

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Αυτομάτου Ελέγχου και Στοιχείων Μηχανών

Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ
ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ**

ΜΑΡΙΑ ΚΟΥΤΣΟΥΔΑΚΗ

Αρ. Μητρώου 02104696

Επιβλέπων: Καθηγητής ΙΩΑΝΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2014

Πίνακας Περιεχομένων

• Ευχαριστίες.....	4
• Περίληψη.....	5
1. Εισαγωγή.....	7
1.1 Ιστορικό της ανίχνευσης σφαλμάτων.....	7
1.2 Συντήρησα βάσει κατάστασης (Condition-Based Monitoring, CBM).....	9
1.3 Κρίσιμη ανάλυση ανίχνευσης σφαλμάτων.....	9
1.4 Επισκόπηση βιομηχανικών πρακτικών στην ανίχνευση σφαλμάτων σε ρουλεμάν..	10
2. Θεωρητικό μέρος	12
2.1 Μορφολογική ανάλυση.....	12
2.2 Ανάλυση κυματιδίων.....	16
2.2.1 Ο μετασχηματισμός κυματιδίου (WT).....	16
2.2.2 Το κυματίδιο.....	19
2.2.3 Ορισμός του συνεχή μετασχηματισμού κυματιδίου.....	20
2.2.4 Μιγαδικά κυματίδια: Κυματίδιο Morlet.....	22
2.3 Complex Shift Morlet Wavelet (CSMW).....	25
2.4 Στατιστικά μοντέλα.....	28
2.4.1 Τα στατιστικά μοντέλα στον έλεγχο δεδομένων.....	28
2.4.2 Μέθοδος X_{bar}	29
2.4.3 Μέθοδος X_{EWMA}	30
3. Περιγραφή μεθόδου.....	32
3.1 Εξαγωγή χαρακτηριστικών παραμέτρων.....	32
3.2 Εκπαίδευση του συστήματος κι εντοπισμός βλάβης.....	35
4. Πειραματική εφαρμογή.....	37
4.1 Περιγραφή του πειράματος.....	37
4.1.1 Εγκατάσταση.....	37
4.1.2 Μετρήσεις.....	37
4.2 Μελέτη σημάτων.....	38
4.3 Εντοπισμός βασικών συχνοτήτων βλάβης.....	52
4.4 Υπολογισμός παραμέτρων.....	57
4.5 Εκπαίδευση του συστήματος κι ανίχνευση μη ομαλής λειτουργίας μηχανής.....	63
4.5.1 Εκπαίδευση.....	63
4.5.2 Εντοπισμός σφάλματος.....	69
4.5.3 Σύγκριση του Singular Value με τις κλασικές μεθόδους.....	75
4.6 Ταξινόμηση βλάβης με βάση το Singular Value.....	76
4.6.1 Ταξινόμηση βλάβης του σετ 1.....	76
4.6.2 Ταξινόμηση βλάβης του σετ 2.....	77
• Βιβλιογραφία.....	78

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή Δρ. Ι. Αντωνιάδη για την καθοδήγηση και συμβολή του στον καθορισμό και την υλοποίηση των κατευθύνσεων της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ θερμά το μέλος του Εργαστηρίου Δυναμικής και Κατασκευών και υπάλληλο ΙΔΑΧ του Ε.Μ.Π., Δρ. Χ. Γιακόπουλο, τόσο για την πολύτιμη βοήθεια, επικοινωνιακή συνεργασία και κρίσιμες συμβουλές του όσο και για την αμέριστη συμπαράσταση κι ενδιαφέρον που επέδειξε, χωρίς τα οποία η εκπόνηση και ολοκλήρωση της παρούσης εργασίας θα ήταν ιδιαίτερα δυσχερείς.

Περίληψη

Οι ένσφαιροι τριβείς αποτελούν ένα από τα πλέον χρησιμοποιούμενα στοιχεία μηχανών στην βιομηχανία. Γενικά, επειδή οι ένσφαιροι τριβείς παράγουν ιδιαίτερα φάσματα βλάβης, γίνονται συχνά ο στόχος της παρακολούθησης της μηχανής. Η ικανότητα να ανιχνεύεται γρήγορα, εύκολα και με ακρίβεια ένα σφάλμα μίας εγκατάστασης κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της είναι άκρως σημαντική, καθώς μία ξαφνική αστοχία μπορεί να οδηγήσει σε απαράδεκτα χρονοβόρες παύσεις λειτουργίας για συντήρηση. Για αυτόν τον λόγο, έχει αναπτυχθεί μία πληθώρα από μεθόδους ανίχνευσης σφαλμάτων με στόχο τη μείωση του κόστους συντήρησης και την πρόληψη προβλημάτων κι αστοχιών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της μηχανής. Παράλληλα, το γεγονός ότι οι παραδοσιακές μέθοδοι πρόβλεψης έχουν ως προαπαιτούμενο, σημαντικού βαθμού τεχνογνωσία, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μίας πληθώρας μεθόδων για αυτόματη ανίχνευση βλαβών βασισμένες σε έξυπνα συστήματα (intelligent systems).

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται μία μέθοδος εντοπισμού βλαβών ρουλεμάν και ταξινόμησης τους. Το προτινόμενο πλαίσιο περιλαμβάνει δύο πρωταρχικά μέρη: 1) Την εξαγωγή παραμέτρων και 2) την ανίχνευση μη ομαλής συμπεριφοράς και ταξινόμησης της βλάβης. Το δεύτερο μέρος με τη σειρά του, επίσης αποτελείται από δύο μέρη: 2α) Την σε μη πραγματικό χρόνο εκπαίδευση του συστήματος (offline) και 2β) την σε πραγματικό χρόνο (online) επαλήθευση της εκπαίδευσης του συστήματος κι ενημέρωσής του.

Το πρώτο βήμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι το μορφολογικό φιλτράρισμα του καταγεγραμμένου από τα επιταχυνσιόμετρα σήματος μέσω ενός επίπεδου δομικού στοιχείου. Για να γίνει αυτό, πρέπει να είναι γνωστές οι εξής συχνότητες: Οι θεωρητικές συχνότητες βλάβης εσωτερικού κι εξωτερικού δακτυλίου των ρουλεμάν, η συχνότητα περιστροφής του άξονα κι η συχνότητα δειγματοληψίας, οι οποίες εισάγονται ως δεδομένα στον αλγόριθμο της μορφολογικής ανάλυσης. Το μήκος του δομικού στοιχείου υπολογίζεται εφαρμόζοντας το κριτήριο κύρτωσης για την πιο σύντομη περίοδο κρουστικού παλμού των βλαβών σε εσωτερικό κι εξωτερικό δακτύλιο ρουλεμάν. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει μεγάλη διαγνωστική δυνατότητα καθώς συμπυκνώνει τις χρήσιμες πληροφορίες σε ένα ορισμένο πεδίο χαμηλών συχνοτήτων.

Στο επόμενο βήμα, υπολογίζονται οι δύο πραγματικές συχνