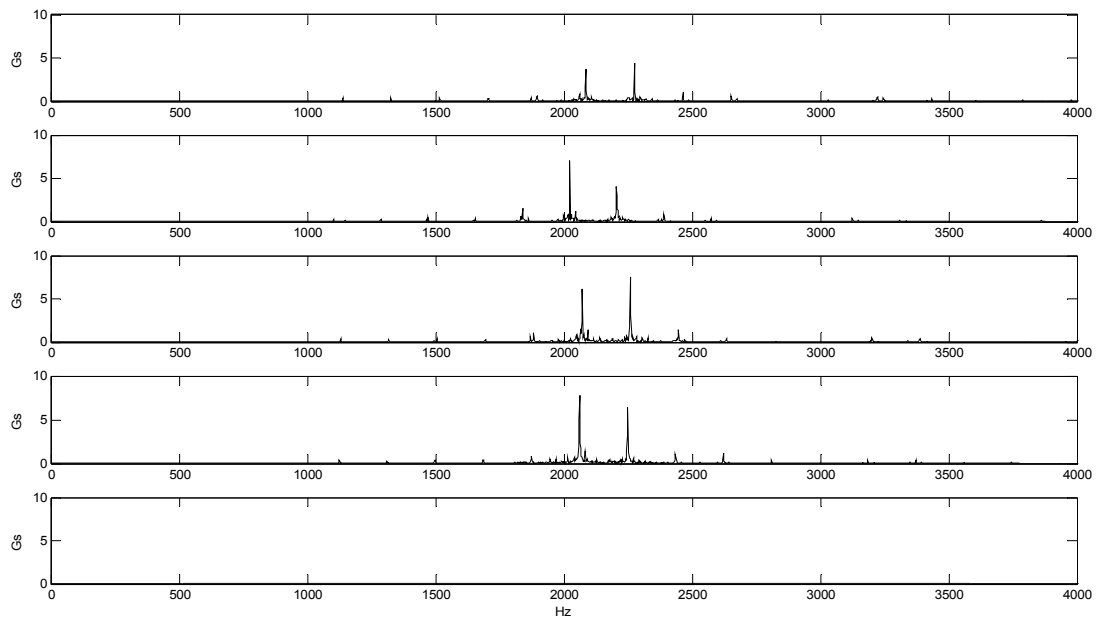
Σχήμα 4-18: Βιομηχανική Περίπτωση I: Φάσματα Αποδιαμορφωμένων Σημάτων.



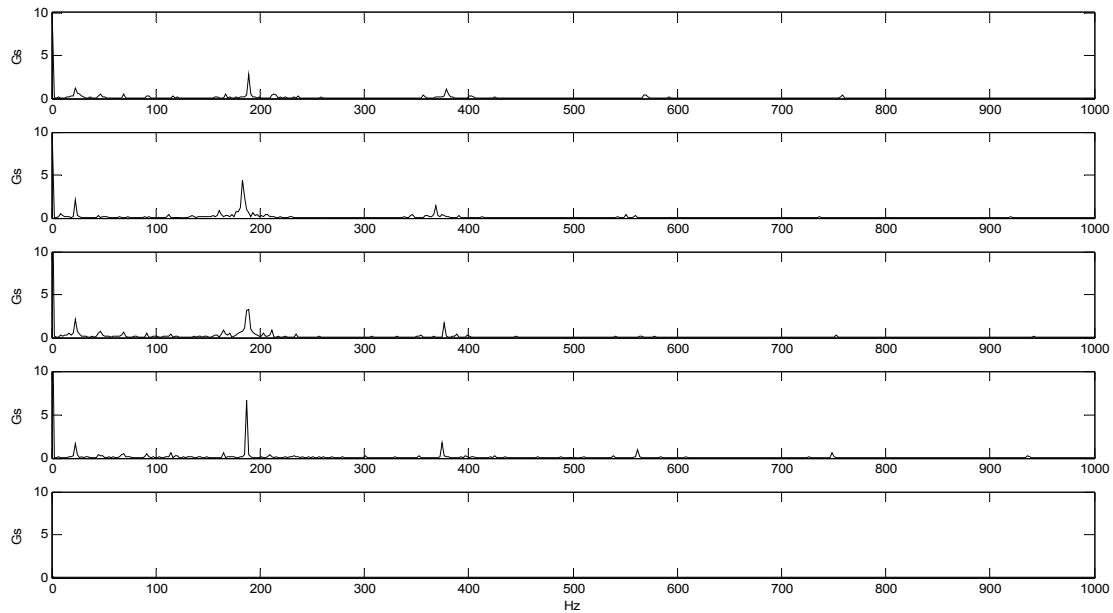
Σχήμα 4-19: Βιομηχανική Περίπτωση II: Φάσματα Σημάτων.



Σχήμα 4-20: Βιομηχανική Περίπτωση II: Φάσματα Αποδιαμορφωμένων Σημάτων.



Σχήμα 4-21: Βιομηχανική Περίπτωση III: Φάσματα Σημάτων.



Σχήμα 4-22: Βιομηχανική Περίπτωση III: Φάσματα Αποδιαμορφωμένων Σημάτων.

4.8.2 Ανάλυση των Επιδόσεων Βιομηχανικής Ταξινόμησης

Η προσέγγιση SVM δύο σταδίων εφαρμόστηκε σε τρεις βιομηχανικές περιπτώσεις. Η συχνότητα δειγματοληψίας όλων των σημάτων ήταν 8.33 KHz. Για τον λόγο αυτό, οι τρεις Συχνότητες Συντονισμού των προσομοιωμένων σημάτων επιλέχθηκαν λίγο χαμηλότερα στο πεδίο συχνότητας. Ξανά συνολικά εκατόν οχτώ (108) προσομοιωμένα σήματα παράχθηκαν για κάθε σφάλμα και κάθε περίπτωση. Επιπλέον, δώδεκα (12) προσομοιωμένα σήματα παρήχθησαν, παριστάνοντας την υγιή κατάσταση του τριβέα. Τα διακόσια είκοσι οχτώ σήματα επεξεργάζονται περαιτέρω χρησιμοποιώντας Ανάλυση Τάξης και δέκα οχτώ Χαρακτηριστικά του Πίνακα 4-1 υπολογίζονται. Τα φάσματα τριών χαρακτηριστικών προσομοιωμένων σημάτων και των αντίστοιχων αποδιαμορφωμένων σημάτων παρουσιάζονται διαδοχικά για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις στα Σχήματα 4-23 έως 4-28. Το πρώτο προσομοιωμένο σήμα παρουσιάζει τοπικό ελάττωμα στον εξωτερικό δακτύλιο του τριβέα, το δεύτερο παρουσιάζει ελάττωμα στον εσωτερικό δακτύλιο του τριβέα και το τρίτο είναι ένα σήμα Λευκού Θορύβου που προσομοιώνει την κατάσταση φυσιολογικής λειτουργίας.

Τα διακόσια είκοσι οχτώ (228) επεξεργάζονται περαιτέρω χρησιμοποιώντας Ανάλυση Τάξης και τα Χαρακτηριστικά που αναφέρονται στον Πίνακα 4-1 υπολογίζονται. Έπειτα, οι δύο ταξινομητές SVMs εκπαιδεύονται χρησιμοποιώντας τα Χαρακτηριστικά Εισόδου του Πίνακα 4-2. Το σύνολο εκπαίδευσης για τον πρώτο ταξινομητή SVM αποτελείται από διακόσια είκοσι οχτώ (228) παραδείγματα, δώδεκα (12) θετικά και διακόσια δέκα έξι (216) αρνητικά. Τα Χαρακτηριστικά Εισόδου του δεύτερου ταξινομητή αποτελείται από διακόσια δέκα έξι (216) παραδείγματα, εκατόν οχτώ (108) θετικά και εκατόν οχτώ (108) αρνητικά.

Στην πρώτη περίπτωση, ο πρώτος ταξινομητής SVM επιλέγει δύο (2) Διανύσματα Υποστήριξης (Support Vectors), ένα από τα θετικά παραδείγματα και ένα από τα αρνητικά παραδείγματα, ενώ κανένα από αυτά δεν είναι στο όριο C (Πίνακας 4-7). Ο δεύτερος

ταξινομητής SVM επιλέγει τέσσερα (4) Διανύσματα Υποστήριξης (Support Vectors), δύο (2) από τα θετικά παραδείγματα και δύο (2) από τα αρνητικά παραδείγματα (Πίνακας 4-8).

Στην δεύτερη περίπτωση, δύο (2) Διανύσματα Υποστήριξης επιλέχθηκαν στο πρώτο βήμα, ένα από τα θετικά παραδείγματα και ένα από τα αρνητικά παραδείγματα, ενώ κανένα από αυτά δεν βρίσκεται στο όριο C (Πίνακας 4-10). Επιπλέον, τρία (3) Support Vectors επιλέχθηκαν στο δεύτερο βήμα, ένα (1) από τα θετικά παραδείγματα και δύο (2) από τα αρνητικά παραδείγματα (Πίνακας 4-11).

Στην τρίτη περίπτωση, τέσσερα (4) Διανύσματα Υποστήριξης επιλέχθηκαν από τον πρώτο ταξινομητή SVM, δύο από τα θετικά παραδείγματα και δύο από τα αρνητικά παραδείγματα, ενώ δύο από αυτά βρίσκονται στο όριο C (Πίνακας 4-13). Τέσσερα (4) Διανύσματα Υποστήριξης επιλέχθηκαν από το δεύτερο ταξινομητή SVM, ένα (1) από τα θετικά παραδείγματα και τρία (3) από τα αρνητικά παραδείγματα (Πίνακας 4-14).

Οι πέντε (5) διαθέσιμες μετρήσεις για κάθε περίπτωση, που αντιστοιχούν σε διαφορετικά επίπεδα της βλάβης χρησιμοποιούνται στη συνέχεια, με στόχο την αξιολόγηση της επίδοσης των εκπαιδευμένων ταξινομητών. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης προσέγγισης ταξινόμησης δύο σταδίων παρουσιάζονται στους Πίνακες 4-9, 4-12 και 4-15. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, το ποσοστό επιτυχίας της μεθόδου πλησιάζει το 100% σε όλα τα επίπεδα όλων των μετρήσεων όλων των περιπτώσεων.

sv	SSHR	SIORH	HFE
1	0,8593	0,1565	0,1349
2	0,9616	1,0986	0,0636

Πίνακας 4-7: Βιομηχανική Περίπτωση I: Διανύσματα Υποστήριξης (Support Vectors) του SVM 1.

Sv	S1X	S2X	S3X	S4X	S1O	S2O	S3O	S4O	S1I	S2I	S3I	S4I	SSHE	SORH	SIRH
1	0,3876	0,3728	0,1749	0,2448	0,1796	0,0989	0,0833	0,0799	0,1632	0,0801	0,0194	0,0287	0,7957	0,6516	0,4657
2	0,2612	0,4010	0,1558	0,1818	0,2595	0,1443	0,0804	0,1728	0,2323	0,0669	0,1343	0,0377	0,5904	0,9676	0,5702
3	0,0319	0,0395	0,5370	0,0258	0,1773	0,2800	0,0317	0,0168	0,1202	0,0900	0,0174	0,0305	0,1794	0,2509	0,9677
4	0,0261	0,0468	0,5606	0,0221	0,2435	0,3388	0,0267	0,0424	0,1660	0,0911	0,1092	0,0535	0,1661	0,4419	1,1189

Πίνακας 4-8: Βιομηχανική Περίπτωση I: Διανύσματα Υποστήριξης (Support Vectors) του SVM 2.

Meas	Fault Type	Approx. Motor Speed (rpm)	Characteristic Frequency (Hz)	SVM1		SVM2	
				Distance	Class	Distance	Class
IMI1	Outer Race	956	75,24	-0,5881	-1	0,1177	+1
IMI2	Outer Race	1241	97,66	-0,7224	-1	0,1575	+1
IMI3	Outer Race	1241	97,66	-0,1392	-1	0,0885	+1
IMI4	Outer Race	1319	103,75	-1,1874	-1	0,2865	+1
IMI5	Outer Race	1190	93,60	-0,7504	-1	0,1425	+1

Πίνακας 4-9: Βιομηχανική Περίπτωση I: Δεδομένα και Αποτελέσματα.

sv	SSHR	SIORH	HFE
1	0,8695	0,6350	0,1778
2	0,9686	0,8572	0,0550

Πίνακας 4-10: Βιομηχανική Περίπτωση II: Διανύσματα Υποστήριξης (Support Vectors) του SVM1.

sv	S1X	S2X	S3X	S4X	S1O	S2O	S3O	S4O
1	0,4294	0,3485	0,2067	0,2661	0,1444	0,0403	0,0897	0,0313
2	0,2964	0,4450	0,2294	0,1957	0,2541	0,0569	0,0757	0,1766
3	0,0337	0,0586	0,4739	0,0274	0,0366	0,2268	0,0325	0,0085
	S1I	S2I	S3I	S4I	SSHE	SORH	SIRH	
1	0,0499	0,0528	0,0257	0,0248	0,8381	0,5499	0,3217	
2	0,0956	0,0404	0,0869	0,1465	0,6082	0,9627	0,5284	
3	0,0993	0,0330	0,0119	0,0074	0,1266	0,1156	0,8074	

Πίνακας 4-11: Βιομηχανική Περίπτωση II: Διανύσματα Υποστήριξης (Support Vectors) του SVM2.

Meas	Fault Type	Approx. Motor Speed (rpm)	Characteristic Frequency (Hz)	SVM1		SVM2	
				Distance	Class	Distance	Class
IMII1	Inner Race	1310	179,01	-0,0389	-1	-0,3063	-1
IMII2	Inner Race	1310	179,01	-0,2521	-1	-0,3034	-1
IMII3	Inner Race	1355	185,16	-1,1682	-1	-0,2329	-1
IMII4	Inner Race	1370	187,21	-1,0515	-1	-0,3717	-1
IMII5	Inner Race	1340	183,11	-1,3943	-1	-0,1038	-1

Πίνακας 4-12: Βιομηχανική Περίπτωση II: Δεδομένα και Αποτελέσματα.

sv	SSHR	SIORH	HFE
1	0,8745	0,6533	0,1483
2	0,8710	0,6688	0,1475
3	0,9656	0,6498	0,0670
4	0,9666	0,6629	0,0710

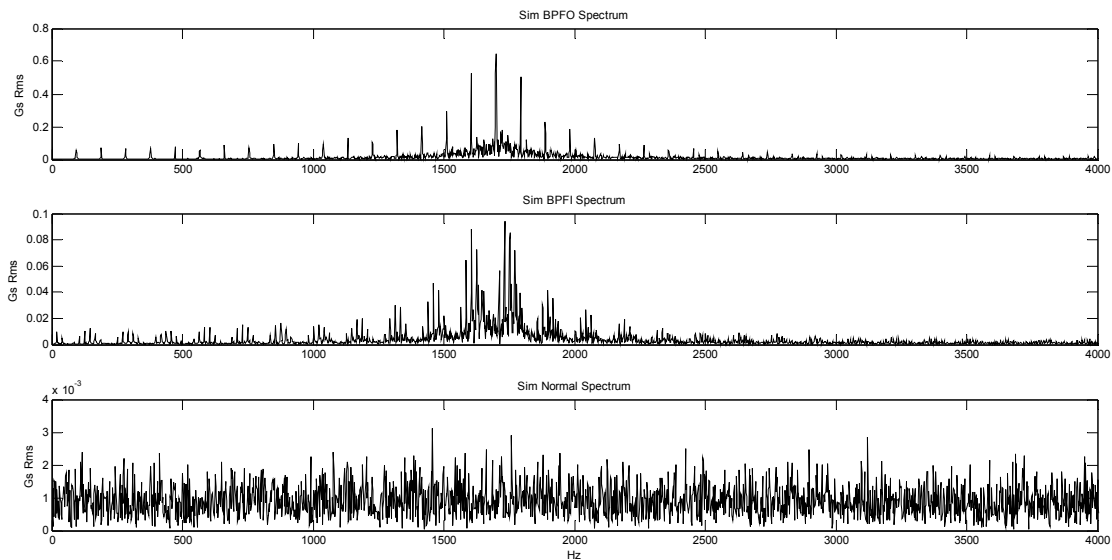
Πίνακας 4-13: Βιομηχανική Περίπτωση III: Διανύσματα Υποστήριξης (Support Vectors) του SVM1.

Sv	S1X	S2X	S3X	S4X	S1O	S2O	S3O	S4O
1	0,4679	0,2954	0,1564	0,2945	0,0757	0,0478	0,0940	0,0266
2	0,3542	0,4485	0,1967	0,2201	0,2262	0,0489	0,0828	0,1138
3	0,3471	0,4360	0,1948	0,2249	0,2341	0,0462	0,0911	0,1088
4	0,0351	0,0641	0,3937	0,0270	0,0240	0,1649	0,0256	0,0216
	S1I	S2I	S3I	S4I	SSHE	SORH	SIRH	
1	0,0228	0,0590	0,0223	0,0224	0,9155	0,4201	0,2494	
2	0,0785	0,0561	0,0544	0,0941	0,7133	0,8430	0,4182	
3	0,0785	0,0532	0,0586	0,0852	0,7163	0,8374	0,4047	
4	0,0168	0,0367	0,0156	0,0219	0,1243	0,1252	0,5972	

Πίνακας 4-14: Βιομηχανική Περίπτωση III: Διανύσματα Υποστήριξης (Support Vectors) του SVM2.

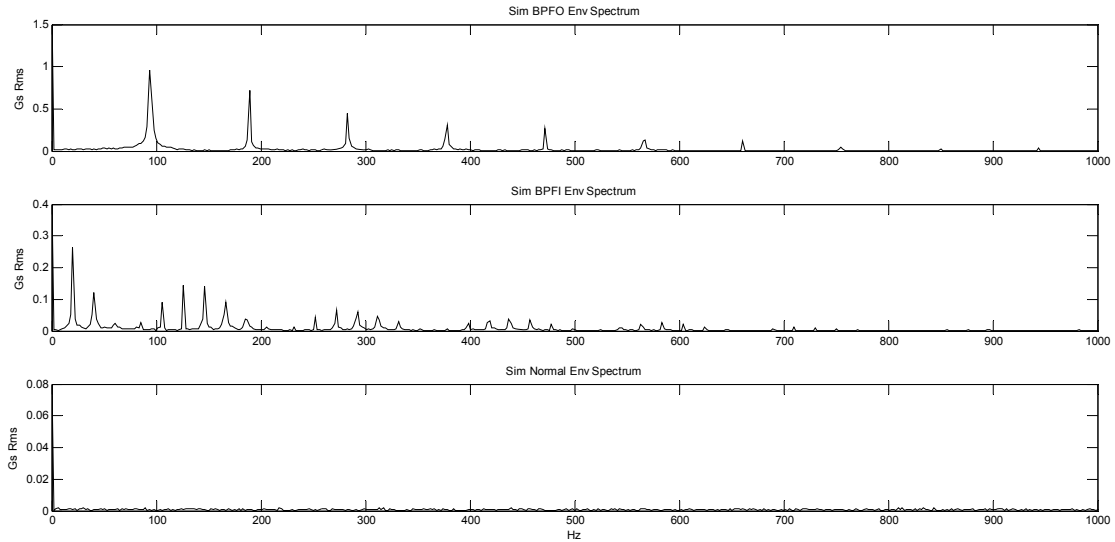
Meas	Fault Type	Approx. Motor Speed (rpm)	Characteristic Frequency (Hz)	SVM1		SVM2	
				Distance	Class	Distance	Class
IMIII1	Outer Race	1352	189,25	-1,6310	-1	0,5545	+1
IMIII2	Outer Race	1308	183,12	-1,7764	-1	0,7724	+1
IMIII3	Outer Race	1352	189,25	-1,4880	-1	0,6448	+1
IMIII4	Outer Race	1337	187,15	-1,8664	-1	0,8231	+1
IMIII5	Outer Race	1320	184,80	0,8992	+1	-	-

Πίνακας 4-15: Βιομηχανική Περίπτωση III: Δεδομένα και Αποτελέσματα.

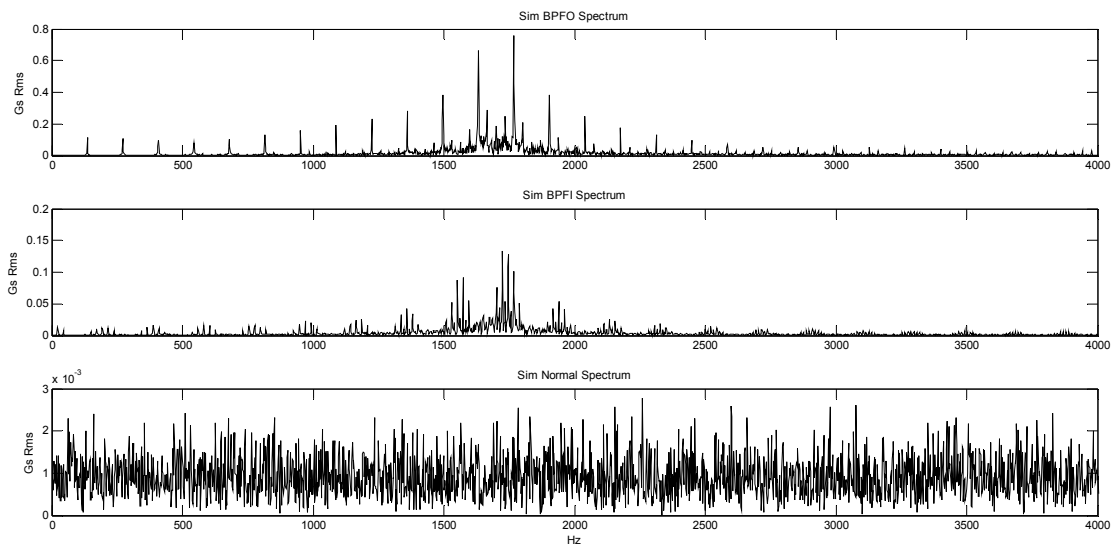


Σχήμα 4-23: Βιομηχανική Περίπτωση I: Φάσματα Προσομοιωμένων Σημάτων, (α) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700, slip up to 1.13%, (β) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700, slip up to 1.75%, (γ) NL 1%.

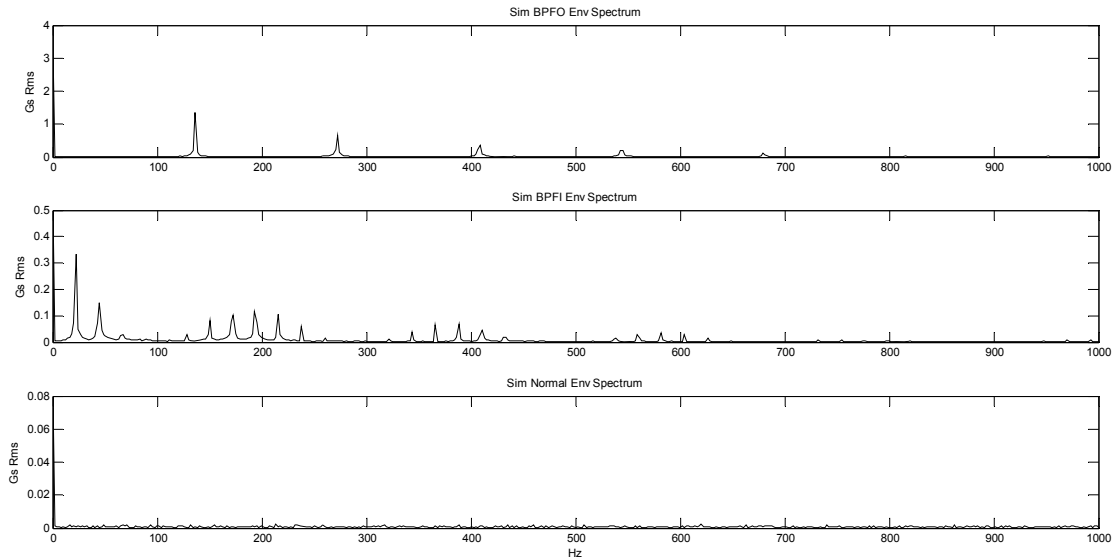
Μέθοδοι Αυτόματης Διάγνωσης Βλαβών



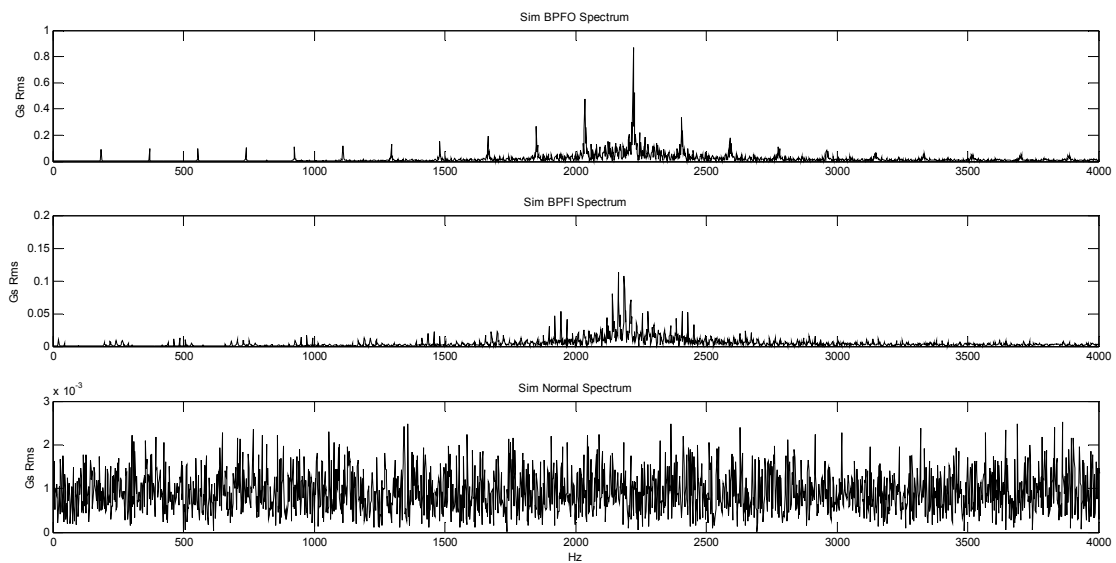
Σχήμα 4-24: Βιομηχανική Περίπτωση I: Φάσματα Περιβάλλουσας προσομοιωμένων σημάτων, (α) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700, slip up to 1.13%, (β) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700, slip up to 1.75%, (γ) NL 1%.



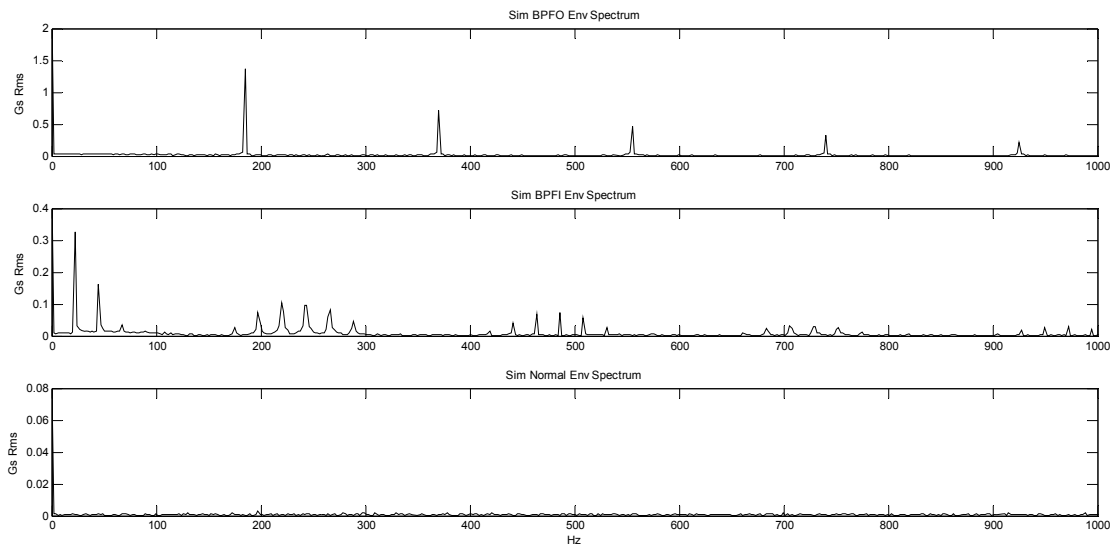
Σχήμα 4-25: Βιομηχανική Περίπτωση II: Φάσματα προσομοιωμένων σημάτων, (α) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700, slip up to 1.64%, (β) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700, slip up to 2.32%, (γ) NL 1%.



Σχήμα 4-26: Βιομηχανική Περίπτωση II: Φάσματα Περιβάλλουσας προσομοιωμένων σημάτων, (α) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700, slip up to 1.64%, (β) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700, slip up to 2.32%, (γ) NL 1%.



Σχήμα 4-27: Βιομηχανική Περίπτωση III: Φάσματα προσομοιωμένων σημάτων, (α) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 2200, slip up to 2.22%, (β) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700, slip up to 2.94%, (γ) NL 1%.



Σχήμα 4-28: Βιομηχανική Περίπτωση III: Φάσματα Αποδιαμορφωμένων Προσομοιωμένων Σημάτων, (α) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 2200, slip up to 2.22%, (β) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700, slip up to 2.94%, (γ) NL 1%.

4.8.3 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται από την εφαρμογή της προτεινόμενης υβριδικής “Ενός - Εναντίον - Όλων” προσέγγισης δύο σταδίων με χρήση Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης (SVM) για την αυτόματη διάγνωση της κατάστασης λειτουργίας ελαττωματικών ένσφαιρων τριβέων παρουσιάζει ένα ποσοστό επιτυχούς ταξινόμησης που αγγίζει το 100% και στα δύο στάδια για 34 μετρήσεις πειραματικών και τρεις βιομηχανικές περιπτώσεις.

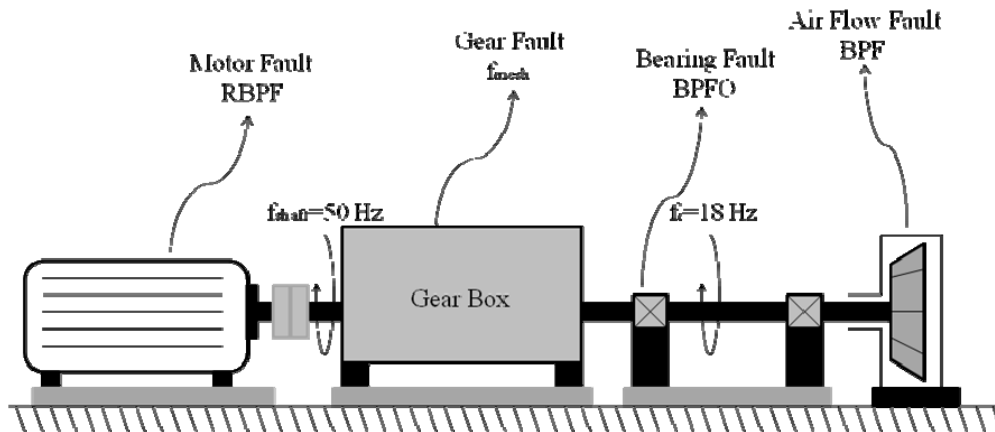
Αυτό το ποσοστό επιτυχίας οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το σύνολο χαρακτηριστικών εισόδου που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του SVM εξάγεται από ένα καθιερωμένο μοντέλο φυσικής και μηχανικής, που περιγράφει τη δυναμική απόκριση ελαττωματικών ένσφαιρων τριβέων. Το γεγονός αυτό μπορεί να πιστοποιηθεί από τη σύγκριση, κυρίως των φασμάτων της περιβάλλουσας των πειραματικών ή βιομηχανικών σημάτων, με εκείνα που προκύπτουν από την εφαρμογή του δυναμικού μοντέλου. Ως αποτέλεσμα της ποιότητας και της καταλληλότητας της προτεινόμενου συνόλου χαρακτηριστικών, ένας μικρός αριθμός Μηχανών Υποστήριξης είναι πρακτικά αναγκαίος. Έτσι, ένα γενικά ομαλό όριο απόφασης υπολογίζεται, γεγονός που επιτρέπει την εφαρμογή της απλούστερης δυνατής μορφής του πυρήνα του SVM, δηλαδή της γραμμικής συνάρτησης.

4.9 Βιομηχανική Εφαρμογή

4.9.1 Περιγραφή της Βιομηχανικής Εφαρμογής

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται μια άλλη προσέγγιση για την σύνθεση ενός αυτοματοποιημένου συστήματος διάγνωσης βλαβών για την παρακολούθηση της κατάστασης της λειτουργίας μηχανών. Η προσέγγιση αυτή ακολουθεί την κλασική οδό των μεθόδων

Μηχανικής Μάθησης και για την εκπαίδευση των ταξινομητών SVM χρησιμοποιούνται πραγματικές μετρήσεις κραδασμών μιας μηχανής. Στόχος είναι η ταξινόμηση μετρούμενων σημάτων σε τέσσερις κλάσεις βλάβης. Οι τέσσερις αυτές κλάσεις σχετίζονται με το είδος και τα στοιχεία μηχανών που απαρτίζουν την εξεταζόμενη μηχανή. Εξετάστηκαν δυο διαφορετικές δομές συστήματος με βάση την στρατηγική “Ένας – Εναντίον - Όλων”.



Σχήμα 4-29: Βιομηχανική Εγκατάσταση.

Τα εξεταζόμενα σήματα προέρχονται από μετρήσεις βιομηχανικής εγκατάστασης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-29. Η εγκατάσταση αποτελείται από κινητήρα, σύνδεσμο, κιβώτιο ταχυτήτων, ένσφαιρους τριβείς και μια περωτή. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα κατά την διάρκεια των μετρήσεων ήταν γύρω στις 3,000 ΣΑΛ (rpm) (δηλαδή η συχνότητα περιστροφής είναι ίση περίπου με 50 Hz). Ο κλωβός του ρότορα του κινητήρα αποτελείται από 20 ράβδους. Η Συχνότητα Διέλευσης Ράβδων Ρότορα (Rotor Bar Pass Frequency) εκτιμάται γύρω στα 1000 Hz. Η σχέση μετάδοσης του κιβωτίου (gear ratio) ήταν 2.78:1. Το πινιόν και ο συνεργαζόμενος τροχός είχαν δεκατέσσερα (14) και τριάντα εννιά (39) δόντια, αντίστοιχα, ενώ η Συχνότητα Εμπλοκής των γραναζιών (Gear Mesh Frequency - GMF) υπολογίζεται γύρω στα 700 Hz. Ο εξεταζόμενος τριβέας είναι αυτορυθμιζόμενος ένσφαιρος τύπου 1322 KM της εταιρίας SKF, με μια θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης Συχνότητας Διέλευσης Σφαιρών από τον Εξωτερικό Δακτύλιο γύρω στα 129 Hz. Ο αριθμός των πτερυγίων της περωτής ήταν 26 ενώ η συχνότητα περιστροφής της περωτής είναι ίση με 18 Hz, οδηγώντας σε μια θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης Συχνότητας Διέλευσης Πτερυγίων (Blade Pass Frequency - BPF) γύρω στα 468 Hz. Κάθε σήμα έχει μήκος 16,384 δείγματα και η συχνότητα δειγματοληψίας είναι ίση με 20 KHz για τα σήματα που σχετίζονται με σφάλμα του ένσφαιρου τριβέα (Bearing Fault), με σφάλμα ροής (Air Flow Fault) και με σφάλμα κινητήρα (Motor Fault) και 25 KHz για τα σήματα που σχετίζονται με σφάλμα οδοντωτών τροχών (Gear Fault). Συνολικά τα σήματα είναι σαράντα τρία (43). Δώδεκα (12) από αυτά παρουσιάζουν βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο του ένσφαιρου τριβέα, έντεκα (11) παρουσιάζουν αεροδυναμικό σφάλμα (Air Flow Fault), εννιά (9) σφάλμα κινητήρα (Motor Fault) και έντεκα (11) Σφάλμα κιβωτίου οδοντωτών τροχών (Gear Fault). Το συνολικό επίπεδο κραδασμών (Overall Vibration Amplitude) όλων των σημάτων είναι πάνω από 3 mm/sec RMS. Τα σήματα με συνολικό επίπεδο κραδασμών μικρότερο από 3

mm/sec RMS απορρίπτονται από τους αλγόριθμους καθώς με βάση διεθνείς κανονισμούς θεωρείται ότι αντιστοιχούν σε συνθήκες καλής λειτουργίας.

Κάθε μία από τις προαναφερθείσες βλάβες θεωρητικά, παρουσιάζει αιχμές σε χαρακτηριστικές ζώνες του πεδίου συχνότητας. Για τον λόγο αυτό, δώδεκα (12) χαρακτηριστικές ζώνες συχνοτήτων επιλέγονται προσεκτικά με βάση την διαγνωστική εμπειρία και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-16.

Η ανάπτυξη αιχμών στην συχνότητα f_{BPF} και στις αρμονικές της υποδεικνύει αεροδυναμικό πρόβλημα (Air Flow Fault). Η εμφάνιση αιχμών στην Συχνότητα f_{BPFO} και στις αρμονικές της σχετίζεται με σφάλμα στον εξωτερικό δακτύλιο του ένσφαιρου τριβέα. Στα σφάλματα οδοντωτών τροχών, η f_{mesh} και αρμονικές της είναι κυρίαρχες αιχμές ενώ είναι διαμορφωμένες από την συχνότητα περιστροφής του άξονα του συνεργαζόμενου τροχού f_r . Επιπροσθέτως στην περίπτωση βλάβης κινητήρα, η f_{RBPF} και οι αρμονικές της είναι ιδιαίτερα έντονες στο φάσμα συχνοτήτων και διαμορφώνονται από την δεύτερη αρμονική της συχνότητας του ρεύματος ($2 \times \text{Line Frequency} - 2 \times f_L$). Στα διαμορφωμένα σήματα, οι χαρακτηριστικές συχνότητες καθίστανται ευκρινέστερες αν τα σήματα αποδιαμορφωθούν αφού πρώτα διέρθουν από ένα υψίσυχο φίλτρο με συχνότητα αποκοπής 1000 Hz.

Στην ενότητα αυτή ως χαρακτηριστικά εισόδου των Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης εξετάζονται χαρακτηριστικά που μπορούν να εξαχθούν από το πεδίο της συχνότητας και αποτελούν περιγραφικούς δείκτες της μεταβολής της Κατάστασης Λειτουργίας της Μηχανής. Ως κύριο μέτρο-χαρακτηριστικό λαμβάνεται ο υπολογισμός της ενέργειας που κατανέμεται και αναπτύσσεται σε προσεκτικά, ορθά και αυστηρά καθορισμένες ζώνες συχνοτήτων, που μπορούν να καθοριστούν με βάση την καλή κατανόηση της φύσης του φαινομένου εμφάνισης της βλάβης από την σκοπιά ενός μηχανικού. Ο πετυχημένος ορισμός των συχνοτικών αυτών ζωνών μπορεί να οδηγήσει σε ακριβέστερη, πιο αξιόπιστη και αυτοματοποιημένη παρακολούθηση της κατάστασης λειτουργίας περιστρεφόμενου εξοπλισμού και στην έγκυρη και έγκαιρη διάγνωση βλαβών που ενδέχεται να εμφανιστούν στο σύστημα.

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι Ενέργειες κραδασμών σε χαρακτηριστικές ζώνες του φάσματος της περιβάλλουσας. Οι δείκτες που προτείνονται για χρήση ως χαρακτηριστικά εισόδου, βασίζονται σε ενέργειες κραδασμών στο πεδίο της συχνότητας και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-16. Οι δείκτες αυτοί είναι ενέργειες στο φάσμα της περιβάλλουσας του σήματος στις παρακάτω χαρακτηριστικές ζώνες συχνοτήτων:

- Το άθροισμα της ενέργειας του σήματος στην περιοχή συχνοτήτων από f_{BPFO} έως $3 \times f_{BPFO}$.

$$HFEZ_1 = \int_{f_{BPFO}}^{3 \times f_{BPFO}} p(t)^2 dt$$

- Το άθροισμα της ενέργειας του σήματος στην περιοχή συχνοτήτων από f_{BPF} έως f_{RBPF} .

$$HFEZ_2 = \int_{f_{BPF}}^{f_{RBPF}} p(t)^2 dt$$

- Η ενέργεια της πρώτης αρμονικής της συχνότητα περιστροφής του άξονα του συνεργαζόμενου τροχού f_t .
- Το άθροισμα των ενεργειών της δεύτερης αρμονικής της συχνότητας του ρεύματος ($2x$ Line Frequency - $2x f_L$) και της πρώτης αρμονικής της συχνότητας διέλευσης πτερυγίων f_{BPF} .

$$HFEZ_3 = E_{2x f_L} + E_{BPF}$$

- Η ενέργεια της δεύτερης αρμονικής της συχνότητας του ρεύματος ($2x$ Line Frequency - $2x f_L$).
- Η ενέργεια της πρώτης αρμονικής της συχνότητας διέλευσης πτερυγίων f_{BPF} .
- Το άθροισμα των τριών πρώτων αρμονικών της Συχνότητας Εμπλοκής των Οδοντοτροχών f_{mesh} . Οι αιχμές στις αρμονικές της Συχνότητας f_{mesh} χαρακτηρίζουν την ύπαρξη σφάλματος στους οδοντοτροχούς.

$$SF_{MESH} H = \sum_{h=1}^3 p_{F_{mesh}}(h)$$

- Το άθροισμα των τριών πρώτων αρμονικών της Συχνότητας Διέλευσης Σφαιρών στον Εξωτερικό Δακτύλιο (Ball Passing Frequency Outer Race - f_{BPFO}).

$$SORH = \sum_{h=1}^3 p_{BPFO}(h)$$

Επίσης υπολογίζονται οι παρακάτω δείκτες στο φάσμα του αρχικού σήματος στις παρακάτω χαρακτηριστικές ζώνες συχνοτήτων:

- Το άθροισμα των τριών πρώτων αρμονικών της Συχνότητας Διέλευσης Σφαιρών στον Εξωτερικό Δακτύλιο (Ball Passing Frequency Outer Race - f_{BPFO}).

$$SORHR = \sum_{h=1}^3 p_{BPFO}(h)$$

- Το άθροισμα των τριών πρώτων αρμονικών της Συχνότητας Διέλευσης Πτερυγίων f_{BPF} (Blade Passing Frequency). Οι αιχμές στις αρμονικές της Συχνότητας f_{BPF} χαρακτηρίζουν την ύπαρξη αεροδυναμικού σφάλματος.

$$SBPFHR = \sum_{h=1}^3 p_{BPF}(h)$$

- Το άθροισμα των τριών πρώτων αρμονικών της Συχνότητας Εμπλοκής των Οδοντοτροχών f_{mesh} .

$$SF_{MESH} HR = \sum_{h=1}^3 p_{F_{mesh}}(h)$$

- Το άθροισμα των τριών πρώτων αρμονικών της Συχνότητας Διέλευσης Σφαιρών των ράβδων του κλωβού του κινητήρα f_{RBPF} (Rotor Bar Passing Frequency). Οι αιχμές στις αρμονικές της Συχνότητας f_{RBPF} χαρακτηρίζουν την ύπαρξη σφάλματος στις ράβδους του κινητήρα.

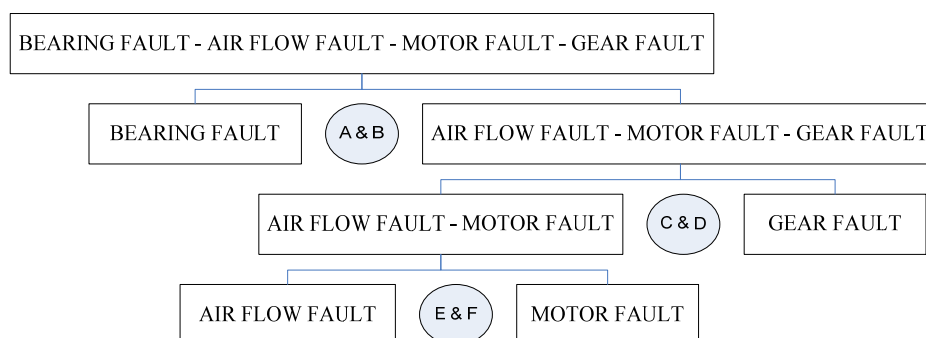
$$SF_{RBPF}HR = \sum_{h=1}^3 P_{FRBPF}(h)$$

Χαρακτηριστικά Εισόδου		
Τιμές Ενέργειας	Σταδιακός Αλγόριθμος	Απευθείας Αλγόριθμος
A	$HFEZ_1$	$SORHR$
B	$HFEZ_2$	$SBPFHR$
C	F_r	$SF_{MESH}HR$
D	$HFEZ_3$	$SF_{BPF}HR$
E	$2xF_L$	$SORH$
F	F_{BPF}	$SF_{MESH}H$

Πίνακας 4-16: Χαρακτηριστικά Εισόδου.

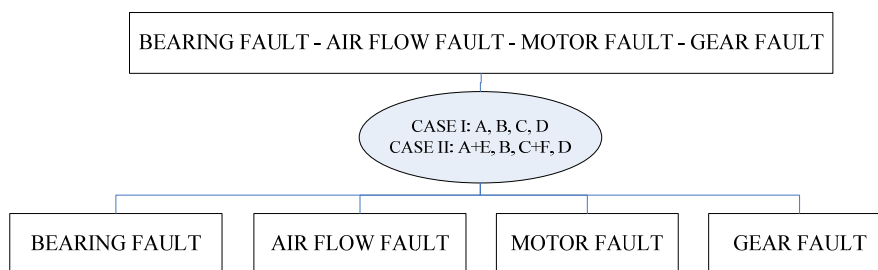
4.9.2 Ανάλυση των Επιδόσεων Βιομηχανικής Ταξινόμησης

Αρχικά σχηματίζεται μια δενδροειδής δομή που βασίζεται στην στρατηγική “Ένας – Εναντίον - Όλων”. Στη δομή αυτή η ταξινόμηση των σημάτων στις τέσσερις (4) διαφορετικές κλάσεις πραγματοποιείται σταδιακά σε τρία βήματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-30, με χρήση τριών (3) ταξινομητών (SVM). Στο πρώτο (1) επίπεδο, τα σήματα που παρουσιάζουν πρόβλημα ένσφαιρου τριβέα (Bearing Fault - BPFO) διαχωρίζονται από τα υπόλοιπα σήματα χρησιμοποιώντας ως Χαρακτηριστικά Εισόδου του πρώτου ταξινομητή SVM τις Ενεργειακές Τιμές A & B όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-16. Στο δεύτερο επίπεδο, τα σήματα που επιδεικνύουν σφάλμα οδοντωτών τροχών (Gear Fault) ταξινομούνται σε μια κλάση ενώ όλα τα υπόλοιπα αποτελούν μια άλλη κλάση. Ως Χαρακτηριστικά Εισόδου του δεύτερου ταξινομητή χρησιμοποιούνται οι Ενεργειακές Τιμές C & D. Τελικά στο τρίτο επίπεδο, τα εξεταζόμενα σήματα διαχωρίζονται σε αεροδυναμικά σφάλματα (Air Flow Faults) και σε σφάλματα κινητήρα (Motor Faults) από τον τρίτο ταξινομητή SVM. Χαρακτηριστικά Εισόδου του τρίτου ταξινομητή SVM είναι οι Ενεργειακές Τιμές E & F. Οι τρεις ταξινομητές εκπαιδεύτηκαν χρησιμοποιώντας δύο σήματα από κάθε κατηγορία που επιλέχθηκαν τυχαία. Συνολικά για την εκπαίδευση των ταξινομητών χρησιμοποιήθηκαν οχτώ 8 σήματα.



Σχήμα 4-30: Σταδιακός Αλγόριθμος.

Στη συνέχεια σχηματίστηκε η κλασική δομή “Ένας – Εναντίον - Όλων”. Στη δομή αυτή τα εξεταζόμενα σήματα ταξινομούνται στις τέσσερις (4) κλάσεις – σφάλμα ένσφαιρου τριβέα, σφάλμα κιβωτίου γραναζιών, αεροδυναμικό σφάλμα και σφάλμα κινητήρα, σε ένα μοναδικό βήμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-31. Στη δομή αυτή ελέγχονται δύο σύνολα Χαρακτηριστικών Εισόδου. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν ως Είσοδοι οι Ενεργειακές Τιμές A, B, C & D, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-16. Οι Ενεργειακές αυτές Τιμές εξάγονται μόνο από τα αρχικά σήματα. Στην δεύτερη περίπτωση, οι Ενεργειακές Τιμές A+E, B, C+F, D χρησιμοποιούνται. Οι τιμές αυτές εξάγονται τόσο από το αρχικά μετρούμενο σήμα όσο και από το αντίστοιχο αποδιαμορφωμένο. Τα δύο αθροίσματα των ενεργειών ουσιαστικά ενισχύουν τα σφάλματα ένσφαιρου τριβέα και οδοντωτών τροχών, καθώς οι χαρακτηριστικές συχνότητες βλαβών μπορεί να παρουσιάζουν σχετικά χαμηλό πλάτος στα μετρούμενα σήματα.



Σχήμα 4-31: Απευθείας Αλγόριθμος.

4.9.3 Αποτελέσματα

Οι ταξινομητές Support Vector Machines όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως σχεδιάστηκαν αρχικά για δυαδική ταξινόμηση. Η ανάπτυξη και η διεύρυνσή τους ώστε να χρησιμοποιούνται για ταξινόμηση πολλών κλάσεων αποτελεί ανοιχτό αντικείμενο επιστημονικής έρευνας. Διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί, είτε με τον σχηματισμό ενός ταξινομητή πολλών κλάσεων με συνδυασμό διάφορων ξεχωριστών δυαδικών ταξινομητών είτε με την επίλυση ταξινομητών πολλών κλάσεων σε ένα βήμα. Στην ενότητα αυτή χρησιμοποιούνται μια δένδροειδής μέθοδος που συνδυάζει δυαδικούς ταξινομητές και η μέθοδος “Ένας – Εναντίον - Όλων”.

Ο αλγόριθμος Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης πραγματοποιήθηκε στις δύο διαφορετικές δομές, την δένδροειδή και την “Ένας – Εναντίον - Όλων” χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά εισόδου που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τυχαία, δύο (2) σήματα από την κάθε Κλάση επιλέχθηκαν για την εκπαίδευση των SVMs. Σημειώνεται ότι σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, όλα τα SVMs – τρία στην πρώτη δομή και τέσσερα στην δεύτερη δομή – χρησιμοποιούν τον ίδιο τύπο συνάρτησης πυρήνα με τις ίδιες παραμέτρους πυρήνα και την ίδια παράμετρο ποινής C. Για κάθε SVM, τρεις διαφορετικές συναρτήσεις πυρήνα χρησιμοποιήθηκαν: η γραμμική (linear), η πολυωνυμική (polynomial) και η συνάρτηση ακτινικής βάσης (Radial Basis Function). Η επιρροή του όρου ποινής C, ελέγχτηκε χρησιμοποιώντας τέσσερις τιμές 10, 100, 200, 300. Τελικά η παράμετρος C επιλέχθηκε ίση

με 300 (υψηλή τιμή) και κατά συνέπεια εξαιρετικά λίγα σφάλματα επιτρέπονται κατά την εκπαίδευση. Επιπλέον, για την συνάρτηση ακτινικής βάσης, δεκατρία (13) διαφορετικά σταθερά πλάτη (σ) ελέχθησαν, $\sigma=16, 8, 4, 2, 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1, 0.05, 0.01$ και 0.001 αντίστοιχα. Για την πολυωνυμική συνάρτηση ελέχθησαν δυνάμεις μέχρι έκτης (6^{th}) δύναμης.

Όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-17. Στην δενδροειδή προσέγγιση τα βέλτιστα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με την χρήση Γραμμικής Συνάρτησης Πυρήνα και Συνάρτησης Πυρήνα Ακτινικής Βάσης με παράμετρο πυρήνα σ ίση με 0.05. Οι δύο πυρήνες επέτυχαν ποσοστό επιτυχούς ταξινόμησης των σημάτων 60 %. Στην “Ένας – Εναντίον - Όλων” διαδικασία τα αποτελέσματα είναι καλύτερα. Στην Περίπτωση I ο αλγόριθμος παρουσιάζει ποσοστό επιτυχίας ίσο με 74.29 % χρησιμοποιώντας συνάρτηση πυρήνα ακτινικής βάσης με $\sigma=2$ and $C=300$. Επιπλέον στην Περίπτωση II ο αλγόριθμος επιτυγχάνει ποσοστό επιτυχίας ίσο με 80 % χρησιμοποιώντας συνάρτηση πυρήνα ακτινικής βάσης με, $\sigma=2$ και $C=300$. Θα έπρεπε να τονιστεί εδώ ότι στην περίπτωση αυτή τα χαρακτηριστικά εισόδου προέρχονται τόσο από το αρχικό όσο και από το αποδιαμορφωμένο σήμα.

Kernel Function	C	Kernel Parameter	Step by Step Algorithm	Direct Algorithm		
			Success Rate (%)			
			Case I	Case I	Case II	
Linear	10	-	31,43	51,43	77,14	
	100	-	51,43	60,00	77,14	
	200	-	54,29	60,00	77,14	
	300	-	60,00	60,00	77,14	
			$\sigma=16$	25,71	60,00	77,14
			$\sigma=8$	51,43	65,71	77,14
			$\sigma=4$	48,57	71,43	80,00
			$\sigma=2$	37,14	74,29	80,00
			$\sigma=1$	54,29	68,57	77,14
			$\sigma=0.8$	54,29	68,57	71,43
Radial Basis	300	$\sigma=0.6$	54,29	68,57	68,57	
		$\sigma=0.4$	57,14	60,00	68,57	
		$\sigma=0.2$	54,29	57,14	68,57	
		$\sigma=0.1$	54,29	51,43	54,29	
		$\sigma=0.05$	60,00	45,71	37,14	
		$\sigma=0.01$	54,29	28,57	17,14	
		$\sigma=0.001$	51,43	17,14	5,71	
		p=2	17,14	54,29	62,86	
		p=3	17,14	68,57	60,00	
		p=4	25,71	65,71	45,71	
Polynomial	300	p=5	28,57	48,57	34,29	
		p=6	34,29	48,57	25,71	
		p=7	37,14	34,00	60,00	

Πίνακας 4-17: Ταξινόμηση Δεδομένων από τις Μηχανές Διανυσματικής Υποστήριξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή εφαρμόστηκαν νοήμονες μέθοδοι επεξεργασίας δυναμικών σημάτων για την διάγνωση βλαβών μηχανολογικού εξοπλισμού

Ο διακριτός Αλγόριθμος Διαχωρισμού Ενεργειακού Τελεστή (EOSA) αποτελεί μια πρωτότυπη και πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την αποδιαμόρφωση σημάτων για πολλούς λόγους: (i) Εμφανίζει πολύ λίγα σφάλματα για αποδιαμόρφωση διαμορφωμένων σημάτων τόσο κατά πλάτος όσο και κατά συχνότητα (AM-FM). (ii) Παρουσιάζει εξαιρετικά χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. (iii) Εμφανίζει άριστη χρονική ευκρίνεια, σχεδόν στιγμιαία (instantaneous), καθώς εφαρμόζεται σε ένα κινούμενο παράθυρο 5 σημείων και μπορεί να εντοπίσει στιγμιαίες αλλαγές στην διαμόρφωση των σημάτων. (iv) Είναι υπολογιστικά λιγότερο σύνθετη και έχει καλύτερη χρονική ευκρίνεια από άλλες κλασικές προσεγγίσεις αποδιαμόρφωσης όπως ο μετασχηματισμός Hilbert. (v) Μπορεί να εντοπίσει την πραγματική φυσική ενέργεια της πηγής κραδασμών. (vi) Μπορεί να ανιχνεύσει μεταβατικά γεγονότα, που μπορεί να είναι εξαιρετικά χρήσιμο κατά την παρακολούθηση ταχέως εξελισσομένων φαινομένων, όπως οι αυτοδιεγειρόμενες ταλαντώσεις και το “κροτάλισμα” (chatter) που εμφανίζονται σε βιομηχανικά έλαστρα.

Βασικό μειονέκτημα του Αλγορίθμου Διαχωρισμού Ενεργειακού τελεστή αποτελεί η ευαισθησία του στον θόρυβο. Έχει παρατηρηθεί ότι το φιλτράρισμα ενός θορυβώδους AM-FM σήματος στη ζώνη συχνοτήτων που περιέχει την χρήσιμη πληροφορία, δηλαδή εκατέρωθεν της συχνότητας διέγερσης, οδηγεί σε μείωση των επιδράσεων του θορύβου και κατά συνέπεια καθιστά δυνατή την ικανοποιητική αποδιαμόρφωση του σήματος. Για τον λόγο αυτό πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου απαιτείται ένα στάδιο εντοπισμού της διεγερμένης ζώνης συχνοτήτων και φιλτραρίσματός της. Το ζωνοπερατό φίλτρο πρέπει να επιλεγεί με προσοχή. Για να διατηρηθεί αφενός το βασικό πλεονέκτημα του ενεργειακού τελεστή, που είναι η στιγμιαία φύση του η οποία εγγυάται άριστη ευκρίνεια (resolution) στο πεδίο του χρόνου και αφετέρου η απλότητα του τελεστή, ένα φίλτρο με σύντομη κρουστική απόκριση (short impulse response) πρέπει να επιλεγεί.

Το φιλτράρισμα μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση ενός φίλτρου Gabor με κρουστική απόκριση καθώς (i) είναι βέλτιστο με κριτήριο της αρχή της αβεβαιότητας αφού το γινόμενο του εύρους χρόνου επί το εύρος συχνοτήτων λαμβάνει την ελάχιστη τιμή. Έτσι επιτυγχάνεται βελτιωμένη διακριτική ικανότητα τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο

Συμπεράσματα

πεδίο της συχνότητας, (ii) Λόγω του κανονικού (Gaussian) σχήματος της απόκρισης συχνότητας αποφεύγονται οι δευτερεύοντες λοβοί που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν το αποτέλεσμα του ενεργειακού τελεστή.

Το πρόβλημα βέβαια που παραμένει είναι η κατάλληλη επιλογή της κεντρικής συχνότητας ώστε να απομονωθεί η συνιστώσα που περιέχει τη χρήσιμη πληροφορία. Η επιλογή αυτή είναι πολύ σημαντική, ιδιαίτερα στην περίπτωση που η στιγμιαία συχνότητα της συνιστώσας αυτής μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε ζώνη του πεδίου συχνοτήτων. Θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί είτε με υπολογισμό της κεντρικής της συχνότητας με κατάλληλη μέθοδο ανίχνευσης είτε με τη χρήση συστοιχίας φίλτρων τα οποία θα καλύπτουν πυκνά όλο το πεδίο συχνοτήτων. Ως μέθοδος ανίχνευσης και παρακολούθησης της φέρουσας συχνότητας του καθαρού σήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα φίλτρο Kalman και διάφορες παραλλαγές του.

Η μέθοδος αποδιαμόρφωσης που βασίζεται στη χρήση κυματιδίων μπορεί να αναδείξει τα κρουστικά χαρακτηριστικά σημάτων κραδασμών. Παράλληλα προσφέρει την δυνατότητα καθορισμού κριτηρίων για την αυτόματη επιλογή παραμέτρων της ανάλυσης. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα συστηματικής επεξεργασίας κραδασμών με ελαχιστοποίηση της παρέμβασης του χρήστη.

Ο πλεονασμός που δημιουργούν οι συνεχείς μετασχηματισμοί και τα χαρακτηριστικά μη ορθογώνιων κυματιδίων μπορούν να αξιοποιηθούν για την αποτελεσματική εξαγωγή περιβαλλουσών, οι οποίες με την σειρά τους αναδεικνύουν τα κρουστικά χαρακτηριστικά των κραδασμών ενισχύοντας την ορθή και αξιόπιστη διάγνωση βλάβης. Παρά τον πλεονασμό η χρήση μετατοπισμένων μιγαδικών κυματιδίων Morlet παρουσιάζει ευελιξία ως προς την διαίρεση του πεδίου συχνοτήτων. Τα Μιγαδικά Μετατοπισμένα Κυματίδια Morlet παρουσιάζουν έναν αριθμό πλεονεκτημάτων έναντι των άλλων παρόμοιων μεθόδων. (i) Τα Κυματίδια Morlet είναι διαμορφωμένα στο πεδίο του χρόνου από ένα κανονικό (Gaussian) σχήματος χρονικό παράθυρο και κατά συνέπεια παρουσιάζουν την βέλτιστη ευκρίνεια (resolution) ταυτόχρονα στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας. (ii) Συγκρινόμενα με τον Διακριτό Κυματιδιακό Μετασχηματισμό (Discrete Wavelet Transform - DWT), επιτρέπουν τον συνεχή (και κατά συνέπεια και πιο ακριβή) υπολογισμό τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Επιπλέον, δεν σχετίζονται με φαινόμενα φασματικής διαρροής. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ ο Συνεχής Κυματιδιακός Μετασχηματισμός (Continuous Wavelet Transform – CWT) θεωρείται υπολογιστικά πιο απαιτητικός σε σχέση με τον Διακριτό Κυματιδιακό Μετασχηματισμό σχετικοί αλγόριθμοι μπορούν να ξεπεράσουν το μειονέκτημα αυτό ως έναν αξιοσημείωτο βαθμό. (iii) Σε αντίθεση με την κλασική αναπαράσταση πραγματικών αριθμών του Κυματιδιακού Μετασχηματισμού Morlet, τα Μιγαδικά Μετατοπισμένα Κυματίδια Morlet οδηγούν σε μιγαδικούς κυματιδιακούς συντελεστές στο πεδίο του χρόνου, επιτρέποντας κατά συνέπεια τον απευθείας υπολογισμό της περιβάλλουσας του σήματος από το πλάτος των κυματιδιακών συντελεστών, με τρόπο παρόμοιο με τον κλασικό Μετασχηματισμό Hilbert. (iv) Σε αντίθεση με την κλασική αρχή της κλιμάκωσης του κυματιδίου στο πεδίο του χρόνου ή της συχνότητας το οποίο επιτρέπει την αναγνώριση μόνο μίας παραμέτρου, της κυματιδιακής κλίμακας, η έννοια της μετατόπισης του κυματιδίου Morlet στο πεδίο της

συχνότητας επιτρέπει την ταυτόχρονη βέλτιστη επιλογή και των δύο κυματιδιακών παραμέτρων που είναι απαραίτητοι για την αναγνώριση του ως ένα κατάλληλο φίλτρο στο πεδίο της συχνότητας: Την Κεντρική Συχνότητα (Center Frequency) και το Εύρος (Bandwidth). (v) Τα κυματίδια Morlet είναι προοδευτικά.

Για την επιλογή των δύο κυματιδιακών παραμέτρων έχουν προταθεί μια σειρά από μεθοδολογίες και κριτήρια. Οι Δείκτες “Σχήματος” είναι ευαίσθητοι σε ακραίες τιμές, ενώ τα Κριτήρια που βασίζονται στην Ενέργεια είναι ευαίσθητα στις αλλαγές κλίμακας. Το νέο κριτήριο που προτείνεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή για την ταυτόχρονη βέλτιστη επιλογή των κρίσιμων παραμέτρων προσφέρει δυνατότητες για αυτοματοποίηση της διαδικασίας υπολογισμού της περιβάλλουσας καθώς και εγκυρότερο και ασφαλέστερο εντοπισμό της ζώνης αποδιαμόρφωσης. Δεδομένου ότι λαμβάνει υπ’ όψιν μόνο την ενέργεια των κορυφών, ο Δείκτης Ενέργειας Αιχμών είναι ευαίσθητος στην “αιχμηρή” δομή του σήματος και συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των ενεργειακών κριτηρίων με τα πλεονεκτήματα των δεικτών σχήματος.

Η Μορφολογική Επεξεργασία σε συνδυασμό με την μέθοδο Αποσύνθεσης Ορθοκανονικών Προβολών χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ρωγμών σε κατασκευές δοκών. Η μέθοδος Αποσύνθεσης Ορθοκανονικών Προβολών χρησιμοποιείται, με σκοπό να αποκτηθεί ένας αριθμός Ορθοκανονικών Μορφών δοκού με ρωγή. Η μέθοδος υπηρετεί ονομαστικά δύο σκοπούς: (i) την προβολή δεδομένων διανυσματικού χώρου μεγάλων διαστάσεων σε χώρο μικρότερης διάστασης και (ii) την εξαγωγή χαρακτηριστικών αποκαλύπτοντας σχετικές αλλά απροσδόκητες δομές που βρίσκονται κρυμμένες στα δεδομένα. Ο μετασχηματισμός αποσυσχετίζει τις συνιστώσες του σήματος και μεγιστοποιεί την διακύμανση. Η Μορφολογική Επεξεργασία (Morphological Processing) προτείνεται για την περαιτέρω επεξεργασία του σχήματος των εξαγόμενων Ορθοκανονικών Μορφών. Η Μορφολογική Επεξεργασία Σήματος επιτυγχάνει να ποσοτικοποιήσει το σχήμα, το μέγεθος και άλλες πτυχές της γεωμετρικής δομής των σημάτων που εξετάζονται ως οπτικά αντικείμενα, με τρόπο που συμφωνεί με την ανθρώπινη διαίσθηση και αντίληψη. Χρησιμοποιώντας μια κατάλληλη διαδικασία μορφολογικής επεξεργασίας, η θέση και το βάθος των ρωγμών μπορούν να εκτιμηθούν απομονώνοντας την τοπική ξαφνική αλλαγή της επίδρασης των ρωγμών στην χωρική μεταβολή του σχήματος κάθε ορθοκανονικής προβολής. Το καμπύλο μορφολογικό δομικό στοιχείο κρίθηκε πιο αποτελεσματικό από το επίπεδο για την ανίχνευση ρωγμής. Ως μειονέκτημα της μεθόδου αναφέρεται η χρήση καμπύλου δομικού στοιχείου κατασκευής χωρίς ρωγή. Πιθανό επόμενο βήμα μελέτης είναι η ανάπτυξη κάποιου άλλου δομικού στοιχείου.

Προς την κατεύθυνση σχεδιασμού και υλοποίησης Αυτόματων Συστημάτων Διάγνωσης Βλαβών χρησιμοποιείται η μέθοδος Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης (Support Vector Machines). Παρουσιάζει μια σειρά από πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks): (i) Σε αντίθεση με τα ANNs, τα οποία μπορεί να υποφέρουν από πολλαπλά τοπικά ελάχιστα, η λύση σε ένα SVM είναι ολική (global) και μοναδική (unique). (ii) Τα SVMs παρουσιάζουν απλή γεωμετρική ερμηνεία και δίνουν μια αραιή (sparse) λύση. (iii) Σε αντίθεση με τα ANNs, η υπολογιστική πολυπλοκότητα των SVMs δεν εξαρτάται από την διάσταση του μαθηματικού χώρου εισόδου. (iii) Η διατύπωση

των SVM ενσωματώνει την έννοια της Ελαχιστοποίησης Δομικού Κινδύνου (Structural Risk Minimisation - SRM), που έχει αποδειχθεί ότι είναι ανώτερη, από την έννοια της παραδοσιακής Ελαχιστοποίησης Εμπειρικού Κινδύνου (Empirical Risk Minimisation - ERM), που χρησιμοποιείται από τα συμβατικά Νευρωνικά Δίκτυα. Το SRM ελαχιστοποιεί το άνω όριο του αναμενόμενου κινδύνου σε αντίθεση με το ERM που ελαχιστοποιεί το σφάλμα στα δεδομένα εκπαίδευσης. Αυτή ακριβώς η διαφορά καθιστά την μέθοδο SVM ικανότερη για γενίκευση και λιγότερο επιρρεπή στην υπερπροσαρμογή. (iv) Σε αντίθεση με τις περισσότερες μεθόδους ταξινόμησης, οι Μηχανές Διανυσματικής Υποστήριξης δεν απαιτούν μεγάλο αριθμό δειγμάτων δεδομένων.

Ο υβριδικός αλγόριθμος που προτείνεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή βασίζεται σε ένα Στοχαστικό Μοντέλο Προσομοίωσης Δυναμικής Απόκρισης Ένσφαιρων Τριβέων, στην στρατηγική Ένας-Εναντίον-Όλων (One-Against-All) και στην χρησιμοποίηση της μεθόδου Μηχανών Διανυσματικής Υποστήριξης SVM. Τα προσομοιωμένα σήματα παράγονται από ένα καλά καθορισμένο μοντέλο που περιγράφει την δυναμική απόκριση φθαρμένων ένσφαιρων τριβέων. Χρησιμοποιούνται χαρακτηριστικά που μπορούν να εξαχθούν από το πεδίο της συχνότητας και αποτελούν περιγραφικούς δείκτες της μεταβολής της Κατάστασης Λειτουργίας της Μηχανής. Ως κύριο μέτρο-χαρακτηριστικό λαμβάνεται ο υπολογισμός της ενέργειας που κατανέμεται και αναπτύσσεται σε προσεκτικά, ορθά και αυστηρά καθορισμένες ζώνες συχνοτήτων, που μπορούν να καθοριστούν με βάση την καλή κατανόηση της φύσης του φαινομένου εμφάνισης της βλάβης από την σκοπιά ενός μηχανικού. Ο πετυχημένος ορισμός των συχνοτικών αυτών ζωνών μπορεί να οδηγήσει σε ακριβέστερη, πιο αξιόπιστη και αυτοματοποιημένη παρακολούθηση της κατάστασης λειτουργίας περιστρεφόμενου εξοπλισμού και στην έγκυρη και έγκαιρη διάγνωση βλαβών που ενδέχεται να εμφανιστούν στο σύστημα. Τα χαρακτηριστικά αυτά λαμβάνονται από τα φάσματα τόσο των αρχικών σημάτων όσο και της περιβάλλουσάς τους ενώ παράλληλα χρησιμοποιείται η Ανάλυση Τάξης (Order Analysis) για τον περιορισμό της λεγόμενης “Φασματικής Διαρροής” κατά τη διάρκεια εμφάνισης μεταβατικών φαινομένων.

Οι μέθοδοι που μελετήθηκαν στην παρούσα διατριβή κρίνεται ότι μπορούν να συμβάλουν προς την κατεύθυνση της υλοποίησης αξιόπιστων αυτόματων συστημάτων παρακολούθησης της κατάστασης λειτουργίας περιστρεφόμενων-παλινδρομικών μηχανών και κατασκευών.

Βιβλιογραφία

- [Abdel-Galil et al. 2004] T. K. Abdel-Galil, E. F. El-Saadany and M. M. A. Salama, "On line tracking of voltage flicker utilizing energy operator and Hilbert transform", *IEEE Transactions on Power Delivery* **19** (2004), 861 – 867.
- [Abdel-Galil et al. 2002] T. K. Abdel-Galil, E. F. El-Saadany and M. M. A. Salama, "Energy operator for on-line tracking of voltage flicker levels", *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 2, 1153 – 1157, 2002.
- [Addison et al. 2002] P. S. Addison, J. N. Watson and T. Feng, "Low-oscillation complex wavelets", *Journal of Sound and Vibration* **254** (2002), 733–762.
- [Aizerman et al. 1964] M. Aizerman, E. Braverman and L. Rozonoer, "Theoretical foundations of the potential function method in pattern recognition learning", *Automation and Remote Control* **25** (1964), 821-837.
- [Alvandi and Cremona 2006] A. Alvandi and C. Cremona, "Assessment of vibration-based damage identification techniques", *Journal of Sound and Vibration* **292**:1–2 (2006), 179–202.
- [Andreus et al. 2007] U. Andreus, P. Casini and F. Vestroni, "Non-linear dynamics of a cracked cantilever beam under harmonic excitation", *International Journal of Non-Linear Mechanics* **42**:3 (2007), 566 – 575.
- [Antoni and Randall 2002] J. Antoni and R. B. Randall, "Differential diagnosis of gear and bearing faults", *Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics*, **124**:2 (2002), 165-171.
- [Araiza et al. 2002] M. L. Araiza, R. Kent and R. Espinosa, "Real-time, embedded diagnostics and prognostics in advanced artillery systems", in: *2002 IEEE Autotestcon Proceedings, Systems Readiness Technology Conference*, New York, pp. 818–841. 2002.
- [Aronszajn 1950] N. Aronszajn, "Theory of Reproducing Kernels", *Transactions of the American Mathematical Society* **68** (1950), 337-404.
- [Artes et al. 2003] M. Artes, L. D. Castillo and J. Perez, "Failure prevention and diagnosis in machine elements using cluster", in: *Proceedings of the Tenth International Congress on Sound and Vibration* Stockholm, Sweden, pp. 1197–1203, 2003.
- [Azeez and Vakakis 1997] M. F. Azeez and A. F. Vakakis, "Numerical and experimental analysis of the nonlinear dynamics due to impacts of a continuous overhung rotor", in *Proceedings of the 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences (DETC97)* (Sacramento, CA, 1997), edited by B. Ravani, ASME, New York, 1997.
- [Büssow 2007] R. Büssow, "An algorithm for the continuous Morlet wavelet transform", *Mechanical Systems and Signal Processing* **21**:8 (2007), 2970-2979.
- [Baig and Sayeed 1998] M. F. Baig and N. Sayeed, "Model-based reasoning for fault diagnosis of twin-spool turbofans", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* **212** (1998), 109–116.

- [Baillie and Mathew 1994] D. C. Baillie and J. Mathew, "Nonlinear model-based fault diagnosis of bearings", in: *Proceedings of an International Conference on Condition Monitoring*, Swansea, UK, pp. 241–252. 1994.
- [Bamnios et al. 2002] Y. Bamnios, E. Douka and A. Trochidis, "Crack identification in beam structures using mechanical impedance", *Journal of Sound and Vibration* **256:2** (2002), 287–297.
- [Barnston and Ropelewski 1992] A. G. Barnston and C. F. Ropelewski, "Prediction of ENSO episodes using canonical correlation analysis", *Journal of Climate* **5** (1992), 1316–1345.
- [Bartelmus 2001] W. Bartelmus, "Mathematical modelling and computer simulations as an aid to gearbox diagnostics", *Mechanical Systems and Signal Processing* **15** (2001), 855–871.
- [Bartelmus 2003] W. Bartelmus, "Diagnostic information on gearbox condition for mechatronic systems", *Transactions of the Institute of Measurement and Control* **25** (2003), 451–465.
- [Baydar and Ball 2003] N. Baydar and A. Ball, "Detection of gear failures via vibration and acoustic signals using wavelet transform", *Mechanical Systems and Signal Processing* **17** (2003), 787–804.
- [Bayly et al. 1995] P. V. Bayly, E. E. Johnson, P. D. Wolf, W. M. Smith and R. E. Ideker, "Predicting patterns of epicardial potentials during ventricular fibrillation", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* **42** (1995), 898–907.
- [Belavy et al. 2009] D. L. Belavy, A. Mehnert, S. Wilson and C. A. Richardson, "Analysis of phasic and tonic electromyographic signal characteristics: Electromyographic synthesis and comparison of novel morphological and linear-envelope approaches", *Journal of Electromyography and Kinesiology* **19** (2009), 10–21.
- [Bengtsson et al. 2004] M. Bengtsson, E. Olsson, P. Funk and M. Jackson, "Technical design of condition based maintenance system—A case study using sound analysis and case-based reasoning", in: *Maintenance and Reliability Conference—Proceedings of the Eighth Congress*, Knoxville, USA. 2004.
- [Bentley and Hatch 2003] D. E. Bentley and C. T. Hatch, *Fundamentals of rotting machinery diagnostics*, ASME Press, New York, 2003.
- [Blanz et al. 1996] V. Blanz, B. Schölkopf, H. Bülthoff, C. Burges, V. Vapnik and T. Vetter., "Comparison of view-based object recognition algorithms using realistic 3D models", *C. von der Malsburg, W. von Seelen, J. C. Vorbrüggen, and B. Sendhoff (eds.): Artificial Neural Networks - ICANN'96. Springer Lecture Notes in Computer Science, Berlin*, **1112** (1996), 251-256.
- [Boser et al. 1992] B. E. Boser, I. M. Guyon and V. Vapnik, "A training algorithm for optimal margin classifiers", In *Fifth Annual Workshop on Computational Learning Theory*, Pittsburgh, ACM 1992.
- [Boulahbal et al. 1999] D. Boulahbal, F. Golnaraghi and F. Ismail, "Amplitude and phase wavelet maps for the detection of cracks in geared systems", *Mechanical System and Signal Processing* **13** (1999), 423–436.
- [Bovik et al. 1993] A. C. Bovik, P. Maragos and T. F. Quatieri, "AM-FM Energy Detection and Separation in Noise Using Multiband Energy Operators", *IEEE Transactions on Signal Processing* **41:12** (1993), 3245–3265.
- [Bozchalooi and Liang 2007] I. S. Bozchalooi and M. Liang, "A smoothness index-guided approach to wavelet parameter selection in signal de-noising and fault detection", *Journal of Sound and Vibration* **308:1-2** (2007), 246-267.
- [Bozchalooi and Liang 2008] I. S. Bozchalooi and M. Liang, "A joint resonance frequency estimation and in-band noise reduction method for enhancing the detectability of

- bearing fault signals", *Mechanical Systems and Signal Processing* **22:4** (2008), 915-933.
- [Bunks et al. 2000] C. Bunks, D. McCarthy and T. Al-Ani, "Condition-based maintenance of machines using hidden Markov models", *Mechanical Systems and Signal Processing* **14** (2000), 597–612.
- [Burges 1998] C. J. C. Burges, "A tutorial on support vector machines for pattern recognition", *Data Mining and Knowledge Discovery* **2** (1998), 955–974.
- [Campagna-Varenne 1985] Campagna-Varenne, "Etude des roulements par analyse spectrale", *Vibrations actualités, Paris, France* **3** (1985).
- [Carmona et al. 1997] R. Carmona, W.-L. Hwang and B. Torresani, "Characterization of Signals by the Ridges of Their Wavelet Transforms", *IEEE Transaction on Signal Processing* **45** 10 (1997), 2586-2590.
- [Carmona et al. 1998] R. Carmona, W.-L. Hwang and B. Torresani, *Practical Time-Frequency analysis: Gabor and Wavelet Transforms With an Implementation in S*, Academic Press, San Diego, CA, 1998.
- [Cawley 1997] P. Cawley, "Long range inspection of structures using low frequency ultrasound", pp. 1–17 in *Structural damage assessment using advanced signal processing procedures: proceedings of DAMAS '97* (Sheffield, 1997), edited by J. M. Dulieu-Smith et al., Sheffield Academic Press, Sheffield 1997.
- [Cawley and Adams 1979] P. Cawley and R. D. Adams, "The Location of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies", *Journal of Strain Analysis* **14:2** (1979), 49–57.
- [Cexus and Boodraa 2005] J. C. Cexus and A. O. Boodraa, "Teager-Huang Analysis Applied to Sonar Target Recognition", *International Journal of Signal Processing* **1:1** (2005), 23-27.
- [Chang and Chen 2005] C. C. Chang and L. W. Chen, "Detection of the location and size of cracks in the multiple cracked beam by spatial wavelet based approach", *Mechanical Systems and Signal Processing* **19:1** (2005), 139–155.
- [Chang et al. 1995] S. H. Chang, K. S. Kang, S. S. Choi, H. G. Kim, H. K. Jeong and C. U. Yi, "Development of the on-line operator aid system OASYS using a rule-based expert system and fuzzy logic for nuclear power plants", *Nuclear Technology* **112** (1995), 266–294.
- [Chen et al. 2003] Z. Y. Chen, Y. Y. He, F. L. Chu and J. Y. Huang, "Evolutionary strategy for classification problems and its application in fault diagnostics", *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **16** (2003), 31–38.
- [Cheng et al. 1999] S. M. Cheng, X. J. Wu, W. Wallace and A. S. J. Swamidias, "Vibrational response of a beam with a breathing crack", *Journal of Sound and Vibration* **225:1** (1999), 201-208.
- [Choi and Choi 1996] G. H. Choi and G. S. Choi, "Application of minimum cross entropy to model-based monitoring in diamond turning", *Mechanical Systems and Signal Processing* **10** (1996), 615–631.
- [Christianini and Shawe-Taylor 2000] N. Christianini and J. Shawe-Taylor, *An Introduction to Support Vector Machines and other kernel-based learning methods*, Cambridge University Press, 2000.
- [Chu and Delp 1989] C.-H. H. Chu and E. J. Delp, "Impulsive noise suppression and background normalization of electromagnetism signals using morphological operators", *IEEE Trans.Biomed.Eng.* **36** 2 (1989), 262–272.
- [Cohen and Kovacevic 1996] A. Cohen and J. Kovacevic, "Wavelets: The Mathematical Background", *Proceedings of IEEE* **84** (1996), 514-522.

Βιβλιογραφία

- [Cohen 1995] L. Cohen, *Time-Frequency Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.
- [Collins et al. 1989] G. C. Collins, J. R. Bourne, A. J. Brodersen and C. F. Lo, "Comparison of rule-based and belief-based systems for diagnostic problems", in: *Proceedings of the Second International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems (IEA/AIE—89)*, vol. 2, New York, USA, pp. 785–793. 1989.
- [Cortes and Vapnik 1995] C. Cortes and V. Vapnik, "Support vector networks", *Machine Learning* **20** (1995), 273-297.
- [Cristianini and Shawe-Taylor 2000] N. Cristianini and J. Shawe-Taylor, *Support Vector Machines and Other Kernel-Based Learning Methods*, Cambridge University Press, 2000.
- [Cusumano et al. 1994] J. P. Cusumano, M. T. Sharkady and B. W. Kimble, "Experimental measurements of dimensionality and spatial coherence in the dynamics of a flexible-beam impact oscillator", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **347** (1994), 421-438.
- [Dalpiaz and Rivola 1997] G. Dalpiaz and A. Rivola, "Condition monitoring and diagnostics in automatic machines: Comparison of vibration analysis techniques", *Mechanical Systems and Signal Processing* **11** (1997), 53–73.
- [Daubechies 1988] I. Daubechies, "Orthogonal Bases of Compactly Supported Wavelets", *Communications on Pure and Applied Mathematics* **41:7** (1988), 909-996.
- [Daubechies 1992] I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, 1992.
- [David and Alla 1994] R. David and H. Alla, "Petri nets for modeling of dynamic systems—A survey", *Automatica* **30** (1994), 175–202.
- [DePold and Gass 1999] H. R. DePold and F. D. Gass, "The application of expert systems and neural networks to gas turbine prognostics and diagnostics", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* **121** (1999), 607–612.
- [Dimarogonas 1992] A. D. Dimarogonas, *Vibration for engineers*, Prentice Hall, Inc, New Jersey, 1992.
- [Dimarogonas 1996] A. D. Dimarogonas, "Vibration of Cracked Structure: A state of the art review", *Engineering Fracture Mechanics* **55:5** (1996), 831-857.
- [Ding et al. 1991] H. Ding, X. Gui and S. Yang, "An approach to state recognition and knowledge-based diagnosis for engines", *Mechanical Systems and Signal Processing* **5** (1991), 257–266.
- [Doebbling et al. 1998] S. W. Doebbling, C. R. Farrar and M. B. Prime, "A summary review of vibration based damage identification methods", *The Shock and Vibration Digest* **30:2** (1998), 91-105.
- [Dong et al. 1997] D. W. Dong, J. J. Hopfield and K. P. Unnikrishnan, "Neural networks for engine fault diagnostics", in: *Neural Networks for Signal Processing VII*, New York, pp. 636–644, 1997.
- [Douka and Hadjileontiadis 2005] E. Douka and L. J. Hadjileontiadis, "Time–frequency analysis of the free vibration response of a beam with a breathing crack", *NDT&E International* **38:1** (2005), 3–10.
- [Douka et al. 2003] E. Douka, S. Loutridis and A. Trochidis, "Crack identification in beams using wavelet analysis", *International Journal of Solids and Structures* **40:13-14** (2003), 3557–3569.
- [Douka et al. 2004] E. Douka, S. Loutridis and A. Trochidis, "Crack identification in plates using wavelet analysis", *Journal of Sound and Vibration* **270:1-2** (2004), 279–295.

- [Du and Yeung 2004] R. Du and K. Yeung, "Fuzzy transition probability: A new method for monitoring progressive faults. Part 1: The theory", *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **17** (2004), 457–467.
- [Epureanu et al. 2001] B. I. Epureanu, K. C. Hall and E. H. Dowell, "Reduced-order models of unsteady viscous flows in turbomachinery using viscous-inviscid coupling", *Journal of Fluids and Structures* **15** (2001), 255–273.
- [Fan and Li 2002] Y. Fan and C. J. Li, "Diagnostic rule extraction from trained feedforward neural networks", *Mechanical Systems and Signal Processing* **16** (2002), 1073–1081.
- [Farrar et al. 1994] C. R. Farrar, W. E. Baker, T. M. B. K. M. C. T. W. Darling, T. A. Duffey, A. Eklund and A. Migliori, "Dynamic characterization and damage detection in the I-40 bridge over the Rio Grande", Technical Report LA-12767-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, 1994.
- [Farrar and Lieven 2007] C. R. Farrar and N. A. J. Lieven, "Damage prognosis: the future of structural health monitoring", *Philosophical Transaction of the Royal Society A* **365** (2007), 623-632.
- [Farrar et al. 2004] C. R. Farrar, H. Sohn, F. M. Hemez, M. C. Anderson, M. T. Bement, P. J. Cornwell, S. W. Doebling, J. F. Schultze, N. Lieven and A. N. Robertson, "Damage prognosis: current status and future needs", Technical Report LA-14051-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, MN, 2004.
- [Farrar and Worden 2007] C. R. Farrar and K. Worden, "An introduction to structural health monitoring", *Philosophical Transaction of the Royal Society A* **365** (2007), 303-315.
- [Feeny 1997] B. F. Feeny, "Interpreting proper orthogonal modes in vibrations", in *Proceedings of the 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences (DETC97)* (Sacramento, CA, 1997), edited by B. Ravani, ASME, New York, 1997.
- [Fitzsimons and Rui 1993] P. M. Fitzsimons and C. Rui, "Determining low dimensional models of distributed systems", *Advances in Robust and Nonlinear Control Systems, ASME DSC* **53** (1993).
- [Fletcher 1987] R. Fletcher, *Practical Methods of Optimization*, John Wiley and Sons, Inc., 2nd Edition, , 1987.
- [Fogel 1994] D. B. Fogel, "An introduction to simulated evolutionary optimization", *IEEE Transactions on Neural Networks* **5** (1994), 3–14.
- [Fu et al. 1996] J. C. Fu, C. A. Troy and K. Morit, "Chatter classification by entropy functions and morphological processing in cylindrical traverse grinding", *Precision Engineering* **18** (1996), 110-117.
- [Gabor 1946] D. Gabor, "Theory of communication", *Journal of the Institution of Electrical Engineers* **93** (1946), 429-457.
- [Garga et al. 2001] A. K. Garga, K. T. McClintic, R. L. Campbell, C. C. Yang, M. S. Lebold, T. A. Hay and C. S. Byington, "Hybrid reasoning for prognostic learning in CBM systems", in: *2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings* vols. 1–7, New York, pp. 2957–2969, 2001.
- [Ge et al. 2004] M. Ge, R. Du and Y. Xu, "Hidden Markov model based fault diagnosis for stamping processes", *Mechanical Systems and Signal Processing* **18** (2004), 391–408.
- [Gertler 1998] J. J. Gertler, *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*, Marcel Dekker, New York, 1998.
- [Giroso 1997] F. Giroso, "An Equivalence Between Sparse Approximation and Support Vector Machines", Technical Report AIM-1606, Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Massachusetts, 1997.
- [Goumas et al. 2002] S. K. Goumas, M. E. Zervakis and G. S. Stavrakakis, "Classification of washing machines vibration signals using discrete wavelet analysis for feature

- extraction", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **51** (2002), 497–508.
- [Goupillaud et al. 1984] P. Goupillaud, A. Grossmann and J. Morlet, "Cycle-octave and Related Transforms in Seismic Signal Analysis", *Geoexploration* **23** (1984), 85 - 102.
- [Grossmann and Morlet 1984] A. Grossmann and J. Morlet, "Decomposition of Hardly Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape", *SIAM Journal on Mathematical Analysis* **15** (1984), 723-736.
- [Gunn 1998] S. R. Gunn, "Support vector machines for classification and regression", Technical Report, University of Southampton, Department of Electrical and Computer Science, 1998.
- [Guo and Billings 2007] L. Z. Guo and S. A. Billings, "Detection of fatigue cracks in a beam using a spatio-temporal dynamical system identification method", *Journal of Sound and Vibration* **299**:1-2 (2007), 22–35.
- [Haar 1909] A. Haar, "Zur Theorie der orthogonale Funktionensysteme", Inaugural Dissertation, Gottingen, Math. Ann., 69, 331-371, 1909.
- [Haase and Widjajakusuma 2003] M. Haase and J. Widjajakusuma, "Damage Identification Based on Ridges and Maxima Lines of the Wavelet Transform", *International Journal of Engineering Science* **41** 13-14 (2003), 1423-1443.
- [Hadamard 1923] J. Hadamard, *Lectures on the Cauchy Problem in Linear Partial Differential Equation*, Yale University Press, 1923.
- [Hadjileontiadis et al. 2005a] L. J. Hadjileontiadis, E. Douka and A. Trochidis, "Crack detection in beams using kurtosis", *Computers and Structures* **83**:12-13 (2005a), 909–919.
- [Hadjileontiadis et al. 2005b] L. J. Hadjileontiadis, E. Douka and A. Trochidis, "Fractal dimension analysis for crack identification in beam structures", *Mechanical Systems and Signal Processing* **19**:3 (2005b), 659–674.
- [Hall et al. 1997] D. L. Hall, R. J. Hansen and D. C. Lang, "The negative information problem in mechanical diagnostics", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power—Transactions of the ASME* **119** (1997), 370–377.
- [Hansen and Pickles 1994] C. H. Hansen and R. K. A. J. M. Pickles, "Expert systems for machine fault diagnosis", *Acoustics Australia* **22** (1994), 85–90.
- [Hansen et al. 1995] R. J. Hansen, D. L. Hall and S. K. Kurtz, "A new approach to the challenge of machinery prognostics", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* **117** (1995), 320–325.
- [Hao and Chu 2009] R. Hao and F. Chu, "Morphological undecimated wavelet decomposition for fault diagnostics of rolling element bearings", *Journal of Sound and Vibration* **320** (2009), 1164-1177.
- [Harris 1987] M. C. Harris, *Shock and vibration handbook*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.
- [Heckman 1997] N. E. Heckman, "The Theory and Application of Penalized Least Squares Methods or Reproducing Kernel Hilbert Spaces Made Easy", <ftp://newton.stat.ubc.ca/pub/nancy/PLS.ps>, 1997.
- [Ho and Randall 2000] D. Ho and R. B. Randall, "Optimisation of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signals", *Mechanical Systems and Signal Processing* **14** 5 (2000), 763-788.
- [Holschneider and Tchamitchian 1991] M. Holschneider and P. Tchamitchian, "Pointwise Analysis of Riemann's 'non-differentiable' function", *Inventiones Mathematicae* **105** (1991), 157-175.

- [Hong and Liang 2009] H. Hong and M. Liang, "Fault severity assessment for rolling element bearings using the Lempel-Ziv complexity and continuous wavelet transform", *Journal of Sound and Vibration* **320**:1-2 (2009), 452-468.
- [Hotelling 1933] H. Hotelling, "Analysis of a complex of statistical variables into principal components", *Journal of Educational Psychology* **24** (1933), 417-441, 498-520.
- [Howard et al. 2001] I. Howard, S. Jia and J. Wang, "The dynamic modelling of a spur gear in mesh including friction and a crack", *Mechanical Systems and Signal Processing* **15** (2001), 831–838.
- [Hsu et al. 2005] C. W. Hsu, C. C. Chang and C. J. Lin, "A practical guide to support vector classification", Technical Report, Department of Computer Science and Information Engineering, National Taiwan University, Taiwan, 2005.
- [Hsu and Lin 2002] C. W. Hsu and C. J. Lin, "A comparison of methods for multi-class support vector machines", *IEEE Transactions on Neural Networks* **13**:2 (2002), 415-425.
- [Hu et al. 2007] Q. Hu, Z. He, Z. Zhang and Y. Zi, "Fault diagnosis of rotating machinery based on improved wavelet package transform and SVMs ensemble", *Mechanical Systems and Signal Processing* **21**:2 (2007), 688-705.
- [Huang and Huang 2002] Y.-C. Huang and C.-M. Huang, "Evolving wavelet networks for power transformer condition monitoring", *IEEE Transactions on Power Delivery* **17** (2002), 412–416.
- [Jack and Nandi 2001] L. B. Jack and A. K. Nandi, "Support vector machines for detection and characterization of rolling element bearing faults", *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* **215**:9 (2001), 1065–1074.
- [Jack and Nandi 2002] L. B. Jack and A. K. Nandi, "Fault detection using support vector machines and artificial neural networks, augmented by genetic algorithms", *Mechanical Systems and Signal Processing* **16**:2-3 (2002), 373–390.
- [Jardine et al. 2006] K. S. Jardine, D. Lin and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance", *Mechanical Systems and Signal Processing* **20** (2006), 1483-1510.
- [Kaiser 1983] J. F. Kaiser, "Some observations on vocal tract operation from a fluid point of view", in *Vocal Fold Physiology: Biomechanics, Acoustics, and Phonatory Control* edited by I. R. Titze and R. C. Scherer (Denver Center for the Performing Arts, Denver, CO, 1983), pp. 358–386, 1983.
- [Kaiser 1990] J. F. Kaiser, "On a simple algorithm to calculate the 'energy' of a signal", in *Proceedings IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Albuquerque, New Mexico, pp.381-384, 1990.
- [Karhunen 1946] K. Karhunen, "Uber lineare methoden in der wahrscheinlichkeitsrechnung", *Annals of Academic Science Fennicae, Series A1 Math. Phys.* **37** (1946).
- [Kay 1979] S. M. Kay, "The effect of noise on the regressive spectral estimator", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* **27**:5 (1979), 478-485.
- [Kecman 2001] V. Kecman, *Learning and Soft Computing; Support Vector Machines, Neural Networks and Fuzzy Logic Models*, The MIT Press, 2001.
- [Kim et al. 2003] J. T. Kim, Y. S. Ryu, H. M. Cho and N. Stubbs, "Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method", *Engineering Structures* **25**:1 (2003), 57-67.
- [Kim et al. 2001] Y. W. Kim, G. Rizzoni and V. I. Utkin, "Developing a fault tolerant power-train control system by integrating design of control and diagnostics", *International Journal of Robust and Nonlinear Control* **11** (2001), 1095–1114.

Βιβλιογραφία

- [Klein 1999] L. A. Klein, *Sensor and Data Fusion: Concepts and Application*, Second Edition, SPIE, Press., Vol. TT14, Bellingham, Washington, 1999.
- [Kosambi 1943] D. Kosambi, "Statistics in function space", *Journal of Indian Mathematical Society* **7** (1943), 76-88.
- [Kreuzer and Kust 1996] E. Kreuzer and O. Kust, "Proper orthogonal decomposition - an efficient means of controlling self-excited vibrations of long torsional strings.", *Nonlinear Dynamics and Control ASME* **91** (1996), 105-110.
- [Larson et al. 1997] E. C. Larson, D. P. Wipf and B. E. Parker, "Gear and bearing diagnostics using neural network-based amplitude and phase demodulation", in: *Proceedings of the 51st Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*, Virginia Beach, VA, pp. 511–521. 1997.
- [Leen et al. 1990] T. K. Leen, M. Rudnick and R. Hammerstrom, "Hebbian feature discovery improves classifier efficiency", *Proceedings of the IJCNN, IEEE*, Piscataway, U.S.A, 1990.
- [Lenaerts et al. 2001] V. Lenaerts, G. Kerschen and J. C. Golinval, "Proper orthogonal decomposition for model updating of non-linear mechanical systems", *Mechanical Systems and Signal Processing* **15**:1 (2001), 31-43.
- [Li et al. 2000] B. Li, M.-Y. Chow, Y. Tipsuwan and J. C. Hung, "Neural-network-based motor rolling bearing fault diagnosis", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **47** (2000), 1060–1069.
- [Li and Huang 1999] C. J. Li and T.-Y. Huang, "Automatic structure and parameter training methods for modeling of mechanical systems by recurrent neural networks", *Applied Mathematical Modelling* **23** (1999), 933–944.
- [Li et al. 2009] T.-g. Li, S.-P. Wang and N. Zhao, "Gray-scale edge detection for gastric tumor pathologic cell images by morphological analysis", *Computers in Biology and Medicine* **39** (2009), 947-952.
- [Li et al. 2005] Z. Li, Z. Wu, Y. He and C. Fulei, "Hidden Markov model-based fault diagnostics method in speed-up and speed-down process for rotating machinery", *Mechanical Systems and Signal Processing* **19** (2005), 329–339.
- [Lifshitz and Rotem 1969] J. M. Lifshitz and A. Rotem, "Determination of Reinforcement Unbonding of Composites by a Vibration Technique", *Journal of Composite Materials* **3**:3 (1969), 412–423.
- [Lin and Qu 2000] J. Lin and L. Qu, "Feature extraction based on Morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis", *Journal of Sound and Vibration* **234**:1 (2000), 135-148.
- [Lin and Zuo 2003] J. Lin and M. J. Zuo, "Gearbox fault diagnosis using adaptive wavelet filter", *Mechanical Systems and Signal Processing* **17**:6 (2003), 1259-1269.
- [Lin et al. 2004] J. Lin, M. J. Zuo and K. R. Fyfe, "Mechanical fault detection based on the wavelet de-noising technique", *Journal of Vibration and Acoustics* **126** (2004), 9–16.
- [Liu et al. 1996] T. I. Liu, J. H. Singonahalli and N. R. Iyer, "Detection of roller bearing defects using expert system and fuzzy logic", *Mechanical Systems and Signal Processing* **10** (1996), 595–614.
- [Loève 1945] M. Loève, "Fonctions aléatoires de second ordre.", *Compte Rend. Acad. Sci. (Paris)* (1945).
- [Loparo 2006] K. A. Loparo, Bearings vibration data set, Case Western Reserve University, <http://www.eecs.case.edu/laboratory/bearing/download.htm>.
- [Loparo et al. 2000] K. A. Loparo, M. L. Adams, W. Lin, M. F. Abdel-Magied and N. Afshari, "Fault detection and diagnosis of rotating machinery", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **47** (2000), 1005–1014.

- [Loparo et al. 2003] K. A. Loparo, A. H. Falah and M. L. Adams, "Model-based fault detection and diagnosis in rotating machinery", in: *Proceedings of the Tenth International Congress on Sound and Vibration*, Stockholm, Sweden, pp. 1299–1306. 2003.
- [Lou and Loparo 2004] X. Lou and K. A. Loparo, "Bearing fault diagnosis based on wavelet transform and fuzzy inference", *Mechanical Systems and Signal Processing* **18** (2004), 1077–1095.
- [Loutridis et al. 2005] S. Loutridis, E. Douka, L. J. Hadjileontiadis and A. Trochidis, "A two-dimensional wavelet transform for detection of cracks in plates", *Engineering Structures* **27**:9 (2005), 1327–1338.
- [Loutridis et al. 2004] S. Loutridis, E. Douka and A. Trochidis, "Crack identification in double-cracked beams using wavelet analysis", *Journal of Sound and Vibration* **277**:4-5 (2004), 1025–1039.
- [Lumley 1967] J. L. Lumley, "The structure of inhomogeneous turbulent flows", pp. 166–178 in *Atmospheric Turbulence and Radio Wave Propagation*, edited by A. M. Yaglom and V. I. Tatarski, Nauka, Moscow, 1967.
- [Luzzato 2003] E. Luzzato, "Approximate computation of non-linear effects in a vibrating cracked beam", *Journal of Sound and Vibration* **265**:4 (2003), 745–763.
- [Ma and Li 1995] J. Ma and C. J. Li, "Detection of localized defects in rolling element bearings via composite hypothesis test", *Mechanical Systems and Signal Processing* **9** (1995), 63–75.
- [Mak et al. 2009] K. L. Mak, P. Peng and K. F. C. Yiu, "Fabric defect detection using morphological filters", *Image and Vision Computing* **27** (2009), 1585–1592.
- [Mallat 1998] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, San Diego, 1998.
- [Maragos et al. 1993a] P. Maragos, J. F. Kaiser and T. F. Quatieri, "Energy separation in signal modulations with application to speech analysis", *IEEE Transaction on Signal Processing* **41**:10 (1993a), 3024–3051.
- [Maragos et al. 1993b] P. Maragos, J. F. Kaiser and T. F. Quatieri, "On Amplitude and Frequency Demodulation Using Energy Operators", *IEEE Transactions on Signal Processing* **41**:4 (1993b), 1532–1550.
- [Maragos et al. 1990] P. Maragos, T. F. Quatieri and J. F. Kaiser, "Detecting Nonlinearities in Speech using an Energy Operator", in *Proceedings of 1990 IEEE Digital Processing Workshop*, New Paltz, NY, 1990.
- [Maragos and Schafer 1987] P. Maragos and R. Schafer, "Morphological filters - Part I: Their set-theoretic analysis and relations to linear shift-invariant filters", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* **35**:8 (1987), 1153–1169.
- [Matheron 1975] G. Matheron, *Random sets and Integral Geometry*, John Wiley & Sons, NY, 1975.
- [Matsopoulos and Marshall 1994] G. K. Matsopoulos and S. Marshall, "Use of Morphological Image Processing Techniques for the Measurement of a fetal head from ultrasound images", *Pattern Recognition* **27** 10 (1994), 1317–1324.
- [McCormick 1983] G. P. McCormick, *Non Linear Programming: Theory, Algorithms and Applications*, John Wiley and Sons, Inc., 1983.
- [McFadden and Smith 1984a] P. D. McFadden and J. D. Smith, "Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing", *Journal of Sound and Vibration* **96**:1 (1984a), 69–82.
- [McFadden and Smith 1984b] P. D. McFadden and J. D. Smith, "Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique – A review", *Tribology International* **V117**:1 (1984b), 3–10.

- [Mechefske 1998] C. K. Mechefske, "Objective machinery fault diagnosis using fuzzy logic", *Mechanical Systems and Signal Processing* **12** (1998), 855–862.
- [Mechefske and Mathew 1992] C. K. Mechefske and J. Mathew, "Fault detection and diagnosis in low speed rolling element bearing. Part II: The use of nearest neighbour classification", *Mechanical Systems and Signal Processing* **6** (1992), 309–316.
- [Meltzer and Dien 2004] G. Meltzer and N. P. Dien, "Fault diagnosis in gears operating under non-stationary rotational speed using polar wavelet amplitude maps", *Mechanical Systems and Signal Processing* **18** (2004), 985–992.
- [Meyer 1990] Y. Meyer, *Ondelettes*, Hermann, Paris, 1990.
- [Miller et al. 1999] A. J. Miller, K. M. Reichard and i. , "A new wavelet basis for automated fault diagnostics of gear teeth", in *Inter-Noise 99: Proceedings of the 1999 International Congress on Noise Control Engineering*, vols. 1–3, Poughkeepsie, pp. 1597–1602. 1999.
- [Mitchell 1993] J. C. Mitchell, *Introduction to machinery analysis and monitoring*, Pennwell, Tulsa, Okla, 1993.
- [Montgomery 1997] D. C. Montgomery, *Introduction to statistical quality control*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1997.
- [Nayfeh and Mook 1979] A. H. Nayfeh and D. T. Mook, *Nonlinear Oscillations*, John Wiley, New York, 1979.
- [Newman and Krishnaprasad 1998] A. J. Newman and P. S. Krishnaprasad, "Nonlinear model reduction for RTCVD", *Proceedings of the 32th Conference on Information Sciences and Systems* Princeton, U.S.A, 1998.
- [Nikolaou and Antoniadis 2002a] N. G. Nikolaou and I. A. Antoniadis, "Demodulation of vibration signals generated by defects in rolling element bearings using complex shifted morlet wavelets", *Mechanical Systems and Signal Processing* **16:4** (2002a), 677-694.
- [Nikolaou and Antoniadis 2002b] N. G. Nikolaou and I. A. Antoniadis, "Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet packets", *NDT&E International* **35:3** (2002b), 197-205.
- [Nikolaou and Antoniadis 2003] N. G. Nikolaou and I. A. Antoniadis, "Application of morphological operators as envelope extractors for impulsive-type periodic signals ", *Mechanical System and Signal Processing* **17:6** (2003), 1147-1162.
- [Nishida et al. 1999] S. Nishida, M. Nakamura, A. Ikeda and H. Shibasaki, "Signal separation of background EEG and spike by using morphological filter", *Medical engineering physics* **21** (1999), 601-608.
- [Nishida et al. 1995] S. Nishida, M. Nakamura, M. Miyazaki, S. Suwazono, M. Honda, T. Nagamine and H. Shibasaki, "Construction of a morphological filter for detecting an event related potential P300 in single sweep EEG record in children", *Medical engineering physics* **17 6** (1995), 425-430.
- [Nishida et al. 1997] S. Nishida, M. Nakamura, K. Shindo, M. Kanda and H. Shibasaki, "A morphological filter for extracting waveform characteristics of single sweep evoked potentials", *Automatica* **35** (1997), 937-943.
- [Nyberg 2001] M. Nyberg, "A general framework for fault diagnosis based on statistical hypothesis testing", in: *Twelfth International Workshop on Principles of Diagnosis (DX 2001)*, Via Lattea, Italian Alps, pp. 135–142, 2001.
- [Obukhov 1954] M. A. Obukhov, "Statistical description of continuous fields", *T. Geophys. Int. Akad. Nauk. USSR* **24** (1954), 3–42.
- [Oppenheimer and Loparo 2002] C. H. Oppenheimer and K. A. Loparo, "Physically based diagnosis and prognosis of cracked rotor shafts", in: *Component and Systems*

- Diagnostics, Prognostics, and Health Management II*, vol. 4733, Bellingham, pp. 122–132. 2002.
- [Ostachowicz and Krawczuk 1991] W. M. Ostachowicz and M. Krawczuk, "Analysis of the effect of cracks on the natural frequencies of a cantilever beam", *Journal of Sound and Vibration* **150**:2 (1991), 191–201.
- [P.Heidenreich et al. 2009] P.Heidenreich, L.A.Cirillo and A.M.Zoubir, "Morphological image processing for FM source detection and localization", *Signal Processing* **89** (2009), 1070–1080.
- [Pachaud et al. 1997] C. Pachaud, R. Salvetat and C. Fray, "Crest Factor and Kurtosis Contributions to identify defects inducing periodical impulsive forces", *Mechanical Systems and Signal Processing* **11** 6 (1997), 903-916.
- [Pan et al. 2003] M.-C. Pan, P. Sas and H. V. Brussel, "Machine condition monitoring using signal classification techniques", *Journal of Vibration and Control* **9** (2003), 1103–1120.
- [Paya et al. 1997] B. A. Paya, I. I. Esat and M. N. M. Badi, "Artificial neural network based fault diagnostics of rotating machinery using wavelet transforms as a preprocessor", *Mechanical Systems and Signal Processing* **11** (1997), 751–765.
- [Pearson 1901] K. Pearson, "On lines and planes of closest fit to systems of points in space", *Philosophical Magazine* **2** (1901), 559-572.
- [Peng and Chu 2004] Z. K. Peng and F. L. Chu, "Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: A review with bibliography ", *Mechanical Systems and Signal Processing* **18** (2004), 199–221.
- [Peng et al. 2009] Z. K. Peng, M. R. Jackson, J. A. Rongong, F. L. Chu and R. M. Parkin, "On the energy leakage of discrete wavelet transform", *Mechanical Systems and Signal Processing* **23**:2 (2009), 330-343.
- [Ping and Lihui 2001] Z. Ping and C. Lihui, "Document filters using morphological and geometrical features of characters", *Image and Vision Computing* **19** (2001), 847-855.
- [Potamianos and Maragos 1994] A. Potamianos and P. Maragos, "A comparison of the energy operator and the Hilbert transform approach to signal and speech demodulation", *Signal Processing* **37** (1994), 95-120.
- [Pougachev 1953] V. S. Pougachev, "General theory of the correlations of random functions", *Izv. Akad. Nauk. USSR* **17** (1953), 1401-1402.
- [Propes 2003] N. C. Propes, "A fuzzy Petri net based mode identification algorithm for fault diagnosis of complex systems", in: *System Diagnosis and Prognosis: Security and Condition Monitoring Issues III*, vol. 5107, Bellingham, pp. 44–53, 2003.
- [Qiu et al. 2006] H. Qiu, J. Lee, J. Lin and G. Yu, "Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics", *Journal of Sound and Vibration* **289**:4-5 (2006), 1066-1090.
- [Randall 1987] R. B. Randall, *Frequency Analysis*, Bruel & Kjaer, 3rd edn, Copenhagen, 1987.
- [Randall 2002.] R. B. Randall, "State of the Art in Monitoring Rotating Machinery", pp. 1457–1477 in *Noise and vibration engineering: proceedings of ISMA 2002* (Leuven, 2002), vol. 4, edited by P. Sas and B. van Hal, Katholieke Universiteit Leuven, Department of Mechanical Engineering, Leuven, 2002.
- [Rao 1995] S. Rao, *Mechanical Vibrations*, Addison-Wsley Publishing Company, 1995.
- [Roemer et al. 1996] M. J. Roemer, C. Hong and S. H. Hesler, "Machine health monitoring and life management using finite element-based neural networks", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power—Transactions of the ASME* **118** (1996), 830–835.

- [Rojas and Nandi 2006] A. Rojas and A. Nandi, "Practical scheme for fast detection and classification of rolling-element bearing faults using support vector machines", *Mechanical Systems and Signal Processing* **20**:7 (2006), 1523-1536.
- [Ruotolo and Surace 1997] R. Ruotolo and C. Surace, "Damage Assessment of Multiple Cracked Beams: Results and Experimental Validation", *Journal of Sound and Vibration* **206**:4 (1997), 567–588.
- [Rytter 1993] A. Rytter, *Vibration based inspection of civil engineering structures*, Ph.D. thesis, Aalborg University, Aalborg, 1993.
- [Sahin and Shenoι 2003] M. Sahin and R. A. Shenoι, "Quantification and localisation of damage in beam-like structures by using artificial neural networks with experimental validation", *Engineering Structures* **25**:14 (2003), 1785-1802.
- [Samanta and Al-Balushi 2003] B. Samanta and K. R. Al-Balushi, "Artificial neural network based fault diagnostics of rolling element bearings using time-domain features", *Mechanical Systems and Signal Processing* **17** (2003), 317–328.
- [Samanta et al. 2003] B. Samanta, K. R. Al-Balushi and S. A. Al-Araimi, "Artificial neural networks and support vector machines with genetic algorithm for bearing fault detection", *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **16**:7-8 (2003), 657–665.
- [Samanta and Nataraj 2009] B. Samanta and C. Nataraj, "Use of particle swarm optimization for machinery fault detection", *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **22**:2 (2009), 308-316.
- [Sampath et al. 2002] S. Sampath, S. Ogaji, R. Singh and D. Probert, "Engine-fault diagnostics: An optimisation procedure", *Applied Energy* **73** (2002), 47–70.
- [Schurmann 1996] J. Schurmann, *Pattern Recognition: A Unified View of Statistical and Neural Approaches*, Wiley, New York, 1996.
- [Sekhar 2004] A. S. Sekhar, "Model-based identification of two cracks in a rotor system", *Mechanical Systems and Signal Processing* **18** (2004), 977–983.
- [Sekhar 2008] A. S. Sekhar, "Multiple cracks effects and identification", *Mechanical Systems and Signal Processing* **22**:4 (2008), 845–878.
- [Serra 1982] J. Serra, *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, New York, 1982.
- [Sheen 2008] Y.-T. Sheen, "An envelope detection method based on the first-vibration-mode of bearing vibration", *Measurement* **41** (2008), 797-809.
- [Shull 2002] P. J. Shull, *Nondestructive evaluation theory, techniques, and applications*, Marcel Decker Inc., New York, 2002.
- [Siddique et al. 2003] A. Siddique, G. S. Yadava and B. Singh, "Applications of artificial intelligence techniques for induction machine stator fault diagnostics: Review", in: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, New York, pp. 29–34. 2003.
- [Silva et al. 1998] R. G. Silva, R. L. Reuben, K. J. Baker and S. J. Wilcox, "Tool wear monitoring of turning operations by neural network and expert system classification of a feature set generated from multiple sensors", *Mechanical Systems and Signal Processing* **12** (1998), 319–332.
- [Simani et al. 2003] S. Simani, C. Fantuzzi and R. J. Patton, *Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification Techniques*, Springer, London, 2003.
- [Skormin et al. 1999] V. A. Skormin, L. J. Popyack, V. I. Gorodetski, M. L. Araiza and J. D. Michel, "Applications of cluster analysis in diagnostics-related problems", in: *Proceedings of the 1999 IEEE Aerospace Conference*, vol. 3, Snowmass at Aspen, CO, USA, pp. 161–168, 1999.

- [Smola and Schölkopf 1998] A. J. Smola and B. Schölkopf, "On a kernel-based method for pattern recognition, regression, approximation and operator inversion", *Algorithmica* **22** (1998), 211-231.
- [Sohn et al. 2004] H. Sohn, C. R. Farrar, F. M. Hemez, D. D. Shunk, D. W. Stinemates, B. R. Nadler and J. J. Czarnecki, "A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001", Technical Report LA-13976-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 2004.
- [Sohn et al. 2002] H. Sohn, K. Worden and C. R. Farrar, "Statistical damage classification under changing environmental and operational conditions", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **13** (2002), 561–574.
- [Spoerre 1997] J. K. Spoerre, "Application of the cascade correlation algorithm (CCA) to bearing fault classification problems", *Computers in Industry* **32** (1997), 295–304.
- [Stanek et al. 2001] M. Stanek, M. Morari and K. Frohlich, "Model-aided diagnosis: An inexpensive combination of model-based and case-based condition assessment", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews* **31** (2001), 137–145.
- [Staszewski 1997] W. J. Staszewski, "Identification of damping in MDOF systems using time-scale decomposition", *Journal of Sound and Vibration* **203:2** (1997), 283-305.
- [Staszewski et al. 1997] W. J. Staszewski, K. Worden and G. R. Tomlinson, "Time–frequency analysis in gearbox fault detection using the Wigner–Ville distribution and pattern recognition", *Mechanical Systems and Signal Processing* **11** (1997), 673–692.
- [Sun et al. 2004] Q. Sun, P. Chen, D. Zhang and F. Xi, "Pattern recognition for automatic machinery fault diagnosis", *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME* **126** (2004), 307–316.
- [Sun et al. 2002] Y. Sun, K. L. Chan and S. M. Krishnan, "ECG signal conditioning by morphological filtering", *Computers in Biology and Medicine* **32** (2002), 465–479.
- [Sun et al. 2005] Y. Sun, K. L. Chan and S. M. Krishnan, "Characteristic wave detection in ECG signal using morphological transform", *BMC Cardiovascular Disorders* **5:28** (2005).
- [Sussman and Kahrs 1996] R. B. Sussman and M. Kahrs, "Analysis and resynthesis of musical instrument sounds using energy separation", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing* **2** (1996), 997-1000.
- [Tao et al. 2007] B. Tao, L. Zhu, H. Dinga and Y. Xiong, "An alternative time-domain index for condition monitoring of rolling element bearings - A comparison study", *Reliability Engineering and System Safety* **92** (2007), 660–670.
- [Taylor 1994] J. Taylor, *The vibration analysis handbook*, The Vibration Institute, 1994.
- [Teager 1980] H. M. Teager, "Some Observations on Oral Air Flow During Phonation", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, Signal Processing*, **28** 5 (1980), 599-601.
- [Teager and Teager 1983] H. M. Teager and S. M. Teager, "Active fluid dynamic voice production models, or there is a unicorn in the garden", in *Vocal Fold Physiology: Biomechanics, Acoustics, and Phonatory Control* edited by I. R. Titze and R. C. Scherer (Denver Center for the Performing Arts, Denver, CO, 1983), pp. 387–401, 1983.
- [Teager and Teager 1990] H. M. Teager and S. M. Teager, "Evidence for Nonlinear Production Mechanisms in the Vocal Tract", *NATO Advanced Study Institute on Speech Production and Speech Modelling*, July 1989, Bonas, France, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA 1990.

Βιβλιογραφία

- [Toliyat et al. 2003] H. A. Toliyat, K. Abbaszadeh, M. M. Rahimian and L. E. Olson, "Rail defect diagnosis using wavelet packet decomposition", *IEEE Transactions on Industry Applications* **39** 1454–1461 (2003).
- [Tonshoff et al. 2003] H. K. Tonshoff, X. Li and C. Lapp, "Application of fast Haar transform and concurrent learning to tool-breakage detection in milling", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **8** 414–417 (2003).
- [Vania and Pennacchi 2004] A. Vania and P. Pennacchi, "Experimental and theoretical application of fault identification measures of accuracy in rotating machine diagnostics", *Mechanical Systems and Signal Processing* **18** (2004), 329–352.
- [Vapnik 1995] V. Vapnik, *The Nature of Statistical Learning Theory*, Springer-Verlag, New York, 1995.
- [Vapnik 1998] V. Vapnik, *Statistical Learning Theory*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1998.
- [Vapnik et al. 1997] V. Vapnik, S. Golowich and A. Smola, "Support Vector Method for Function Approximation, Regression Estimation and Signal Processing", *M. Mozer, M. Jordan, and T. Petsche (eds.): Neural Information Processing Systems, Vol. 9. MIT Press, Cambridge, MA*, (1997).
- [Wahba 1990] G. Wahba, "Spline Models for Observational Data", *Series in Applied Mathematics, SIAM, Philadelphia* **59** (1990).
- [Wang and Too 2002] C.-C. Wang and G.-P. J. Too, "Rotating machine fault detection based on HOS and artificial neural networks", *Journal of Intelligent Manufacturing* **13** (2002), 283–293.
- [Wang and Gao 2003] C. Wang and R. X. Gao, "Wavelet transform with spectral post-processing for enhanced feature extraction", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **52** (2003), 1296–1301.
- [Wang et al. 2009] C. Wang, R.X.Gao and R.Yan, "Unified time-scale-frequency analysis for machine defect signature extraction: Theoretical framework", *Mechanical Systems and Signal Processing* **23**:1 (2009), 226-335.
- [Wang and Deng 1999] Q. Wang and X. Deng, "Damage detection with spatial wavelets", *International Journal of Solids and Structures* **36**:23 (1999), 3443-3468.
- [Wang 2002] W. Y. Wang, "Towards dynamic model-based prognostics for transmission gears", in: *Component and Systems Diagnostics, Prognostics, and Health Management II*, vol. 4733, Bellingham, pp. 157–167, 2002.
- [Wax and Kailath 1985] M. Wax and T. Kailath, "Detection of signals by information theoretic criteria", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing* **33** (1985), 387-392.
- [Webb 2002] A. R. Webb, *Statistical Pattern Recognition*, Wiley, West Sussex, England, 2002.
- [Wen et al. 2003] Z. Y. Wen, J. Crossman, J. Cardillo and Y. L. Murphey, "Case base reasoning in vehicle fault diagnostics", in: *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks* vols. 1–4, New York, 2003, pp. 2679–2684. 2003.
- [Wigner 1932] E. P. Wigner, "On the Quantum Correction for Thermodynamic Equilibrium", *Physics Reviews* **40**:5 (1932), 749-759.
- [Williams et al. 1994] J. H. Williams, A. Davies and P. R. Drake, *Condition-Based Maintenance and Machine Diagnostics*, Chapman & Hall, London, 1994.
- [Wowk 1991] V. Wowk, *Machinery vibration: measurement and analysis*, McGraw-Hill, Inc., 1991.
- [Xu and Yan 1991] Y.-G. Xu and Y.-L. Yan, "Research on Haar spectrum in fault diagnosis of rotating machinery", *Applied Mathematics and Mechanics* **12** (1991), 61–66 (English Edition).

- [Xu and Ge 2004] Y. Xu and M. Ge, "Hidden Markov model-based process monitoring system", *Journal of Intelligent Manufacturing* **15** (2004), 337–350.
- [Xua et al. 2007] G. Xua, JingWangb, Q. Zhangb, S. Zhangb and J. Zhuc, "A spike detection method in EEG based on improved morphological filter", *Computers in Biology and Medicine* **37** (2007), 1647 – 1652.
- [Yan and Ma 2004] G.-T. Yan and G.-F. Ma, "Fault diagnosis of diesel engine combustion system based on neural networks", in: *Proceedings of the 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics* vol. 5, Shanghai, China, pp. 3111–3114, 2004.
- [Yang et al. 2005] B.-S. Yang, T. Han and W.-W. Hwang, "Fault Diagnosis of Rotating Machinery based on Multi-Class Support Vector Machines", *Journal of Mechanical Science and Technology* **19:3** (2005), 846-859.
- [Yang et al. 2004a] B.-S. Yang, T. Han and Y.-S. Kim, "Integration of ART-Kohonen neural network and case-based reasoning for intelligent fault diagnosis", *Expert Systems with Applications* **26** (2004a), 387–395.
- [Yang et al. 2004b] B.-S. Yang, S. K. Jeong, Y.-M. Oh and A. C. C. Tan, "Case-based reasoning system with Petri nets for induction motor fault diagnosis", *Expert Systems with Applications* **27** (2004b), 301–311.
- [Yang et al. 2002] D.-M. Yang, A. F. Stronach, P. Macconnell and J. Penman, "Third-order spectral techniques for the diagnosis of motor bearing condition using artificial neural networks", *Mechanical Systems and Signal Processing* **16** (2002), 391–411.
- [Yang et al. 2007] J. Yang, Y. Zhang and Y. Zhu, "Intelligent fault diagnosis of rolling element bearing based on SVMs and fractal dimension", *Mechanical Systems and Signal Processing* **21:5** (2007), 2012-2024.
- [Yang 2003] S. K. Yang, "A condition-based failure-prediction and processing-scheme for preventive maintenance", *IEEE Transactions on Reliability* **52** (2003), 373–383.
- [Ye et al. 2002] D. Ye, Q. Ding and Z. Wu, "New method for faults diagnosis of rotating machinery based on 2-dimension hidden Markov model", in: *Proceedings of the International Symposium on Precision Mechanical Measurement* vol. 4, Hefei, China, pp. 391–395, 2002.
- [Yen and Lin 2000] G. G. Yen and K.-C. Lin, "Wavelet packet feature extraction for vibration monitoring", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **47** (2000), 650–667.
- [Ying et al. 2000] J. Ying, T. Kirubarajan, K. R. Pattipati and A. Patterson-Hine, "A hidden Markov model-based algorithm for fault diagnosis with partial and imperfect tests", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* **30** 463–473 (2000).
- [Yoon et al. 1993] Y. H. Yoon, E. S. Yoon and K. S. Chang, "Process fault diagnostics using the integrated graph model", in: *On-Line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries* Oxford, pp. 89–94. 1993.
- [Yuan and Chu 2007a] S.-F. Yuan and F.-L. Chu, "Fault diagnosis based on particle optimisation and support vector machines", *Mechanical Systems and Signal Processing* **21:4** (2007a), 1787–1798.
- [Yuan and Chu 2007b] S.-F. Yuan and F.-L. Chu, "Fault diagnosis based on support vector machines with parameter optimisation by artificial immunisation algorithm", *Mechanical Systems and Signal Processing* **21:3** (2007b), 1318–1330.
- [Yun et al. 2009] J.-U. Yun, H.-J. Lee, A. K. Paul and J.-H. Baek, "Face detection for video summary using illumination-compensation and morphological processing", *Pattern Recognition Letters* **30** (2009), 856–860.

Βιβλιογραφία

- [Zhang et al. 2006] L. Zhang, R. Gao and K. B. Lee, "Spindle Health Diagnosis Based on Analytic Wavelet Enveloping", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **55**:5 (2006), 1850-1858.
- [Zhang et al. 2003] S. Zhang, T. Asakura, X. L. Xu and B. J. Xu, "Fault diagnosis system for rotary machine based on fuzzy neural networks", *JSME International Journal. Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing* **46** (2003), 1035–1041.
- [Zhang et al. 2005] S. Zhang, J. Mathew, L. Ma and Y. Sun, "Best basis-based intelligent machine fault diagnosis", *Mechanical Systems and Signal Processing* **19** (2005), 357–370.
- [Zhong and Oyadiji 2007] S. Zhong and S. O. Oyadiji, "Crack detection in simply supported beams without baseline modal parameters by stationary wavelet transform", *Mechanical Systems and Signal Processing* **21**:4 (2007), 1853–1884.
- [Κουκούλης 2008] Ι. Ν. Κουκούλης, "Ανάπτυξη μεθοδολογίας μη καταστροφικού ελέγχου στη διάγνωση αλλοιώσεων σε πολυστρωματικές δομές", Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2008.

Παραρτήματα

Παράρτημα Α

Στοχαστικό Μοντέλο Προσομοίωσης Δυναμικής Απόκρισης Ένσφαιρων Τριβέων

Εισαγωγή

Πολλά σήματα που καταγράφονται κατά την διάρκεια λειτουργίας μηχανών είναι περιοδικά ή ημιπεριοδικά (συνδυασμός μη συμμετρικών περιοδικών σημάτων) και έχουν συνιστώσες που είναι σε φάση (“κλειδωμένες”) με τις διάφορες ταχύτητες περιστροφής και τις αρμονικές τους. Μερικά σήματα όμως, όπως αυτά που προκύπτουν από ελαττωματικούς ένσφαιρους τριβείς, συνδέονται μεν με την ταχύτητα περιστροφής αλλά δεν βρίσκονται αυστηρά σε φάση με αυτήν. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην εμφάνιση μικρής μεν αλλά τυχαία μεταβαλλόμενης ολίσθησης μεταξύ των μηχανικών μερών του ένσφαιρου τριβέα.

Κατά την διάρκεια της λειτουργίας του τριβέα, το πηλίκο του αξονικού προς το ακτινικό φορτίο για κάθε στοιχείο κύλισης μεταβάλλεται, ανάλογα με την θέση στην οποία βρίσκεται κάθε στιγμή. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κάθε στοιχείο κύλισης να προσπαθεί να κινηθεί με διαφορετική ταχύτητα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Ο κλωβός, που περικλείει τα στοιχεία κύλισης, τα αναγκάζει να διατηρούν μια ομοιόμορφη μέση απόσταση μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να προκαλείται ολίσθηση μεταξύ των στρεφόμενων μερών του τριβέα.

Οι μαθηματικές σχέσεις υπολογισμού των χαρακτηριστικών συχνοτήτων που υποδεικνύουν ελάττωμα σε ένσφαιρο τριβέα περιλαμβάνουν έναν όρο $\cos \beta$ (όπου β η γωνία επαφής μετρούμενη από την κατακόρυφη διεύθυνση). Η ύπαρξη ολίσθησης κατά την διάρκεια της κίνησης των στοιχείων κύλισης μεταβάλλει - απειροστά - τοπικά την γωνία επαφής και κατά συνέπεια επηρεάζει την μέση ακτίνα κύλισης. Για αυτό το λόγο τέτοιας φύσεως σήματα δεν είναι ούτε αυστηρά “κλειδωμένα” με την φάση της ταχύτητας περιστροφής αλλά ούτε αυστηρά περιοδικά. Αντίθετα εμφανίζουν συχνά κυκλωστάσιμες ιδιότητες, δηλαδή περιοδικότητα εμφανίζουν οι 2^{15} τάξης στατιστικές ιδιότητές τους.

Ανάπτυξη Μοντέλου

Σημειακή βλάβη στον ένσφαιρο τριβέα

Κάθε φορά που τα στοιχεία κύλισης του ένσφαιρου τριβέα έρχονται σε επαφή με φθορές ή ελαττώματα, τα οποία βρίσκονται στον εσωτερικό ή στον εξωτερικό δακτύλιο, παράγεται μια δόνηση. Η δόνηση αυτή μπορεί να προσομοιαστεί με έναν κρουστικό παλμό, ο οποίος μαθηματικά εκφράζεται με την μοναδιαία κρουστική συνάρτηση. Η μοναδιαία

Παράρτημα Α

κρουστική συνάρτηση βασίζεται στη συνάρτηση παλμού $f_\varepsilon(t)$, η οποία ορίζεται από τη σχέση:

$$f_\varepsilon(t) = \begin{cases} 1/\varepsilon, & 0 \leq t \leq \varepsilon \\ 0, & t \geq \varepsilon \end{cases}$$

όπου $\varepsilon > 0$

Όταν το ε τείνει στο μηδέν, η συνάρτηση $f_\varepsilon(t)$ τείνει στην κρουστική συνάρτηση $\delta(t)$. Εδώ θα θεωρήσουμε τον κρουστικό παλμό ιδανικό και θα μοντελοποιήσουμε την δόνηση χρησιμοποιώντας την ιδανική κρουστική συνάρτηση $\delta(t)$. Επίσης θα θεωρήσουμε ότι το πλάτος της δόνησης εξαρτάται από την σοβαρότητα του ελαττώματος και από το φορτίο που ασκείται τοπικά στην επαφή του ελαττώματος την στιγμή της κρούσης. Η σοβαρότητα της βλάβης δηλώνεται με το γινόμενο της κρουστικής συνάρτησης $\delta(t)$ με μια σταθερά d_0 . Ο κρουστικός παλμός αντιπροσωπεύει τη διέγερση, δηλαδή τη δύναμη που εφαρμόζεται ως είσοδος στον ένσφαιρο τριβέα και την μηχανή. Κάθε τέτοια διέγερση προκαλεί μια απόκριση από τον ένσφαιρο τριβέα και την μηχανή, η οποία λαμβάνεται υπόψη στη συνέχεια.

Εξαιτίας της περιστροφής του ένσφαιρου τριβέα, ο κρουστικός παλμός εκδηλώνεται περιοδικά με μια χαρακτηριστική συχνότητα, η οποία εξαρτάται από τον τύπο της βλάβης. Οι χαρακτηριστικές αυτές συχνότητες, στις οποίες εκδηλώνονται οι βλάβες ενός ένσφαιρου τριβέα υπολογίζονται με βάση την ταχύτητα περιστροφής και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ένσφαιρου τριβέα.

Όταν η βλάβη του ένσφαιρου τριβέα αναπτύσσεται στον εσωτερικό δακτύλιο, οι κρουστικοί παλμοί παράγονται όταν η φθαρμένη επιφάνεια έρθει σε επαφή με τα στοιχεία του ένσφαιρου τριβέα στην περιοχή φόρτισης. Ο ρυθμός με τον οποίο επαναλαμβάνονται οι κρουστικοί παλμοί ονομάζεται *Συχνότητα Διέλευσης στον Εσωτερικό Δακτύλιο (Ball Pass Frequency Inner race – BPF_I)* και για την περίπτωση που ο εξωτερικός δακτύλιος είναι ακίνητος ενώ ο εσωτερικός περιστρέφεται δίνεται από την σχέση:

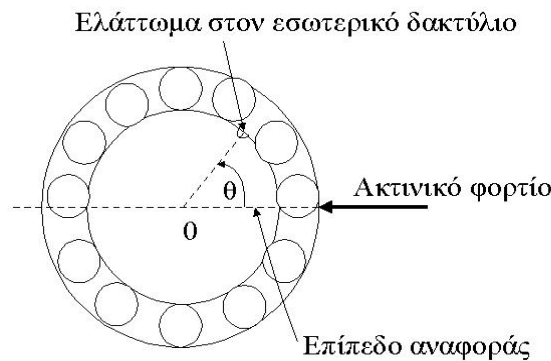
$$BPF_I = \frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right)$$

όπου: f_r είναι η συχνότητα περιστροφής του άξονα πάνω στον οποίο εδράζεται ο τριβέας,
 n είναι το πλήθος των σφαιρών,
 BD είναι η διάμετρος των σφαιρών,
 PD είναι η απόσταση των κέντρων δύο αντιδιαμετρικών σφαιρών και β είναι η γωνία επαφής.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση που η βλάβη αναπτύσσεται στον εξωτερικό δακτύλιο, ο ρυθμός με τον οποίο επαναλαμβάνονται οι κρουστικοί παλμοί ονομάζεται *Συχνότητα Διέλευσης στον Εξωτερικό Δακτύλιο (Ball Pass Frequency Outer race – BPF_O)* και για την περίπτωση που ο εξωτερικός δακτύλιος είναι ακίνητος ενώ ο εσωτερικός περιστρέφεται δίνεται από την σχέση:

$$BPFO = \frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right)$$

Στη συνέχεια είναι απαραίτητη η επιλογή ενός επιπέδου αναφοράς βάσει του οποίου θα καθορίζεται η γωνιακή θέση της σημειακά φθαρμένης επιφάνειας στην περίπτωση που η βλάβη βρίσκεται στον εσωτερικό δακτύλιο. Στο σχήμα Π.1-1 παρουσιάζεται ένας ένσφαιρος τριβέας, στον οποίο εφαρμόζεται εξωτερικά μια ακτινικά μοναδιαία φόρτιση ενώ στον εσωτερικό του δακτύλιο έχει αναπτυχθεί ένα σημειακό ελάττωμα. Η θέση της βλάβης καθορίζεται από την γωνία θ μεταξύ της φθαρμένης επιφάνειας και του επιπέδου εφαρμογής του ακτινικού φορτίου. Επιπλέον για την χρονική στιγμή $t=0$ γίνονται οι παραδοχές ότι ακριβώς τότε η φθαρμένη επιφάνεια βρίσκεται στη γωνιακή θέση $\theta=0^\circ$ και ότι έρχεται σε επαφή με μια σφαίρα.



Σχήμα Π.1-1: Η γωνιακή θέση της βλάβης στον εσωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα.

Στη συνέχεια του μοντέλου θα εξεταστεί εκτενώς η διακύμανση του φορτίου γύρω από τον ένσφαιρο τριβέα, όμως προσωρινά στο σημείο αυτό θεωρείται ότι γύρω από την περιφέρεια του τριβέα εφαρμόζεται ομοιόμορφα μια μοναδιαία ακτινική φόρτιση. Τότε ο κραδασμός που παράγεται εξαιτίας της βλάβης μπορεί να προσομοιωθεί με μια σειρά άπειρων κρουστικών παλμών $\delta(t)$ (Dirac) οι οποίοι έχουν το ίδιο πλάτος. Η περίοδος T_d των κρουστικών παλμών είναι ίση με τον αντίστροφο της χαρακτηριστικής συχνότητας βλάβης. Η προαναφερθείσα σειρά κρουστικών παλμών εκφράζεται μαθηματικά από την σχέση:

$$d(t) = d_0 \cdot \sum_{k=0}^N \delta(t - k \cdot T_d)$$

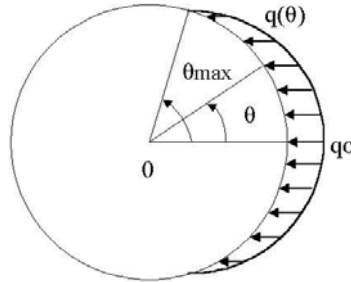
Το πλάτος των δονήσεων, αναιρώντας την θεώρηση που έγινε προηγουμένως, δεν εξαρτάται μόνον από την σοβαρότητα του ελαττώματος και από το φορτίο που ασκείται τοπικά στην επαφή του ελαττώματος την στιγμή της κρούσης. Επεκτείνοντας την λογική αυτή στην προσπάθεια να προσεγγιστούν πιο ρεαλιστικά τα πραγματικά σήματα θεωρείται στο σημείο αυτό ότι το πλάτος των παραγόμενων κραδασμών δεν εξαρτάται μόνον από τα παραπάνω αλλά παράλληλα εξαρτάται από την διακύμανση της δυσκαμψίας της κατασκευής, από την ύπαρξη κυματομορφής στα στοιχεία κύλισης και στους δακτυλίους (θεωρείται ότι δεν αποτελούν τέλειες σφαίρες και τέλειους κύκλους αντίστοιχα, αλλά αντίθετα παρουσιάζουν κυματικές διακυμάνσεις πάνω στις επιφάνειές τους) και από την ύπαρξη υπέρ- ή υπό-διαστασιολογημένων σφαιρών. Συνεπώς η σειρά των κρούσεων διαμορφώνεται τυχαία σε πλάτος. Με βάση τα παραπάνω θεωρείται ότι το πλάτος των κραδασμών που παράγονται δεν είναι σταθερό, αλλά αντίθετα μεταβάλλεται γύρω από την τιμή του δείκτη σημαντικότητας βλάβης d_0 . Πιο συγκεκριμένα θεωρείται ότι ο δείκτης σημαντικότητας

Παράρτημα Α

βλάβης παρουσιάζει μια διακύμανση γύρω από μια μέση τιμή d_0 και ακολουθεί μια κανονική (Gaussian) κατανομή. Τα παραπάνω εκφράζονται μαθηματικά με την σχέση:

$$d(t) = d_0 \cdot \sum_{k=0}^N A_k \cdot \delta(t - k \cdot T_d)$$

όπου A_k είναι το πλάτος της k -οστής κρούσης.



Σχήμα Π. 1-2: Κατανομή ακτινικού φορτίου περιφερειακά του ένσφαιρου τριβέα.

Κατανομή Φορτίου γύρω από την περιφέρεια του ένσφαιρου τριβέα

Η κατανομή φορτίου περιφερειακά του ένσφαιρου τριβέα υπό ακτινική φόρτιση ορίζεται κατά προσέγγιση από την συνάρτηση του Stribeck:

$$q(\theta) = q_0 \cdot \left[1 - \frac{1}{2 \cdot \varepsilon} \cdot (1 - \cos \theta) \right]^n$$

όπου: q_0 είναι η μέγιστη φόρτιση,
 ε είναι ο συντελεστής της κατανομής του φορτίου,
 θ_{\max} η μέγιστη γωνιακή έκταση της περιοχής φόρτισης και
 $n=3/2$ για τριβέα με σφαιρικά στοιχεία, και $10/9$ για τριβέα με κυλινδρικά στοιχεία.

Οι παράμετροι q_0 , ε και θ_{\max} εξαρτώνται από το διάκενο του ένσφαιρου τριβέα και το φορτίο που εφαρμόζεται σε αυτόν. Η κατανομή του φορτίου στην περιφέρεια ενός ένσφαιρου τριβέα με θετικό διάκενο $\varepsilon < 0,5$ και $\theta_{\max} < \pi/2$ παρουσιάζει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα Π.1-2. Εύκολα παρατηρείται από το σχήμα ότι το φορτίο παρουσιάζει μηδενικές τιμές σε μια περιοχή της περιφέρειας του ένσφαιρου τριβέα σε κάθε περιστροφή του. Το διάκενο του ένσφαιρου τριβέα δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την ανάπτυξη του μοντέλου και για αυτόν τον λόγο η παραπάνω θεωρία επεκτείνεται και στην περίπτωση ένσφαιρων τριβέων με μηδενικό ή αρνητικό διάκενο.

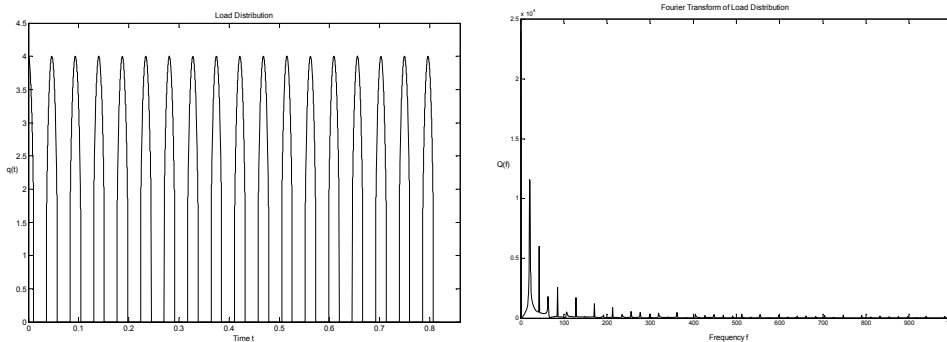
Η συνάρτηση του Stribeck δεν λαμβάνει υπ' όψιν της τις αλλαγές στην κατανομή του φορτίου που οφείλονται στο πλήθος και τη θέση των σφαιρικών στοιχείων κύλισης που βρίσκονται κάθε στιγμή στην περιοχή φόρτισης. Ωστόσο διάφορες μελέτες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι οι διακυμάνσεις της δυσκαμψίας που οφείλονται στην αλλαγή του πλήθους και της θέσης των σφαιρικών στοιχείων κύλισης αποτελούν ποσοστό μικρότερο από 0,5% της συνολικής τιμής ενός δεδομένου φορτίου. Οι μεταβολές αυτές για τους παραπάνω λόγους αγνοούνται κατά την ανάπτυξη του μοντέλου.

Στην περίπτωση που ο εσωτερικός δακτύλιος του ένσφαιρου τριβέα βρίσκεται σε επαφή με έναν άξονα που περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα f_{shaft} , οι στιγμιαίες τιμές του φορτίου σε κάθε σημείο του εσωτερικού δακτυλίου ως συνάρτηση του χρόνου μπορούν να υπολογισθούν με την αντικατάσταση της γωνίας θ από τον όρο $2 \cdot \pi \cdot f_{shaft} \cdot t$ στη σχέση:

$$q(t) = \begin{cases} q_0 \cdot \left[1 - \frac{1}{2 \cdot \varepsilon} \cdot (1 - \cos \theta) \right]^n & \text{για } |\theta| < \theta_{\max} \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases}$$

Διαμόρφωση των κρουστικών παλμών από το φορτίο

Η συνάρτηση $q(t)$ είναι περιοδική καθώς κάθε σημείο του εσωτερικού δακτυλίου του ένσφαιρου τριβέα διασχίζει την ζώνη φόρτισης σε κάθε περιστροφή του άξονα. Στο σχήμα Π. 1-3 παριστάνεται γραφικά η συνάρτηση $q(t)$ με μια σειρά από λοβούς. Η απόσταση μεταξύ των κέντρων των λοβών της κατανομής του φορτίου ισούται με την περίοδο περιστροφής του άξονα T_{shaft} . Στο σχήμα Π. 1-2 της κατανομής του φορτίου γύρω από τον ένσφαιρο τριβέα διακρίνεται η μέγιστη τιμή του φορτίου q_0 την χρονική στιγμή $t=0$ όπου υποτίθεται ότι $\theta=0^\circ$ στην προηγούμενη ενότητα. Στην περίπτωση αυτή, οι δονήσεις διαμορφώνονται κατά πλάτος καθώς το σημείο του εσωτερικού δακτυλίου όπου βρίσκεται το ελάττωμα εισέρχεται και εξέρχεται περιοδικά στη ζώνη φόρτισης.



Σχήμα Π. 1-3: Η κατανομή του φορτίου στον εσωτερικό δακτύλιο του ένσφαιρου τριβέα υπό ακτινική φόρτιση. (α) Χρονικό σήμα, (β) Φάσμα.

Με βάση τα παραπάνω, στην περίπτωση ύπαρξης φθοράς στον εσωτερικό δακτύλιο το πλάτος των παραγόμενων δονήσεων θα δίνεται από τη σχέση:

$$d(t) = q(t) \cdot \sum_{k=0}^N A_k \cdot \delta(t - k \cdot T_d)$$

Εισαγωγή στο μοντέλο του φαινομένου της ολίσθησης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στους ένσφαιρους τριβείς εμφανίζεται κάποια ολίσθηση των στοιχείων κύλισής τους. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι κρούσεις ποτέ να μην

Παράρτημα Α

αναπαράγονται ακριβώς στο ίδιο σημείο κατά την περιστροφή του άξονα. Εξαιτίας της εμφάνισης της ολίσθησης παρουσιάζεται μία χρονική υστέρηση τ_k ανάμεσα σε δύο διαδοχικές κρούσεις. Η χρονική αυτή υστέρηση τ_k θεωρούμε ότι ακολουθεί μια κανονική (gaussian) κατανομή με μέση τιμή την περίοδο T_d . Συνεπώς με βάση τις παραπάνω θεωρήσεις η αλληλουχία των παραγόμενων κρουστικών δονήσεων δίνεται από την σχέση:

$$d(t) = \begin{cases} q(t) \cdot \sum_{k=0}^N A_k \cdot \delta(t - k \cdot T_d - \tau_k) & \text{για Ελάττωμα Εσωτερικού Δακτυλίου} \\ \sum_{k=0}^N A_k \cdot \delta(t - k \cdot T_d - \tau_k) & \text{για Ελάττωμα Εξωτερικού Δακτυλίου} \end{cases}$$

Μετάδοση των κραδασμών στην κατασκευή

Κάθε φορά που η φθαρμένη επιφάνεια έρχεται σε επαφή με κάποια άλλη επιφάνεια του ένσφαιρου τριβέα παράγεται όπως αναλύσαμε παραπάνω κάποιος κρουστικός παλμός, ο οποίος με την σειρά του διεγείρει ιδιοσυχνότητες τόσο της όλης κατασκευής όσο και του ένσφαιρου τριβέα. Μάλιστα, καθώς ο τριβέας περιστρέφεται, ο κρουστικός παλμός εμφανίζεται περιοδικά με μια συχνότητα, η οποία εξαρτάται μεν από την ακριβή θέση εμφάνισης της φθοράς αλλά παράλληλα μεταβάλλεται εξαιτίας της εμφάνισης του φαινομένου της ολίσθησης. Αυτοί οι διαδοχικοί κρουστικοί παλμοί ουσιαστικά αποτελούν την εξωτερική διέγερση του συστήματος – κατασκευής.

Για την ανίχνευση των ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής που διεγείρονται από τα χτυπήματα των σφαιρών πάνω στα σημεία φθοράς χρησιμοποιούνται επιταχυνσιόμετρα, τα οποία τοποθετούνται σε κατάλληλη θέση πάνω στο κέλυφος της μηχανής.

Η απόκριση της κατασκευής στην προαναφερθείσα εξωτερική διέγερση μπορεί να μοντελοποιηθεί με την απόκριση ενός γραμμικού μηχανικού συστήματος ενός βαθμού ελευθερίας. Η απόκριση αυτή μαθηματικά μπορεί να εκφραστεί από την σχέση:

$$s(t) = B \cdot e^{-t/m} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)$$

με
$$m = \frac{Q}{\pi \cdot f_n}, f_0 = f_n \cdot \sqrt{1 - 1/4 \cdot Q^2} \text{ και } Q > 1/2$$

όπου m είναι ο χρόνος απόσβεσης (relaxation time), f_0 είναι η συχνότητα ελεύθερης ταλάντωσης (phase resonance frequency), f_n είναι η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής (free oscillation frequency) και Q είναι ο συντελεστής ποιότητας (crest factor).

Μέχρι σήμερα, τα περισσότερα μοντέλα που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία θεωρούν ότι από τα χτυπήματα διεγείρουν κάθε φορά μία και μόνο ιδιοσυχνότητα και μάλιστα πάντα την ίδια, ενώ παράλληλα υποθέτουν ότι οι κραδασμοί μεταφέρονται διαμέσου της κατασκευής από τον ένσφαιρο τριβέα μέχρι το όργανο μέτρησης ακολουθώντας πάντοτε την ίδια διαδρομή. Οι παραπάνω υποθέσεις περιγράφουν ένα ιδανικό μηχανικό σύστημα και σαφώς απέχουν πολύ από τις πραγματικές συνθήκες. Με βάση τις παραπάνω υποθέσεις αγνοείται πλήρως ότι κατά την λειτουργία του τριβέα για κάποιους λόγους, όπως π.χ. το γεγονός ότι το σημείο φθοράς μετακινείται (εισέρχεται και εξέρχεται) σε σχέση με την ζώνη φόρτισης, ενδέχεται κάθε χτύπημα να διεγείρει όχι μόνο μία αλλά περισσότερες ιδιοσυχνότητες της κατασκευής και όχι απαραίτητως πάντα τις ίδιες. Συνεπώς τα

περισσότερα μοντέλα θεωρούν ότι ο συντελεστής ποιότητας παραμένει σταθερός και λαμβάνει μοναδική τιμή σε κάθε προσομοίωση.

Στο μοντέλο που αναπτύσσεται εδώ, θεωρείται ότι από τα χτυπήματα διεγείρεται ένας πεπερασμένος αριθμός ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής σύμφωνα με μια ελεγχόμενη τυχαιότητα και λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τη θέση στην οποία βρίσκεται το ελάττωμα. Παράλληλα σε ειδικές περιπτώσεις, όπως π.χ. σε περιπτώσεις όπου ανάλογα με την θέση του σημείου φθοράς αλλάζει η διαδρομή διάδοσης και ο κραδασμός διέρχεται από διαφορετικά υλικά κάθε φορά, ο συντελεστής ποιότητας μπορεί να λαμβάνει περισσότερες από μία τιμές. Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω οι σχέσεις 3.39 και 3.40 μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$s(t) = \sum_{i=1}^M B_i \cdot e^{-t/m_i} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_{oi} \cdot t)$$

με
$$m_i = \frac{Q_i}{\pi \cdot f_{ni}}, \quad f_{oi} = f_{ni} \cdot \sqrt{1 - 1/4 \cdot Q_i^2} \quad \text{και} \quad Q_i > 1/2$$

όπου m_i είναι ο χρόνος απόσβεσης, f_{oi} είναι η i -οστή συχνότητα ελεύθερης ταλάντωσης, f_{ni} είναι η i -οστή ιδιοσυχνότητα της κατασκευής, Q_i είναι ο i -οστός συντελεστής ποιότητας και M είναι ο αριθμός των ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής που διεγείρονται από το i -οστό χτύπημα.

Χάριν γενικότητας, στην τελική μαθηματική έκφραση του μοντέλου μας, εισάγουμε έναν επιπλέον παράγοντα $n(t)$. Ο παράγοντας αυτός διαδραματίζει τον ρόλο του μηχανικού “θορύβου” και προστέθηκε με στόχο να ληφθούν υπ’ όψιν η επίδρασή του φαινομένου της ολίσθησης και διάφορες άλλες τυχαίες πηγές δονήσεων που ανήκουν είτε στο σύστημα είτε στο περιβάλλον.

Τελικά με βάση τα παραπάνω το προσομοιωμένο σήμα $x(t)$ που προκύπτει από το προτεινόμενο μοντέλο εκφράζεται μαθηματικά από την σχέση:

$$d(t) = \begin{cases} \sum_{k=0}^N \left[q(t) \cdot A_k \cdot \delta(t - k \cdot T_d - \tau_k) \otimes \sum_{i=1}^M B_i \cdot e^{-t/\tau_i} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_{oi} \cdot t) \right] + n(t), & \text{για } BPF1 \\ \sum_{k=0}^N \left[A_k \cdot \delta(t - k \cdot T_d - \tau_k) \otimes \sum_{i=1}^M B_i \cdot e^{-t/\tau_i} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_{oi} \cdot t) \right] + n(t), & \text{για } BPF0 \end{cases}$$

όπου ο μαθηματικός τελεστής \otimes συμβολίζει την συνέλιξη των δύο συνιστωσών του τελικού σήματος $x(t)$.

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2-1: Τιμές Βέλτιστων ζευγών Κεντρικής Συχνότητας f_C και εύρους f_B που επιλέχθηκαν με βάση τα δέκα (10) κριτήρια για την Περίπτωση I (Υπαρξη φθοράς εξωτερικού δακτυλίου).	70
Πίνακας 2-2: Τιμές Βέλτιστων ζευγών Κεντρικής Συχνότητας f_C και εύρους f_B που επιλέχθηκαν με βάση τα δέκα (10) κριτήρια για την Περίπτωση II (Υπαρξη φθοράς εσωτερικού δακτυλίου).	73
Πίνακας 2-3: Τιμές Βέλτιστων ζευγών Κεντρικής Συχνότητας f_C και εύρους f_B που επιλέχθηκαν με βάση τα δέκα (10) κριτήρια για την Περίπτωση I (Υπαρξη φθοράς εξωτερικού δακτυλίου) με $4xf_{BPFO} \leq f_B \leq 10xf_{BPFO}$	75
Πίνακας 2-4: Τιμές Βέλτιστων ζευγών Κεντρικής Συχνότητας f_C και εύρους f_B που επιλέχθηκαν με βάση τα δέκα (10) κριτήρια για την Περίπτωση II (Υπαρξη φθοράς εσωτερικού δακτυλίου) με $4xf_{BPFI} \leq f_B \leq 10xf_{BPFI}$	75
Πίνακας 3-1: Ιδιοσυχνότητες (Hz) δοκού χωρίς ρωγμή και με μια ανοιχτή ρωγμή, όπως υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο, ένα δισδιάστατο επίπεδης εντατικής κατάστασης και ένα δισδιάστατο επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων.	128
Πίνακας 4-1: Ενεργειακά Χαρακτηριστικά Κραδασμών υπολογισμένα στο πεδίο συχνότητας.	174
Πίνακας 4-2: Ενεργειακά Χαρακτηριστικά Εισόδου υπολογισμένα στο πεδίο συχνότητας (Πίνακας 4-1), όπως χρησιμοποιήθηκαν στα Δύο Στάδια της προτεινόμενης SVMs ταξινόμησης βλάβης.	177
Πίνακας 4-3: Πειραματική Περίπτωση: Δεδομένα και Αποτελέσματα.	179
Πίνακας 4-4: Εύρος τιμών των παραμέτρων του στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης της δυναμικής απόκρισης ένσφαιρων τριβέων.	183
Πίνακας 4-5: Πειραματική Περίπτωση: Διανύσματα υποστήριξης (Support Vectors) του SVM 1.	185
Πίνακας 4-6: Πειραματική Περίπτωση: Διανύσματα υποστήριξης (Support Vectors) του SVM 2.	185
Πίνακας 4-7: Βιομηχανική Περίπτωση I: Διανύσματα Υποστήριξης (Support Vectors) του SVM 1.	191
Πίνακας 4-8: Βιομηχανική Περίπτωση I: Διανύσματα Υποστήριξης (Support Vectors) του SVM 2.	191
Πίνακας 4-9: Βιομηχανική Περίπτωση I: Δεδομένα και Αποτελέσματα.	191

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 4-10: Βιομηχανική Περίπτωση II: Διανύσματα Υποστήριξης (Support Vectors) του SVM1.....	192
Πίνακας 4-11: Βιομηχανική Περίπτωση II: Διανύσματα Υποστήριξης (Support Vectors) του SVM2.....	192
Πίνακας 4-12: Βιομηχανική Περίπτωση II: Δεδομένα και Αποτελέσματα.	192
Πίνακας 4-13: Βιομηχανική Περίπτωση III: Διανύσματα Υποστήριξης (Support Vectors) του SVM1.....	192
Πίνακας 4-14: Βιομηχανική Περίπτωση III: Διανύσματα Υποστήριξης (Support Vectors) του SVM2.....	193
Πίνακας 4-15: Βιομηχανική Περίπτωση III: Δεδομένα και Αποτελέσματα.	193
Πίνακας 4-16: Χαρακτηριστικά Εισόδου.....	200
Πίνακας 4-17: Ταξινόμηση Δεδομένων από τις Μηχανές Διανυσματικής Υποστήριξης.	202

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 2-1: Δυναμική απόκριση του ταλαντωτή Van der Pol για $\omega=1$, $\mu=0.1$, $X_S = \sqrt{2}$ και $\Omega=1.04$: (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα.....	37
Σχήμα 2-2: Δυναμική απόκριση του ταλαντωτή Van der Pol για $\omega=1$, $\mu=0.1$, $X_S = \sqrt{2}$ και $\Omega=1.05$: (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα.....	38
Σχήμα 2-3: Δυναμική απόκριση του ταλαντωτή Van der Pol για $\omega=1$, $\mu=0.1$, $\Omega = \sqrt{2}$ και $X_S=1.25$: (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα.....	40
Σχήμα 2-4: Δυναμική απόκριση του ταλαντωτή Van der Pol για $\omega=1$, $\mu=0.1$, $\Omega = \sqrt{2}$ και $X_S=1.45$: (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα.....	41
Σχήμα 2-5: Σήμα προσομοίωσης της δυναμικής απόκρισης ένσφαιρου τριβέα με βλάβη στον εσωτερικό δακτύλιο: (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα, (ε) Φάσμα της Περιβάλλουσας του σήματος.....	43
Σχήμα 2-6: Σήμα προσομοίωσης της δυναμικής απόκρισης ένσφαιρου τριβέα με βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο: (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα, (ε) Φάσμα της Περιβάλλουσας του σήματος.....	44
Σχήμα 2-7: Σήμα κραδασμών Περίπτωσης I, Σήμα ένσφαιρου τριβέα με βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο: (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα, (ε) Φάσμα της Περιβάλλουσας του σήματος.....	47
Σχήμα 2-8 Σήμα κραδασμών Περίπτωσης II, Σήμα ένσφαιρου τριβέα με βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο: (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα, (ε) Φάσμα της Περιβάλλουσας του σήματος.....	49
Σχήμα 2-9: Σήμα κραδασμών Περίπτωσης III, Σήμα ένσφαιρου τριβέα με βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο: (α) Χρονική κυματομορφή, (β) Φάσμα Συχνοτήτων, (γ) Στιγμιαίο Πλάτος, (δ) Στιγμιαία Συχνότητα, (ε) Φάσμα της Περιβάλλουσας του σήματος.....	50
Σχήμα 2-10: Γραφική Παράσταση της Συνάρτησης Gabor $g(\omega, t_0)$ συναρτήσει της ανεξάρτητης μεταβλητής t για τρεις (3) ριμές της συχνότητας ω	54
Σχήμα 2-11: Γραφική Παράσταση κυματιδιακών συναρτήσεων που αντιστοιχούν σε τρεις (3) διαφορετικές διαφορετικές τιμές της κλίμακας α της ίδιας μητρικής συνάρτησης συναρτήσει της ανεξάρτητης μεταβλητής x	56

Σχήμα 2-12: Χρονικές κυματομορφές σημάτων κραδασμών Περίπτωσης I (Υπαρξης σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου): (α) 1 ^η Μέτρηση, (β) 2 ^η Μέτρηση.....	76
Σχήμα 2-13: Φάσματα σημάτων κραδασμών Περίπτωσης I (Υπαρξης σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου): (α) 1 ^η Μέτρηση, (β) 2 ^η Μέτρηση.....	76
Σχήμα 2-14: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2xf_{BPFO}, 10xf_{BPFO}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).....	77
Σχήμα 2-15: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2xf_{BPFO}, 10xf_{BPFO}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).....	80
Σχήμα 2-16: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 2 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2xf_{BPFO}, 10xf_{BPFO}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).....	83
Σχήμα 2-17: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 2 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2xf_{BPFO}, 10xf_{BPFO}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).....	86
Σχήμα 2-18: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[4xf_{BPFO}, 10xf_{BPFO}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).....	89
Σχήμα 2-19: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση I (Υπαρξη σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[4xf_{BPFO}, 10xf_{BPFO}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται).....	92
Σχήμα 2-20: Χρονικές κυματομορφές σημάτων κραδασμών Περίπτωσης II (Υπαρξης σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου): (α) 1 ^η Μέτρηση, (β) 2 ^η Μέτρηση.....	95

- Σχήμα 2-21: Φάσματα σημάτων κραδασμών Περίπτωσης II (Υπαρξης σφάλματος εξωτερικού δακτυλίου): (α) 1^η Μέτρηση, (β) 2^η Μέτρηση..... 95
- Σχήμα 2-22: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται)..... 96
- Σχήμα 2-23: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται)..... 99
- Σχήμα 2-24: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 2 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται)..... 102
- Σχήμα 2-25: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 2 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[2x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται). 105
- Σχήμα 2-26: Περιβάλλουσες του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[4x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται)..... 108
- Σχήμα 2-27: Φάσματα Περιβαλλουσών του σήματος κραδασμών της Μέτρησης 1 στην περίπτωση II (Υπαρξη σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κριτηρίων με αναζήτηση τιμών παραμέτρων στο διάστημα $[4x_{f_{BPFO}}, 10x_{f_{BPFO}}]$: (α) Μεγιστοποίηση Δείκτη Κορυφής (Crest Factor), (β) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Shannon (Shannon Entropy), (γ) Ελαχιστοποίηση Εντροπίας Rényi (Rényi Entropy), (δ) Μεγιστοποίηση Κύρτωσης (Kurtosis) (συνεχίζεται)..... 111
- Σχήμα 3-1: Μορφολογική επεξεργασία ενός συνόλου A (αρχικό αντικείμενο) από ένα σύνολο B (δομικό στοιχείο). Τα δύο σύνολα ορίζονται στο καρτεσιανό επίπεδο και τα στοιχεία τους λαμβάνουν τιμές 1 ή 0. 122

Σχήμα 3-2: Γραφική παράσταση (α) της Διατομής (cross section) $X_t(f)$ και (β) της Umbra $U(f)$ της συνάρτησης $f(x)$.	123
Σχήμα 3-3: Εφαρμογή των τεσσάρων βασικών μορφολογικών λειτουργιών σε μια διαμορφωμένη κατά πλάτος και κατά συχνότητα συνάρτηση, με χρήση επίπεδου δομικού στοιχείου. Η διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζει το αρχικό σήμα και η συνεχής γραμμή παρουσιάζει το σήμα μετά την μορφολογική επεξεργασία α) Διάβρωση, β) Διαστολή, γ) Άνοιγμα, δ) Κλείσιμο.	126
Σχήμα 3-4: Μοντέλα Πεπερασμένων Στοιχείων: (α) Πλήρης Όψη του 3D μοντέλου και (β) Zoom του 3D μοντέλου στην περιοχή της ρωγμής.	128
Σχήμα 3-5: Κατακόρυφες μετατοπίσεις στο ελεύθερο άκρο πρόβολου δοκού που παρουσιάζει μια “αναπνέουσα” ρωγμή, χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο, ένα δισδιάστατο επίπεδης εντατικής κατάστασης και ένα δισδιάστατο επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων.	129
Σχήμα 3-6: Ορθοκανονικές Μορφές για πρόβολο δοκό με θέση ρωγμή στα 60 mm και σχετικό βάθος ρωγμής 20%.	130
Σχήμα 3-7: Μορφολογικοί Τελεστές (Διάβρωση (Erosion), Διαστολή (Dilation), Κλείσιμο (Closing), Άνοιγμα (Opening)) χρησιμοποιώντας το P.O.M. 1 και ένα επίπεδο δομικό στοιχείο.	131
Σχήμα 3-8: Μορφολογικοί Τελεστές (Διάβρωση (Erosion), Διαστολή (Dilation), Κλείσιμο (Closing), Άνοιγμα (Opening)) χρησιμοποιώντας το P.O.M. 1 και ένα καμπύλο (spline) δομικό στοιχείο. Πρόβολος Δοκός, Θέση ρωγμής στα 60 mm, 60% Σχετικό βάθος ρωγμής και ANL=0%.	132
Σχήμα 3-9: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M. 1 με σχετικό βάθος ρωγμής 10%, ANL=0%, πρόβολος δοκός και (α) Θέση ρωγμής στα 60 mm (Αριστερά), (β) Θέση ρωγμής στα 240 mm (Δεξιά).	133
Σχήμα 3-10: Εξέλιξη (α) Μορφολογικού Δείκτη (Διάβρωση), (β) Πρώτης Μοναδιαίας Τιμής για τρεις (3) διαφορετικές θέσεις ρωγμής και πέντε (5) διαφορετικά βάθη ρωγμής. (ANL=0%, πρόβολος δοκός).	134
Σχήμα 3-11: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με ίσα σχετικά βάθη ρωγμής 10%, ANL=0%, πρόβολος δοκός και (α) Θέσεις ρωγμών στα 50 mm και 60 mm (Αριστερά), (β) Θέσεις ρωγμών στα 230 mm και 240 mm (Δεξιά).	134
Σχήμα 3-12: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με σχετικό βάθος ρωγμής 10%, ANL=30%, πρόβολος δοκός και (α) Θέση ρωγμής στα 60 mm (Αριστερά), (β) Θέση ρωγμής στα 150mm (Δεξιά).	135
Σχήμα 3-13: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με θέση ρωγμής στα 240 mm, ANL=30%, πρόβολος δοκός και (α) Σχετικό βάθος ρωγμής 20% (Αριστερά), (β) Σχετικό βάθος ρωγμής 40% (Δεξιά).	136
Σχήμα 3-14: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.3 με θέση ρωγμής στα 240 mm, ANL=30%, πρόβολος δοκός και (α) Σχετικό βάθος ρωγμής 20% (Αριστερά), (β) Σχετικό βάθος ρωγμής 40% (Δεξιά).	136

Σχήμα 3-15: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) με θέση ρωγμής στα 240 mm, σχετικό βάθος ρωγμής 10% και ANL=30%, πρόβολος δοκός, χρησιμοποιώντας το (α) P.O.M. 1 (Αριστερά), (β) P.O.M. 3 (Δεξιά).....	136
Σχήμα 3-16: Εξέλιξη του Μορφολογικού Δείκτη (Διάβρωση) για τρεις (3) διαφορετικές θέσεις και πέντε (5) διαφορετικά σχετικά βάθη ρωγμής (ANL=30%, πρόβολος δοκός).....	137
Σχήμα 3-17: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με θέσεις ρωγμής στα 60 mm και 120 mm, ANL=30%, πρόβολος δοκός, με σχετικά βάθη ρωγμών: (α) 5% και 10% (Αριστερά), (β) 10% και 5% (Δεξιά).....	137
Σχήμα 3-18: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με θέσεις ρωγμής στα 60 mm και 240 mm, ANL=20%, πρόβολος δοκός και με σχετικά βάθη ρωγμών: (α) 10% και 5% (Αριστερά), (β) 5% και 10% (Δεξιά).....	137
Σχήμα 3-19: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με θέσεις ρωγμής στα 60 mm και 240 mm, ANL=30%, πρόβολος δοκός και με σχετικά βάθη ρωγμών: (α) 10% και 5% (Αριστερά), (β) 5% και 10% (Δεξιά).....	138
Σχήμα 3-20: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με θέσεις ρωγμής στα 60 mm και 120 mm, ίσα σχετικά βάθη ρωγμών 10%, ANL = 0%, πρόβολος δοκός, μήκος δομικού στοιχείου ίσο με L/100 και αριθμός χρησιμοποιούμενων μετρούμενων σημείων: (α) M=101 σημεία (Αριστερά), (β) M= 51 σημεία (Δεξιά).....	138
Σχήμα 3-21: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M. 1 με σχετικό βάθος ρωγμής 10%, ANL=0%, αμφιέριστη δοκό και (α) Θέση ρωγμής στα 60 mm (Αριστερά), (β) Θέση ρωγμής στα 150 mm (Δεξιά).....	139
Σχήμα 3-22: Εξέλιξη του Μορφολογικού Δείκτη (Διάβρωση) σε δύο (2) διαφορετικές θέσεις και έξι (6) διαφορετικά σχετικά βάθη (ANL=0%, αμφιέριστη δοκός).....	140
Σχήμα 3-23: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 για δύο ρωγμές με θέσεις ρωγμής στα 50 mm και 60 mm, ANL=0%, αμφιέριστη δοκός, με διάφορα σχετικά βάθη ρωγμών.....	140
Σχήμα 3-24: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 για δύο ρωγμές με θέσεις ρωγμής στα 140 mm και 150 mm, ANL=0%, αμφιέριστη δοκός, με διάφορα σχετικά βάθη ρωγμών.....	141
Σχήμα 3-25: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με σχετικό βάθος ρωγμής 10%, ANL=30%, αμφιέριστη δοκό και Θέση ρωγμής στα (α) 60 mm (Αριστερά), (β) 150mm (Δεξιά).....	142
Σχήμα 3-26: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με θέση ρωγμής στα 60 mm, ANL=30%, αμφιέριστη δοκός και σχετικό βάθος ρωγμής (α) 20% (Αριστερά), (β) 40% (Δεξιά).....	142
Σχήμα 3-27: Εξέλιξη του Μορφολογικού Δείκτη (Διάβρωση) σε δύο (2) διαφορετικές θέσεις και έξι (6) διαφορετικά σχετικά βάθη (ANL=30%, αμφιέριστη δοκός).....	142
Σχήμα 3-28: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 για δύο ρωγμές με θέσεις στα 50 mm και 60 mm, ANL=30%, αμφιέριστη δοκός, με διάφορα σχετικά βάθη ρωγμών.....	143

Σχήμα 3-29: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 για δύο ρωγμές με θέσεις στα 140 mm και 150 mm, ANL=30%, αμφιέριστη δοκός, με διάφορα σχετικά βάθη ρωγμών.	143
Σχήμα 3-30: Μορφολογικός Δείκτης (Διάβρωση) χρησιμοποιώντας το P.O.M.1 με θέση ρωγμής στα 60 mm για σχετικό βάθος ρωγμής 10%, ANL=0%, αμφιέριστη δοκός, μήκος του δομικού στοιχείου ίσο με L/100 και αριθμό χρησιμοποιούμενων μετρούμενων σημείων (α) M=101 σημεία (Αριστερά), (β) M= 51 σημεία (Δεξιά).	144
Σχήμα 4-1: Διάσταση VC	150
Σχήμα 4-2: Σφάλματα Μοντελοποίησης	152
Σχήμα 4-3: Γραμμικά Υπερεπίπεδα Διαχωρισμού για την διαχωρίσιμη περίπτωση. Οι Μηχανές Υποστήριξη είναι κυκλωμένες	155
Σχήμα 4-4: Γραμμικά Υπερεπίπεδα Διαχωρισμού για την μη διαχωρίσιμη περίπτωση.	159
Σχήμα 4-5: Μη γραμμικός διαχωρισμός στο Χώρο Εισόδου και στο Χώρο Χαρακτηριστικών.....	161
Σχήμα 4-6: Διάγραμμα του Συστήματος Διάγνωσης Βλαβών Πολλαπλών Τάξεων....	176
Σχήμα 4-7: Πειραματική Κλίνη Δοκιμών.....	178
Σχήμα 4-8: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα αρχικών σημάτων υπό καλή λειτουργία. (α) EM1 και (β) EM2.	179
Σχήμα 4-9: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα Περιβάλλουσας σημάτων υπό καλή λειτουργία. (α) EM1 and (β) EM2.	180
Σχήμα 4-10: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα σημάτων με φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα. (α) EM12 and (β) EM13.	180
Σχήμα 4-11: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα Περιβάλλουσας σημάτων με φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα. (α) EM12 and (β) EM13.	181
Σχήμα 4-12: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα σημάτων με φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα. (α) EM4 and (β) EM5.	181
Σχήμα 4-13: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα Περιβάλλουσας σημάτων με φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα. (α) EM4 and (β) EM5.....	182
Σχήμα 4-14: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα Περιβάλλουσας σημάτων προσομοιωμένων σημάτων υπό καλή. (α) Amp 10 Gs, Noise level 0.01%, (β) Amp 20 Gs, NL 1%.....	183
Σχήμα 4-15: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα Περιβάλλουσας προσομοιωμένων σημάτων με φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα. Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 2000 (α) slip up to 0.88%, (β) slip up to 1.75%.....	184
Σχήμα 4-16: Πειραματική Περίπτωση: Φάσματα Περιβάλλουσας σημάτων με φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο ένσφαιρου τριβέα. Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 2000 (α) slip up to 1.35%, (β) slip up to 1.5%.....	184
Σχήμα 4-17: Βιομηχανική Περίπτωση I: Φάσματα Σημάτων.	187
Σχήμα 4-18: Βιομηχανική Περίπτωση I: Φάσματα Αποδιαμορφωμένων Σημάτων. ...	188
Σχήμα 4-19: Βιομηχανική Περίπτωση II: Φάσματα Σημάτων.	188
Σχήμα 4-20: Βιομηχανική Περίπτωση II: Φάσματα Αποδιαμορφωμένων Σημάτων... ..	189
Σχήμα 4-21: Βιομηχανική Περίπτωση III: Φάσματα Σημάτων.....	189

Σχήμα 4-22: Βιομηχανική Περίπτωση III: Φάσματα Αποδιαμορφωμένων Σημάτων.	190
Σχήμα 4-23: Βιομηχανική Περίπτωση I: Φάσματα Προσομοιωμένων Σημάτων, (α) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700 slip up to 1.13%, (β) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700 slip up to 1.75%, (γ) NL 1%.	193
Σχήμα 4-24: Βιομηχανική Περίπτωση I: Φάσματα Περιβάλλουσας προσομοιωμένων σημάτων, (α) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700 slip up to 1.13%, (β) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700 slip up to 1.75%, (γ) NL 1%.	194
Σχήμα 4-25: Βιομηχανική Περίπτωση II: Φάσματα προσομοιωμένων σημάτων, (α) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700 slip up to 1.64%, (β) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700 slip up to 2.32%, (γ) NL 1%.	194
Σχήμα 4-26: Βιομηχανική Περίπτωση II: Φάσματα Περιβάλλουσας προσομοιωμένων σημάτων, (α) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700, slip up to 1.64%, (β) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700, slip up to 2.32%, (γ) NL 1%.	195
Σχήμα 4-27: Βιομηχανική Περίπτωση III: Φάσματα προσομοιωμένων σημάτων, (α) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 2200 slip up to 2.22%, (β) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700 slip up to 2.94%, (γ) NL 1%.	195
Σχήμα 4-28: Βιομηχανική Περίπτωση III: Φάσματα Αποδιαμορφωμένων Προσομοιωμένων Σημάτων, (α) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 2200, slip up to 2.22%, (β) Amp 10 Gs, NL 1%, Natural freq. 1700, slip up to 2.94%, (γ) NL 1%.	196
Σχήμα 4-29: Βιομηχανική Εγκατάσταση.	197
Σχήμα 4-30: Σταδιακός Αλγόριθμος.	200
Σχήμα 4-31: Απευθείας Αλγόριθμος.	201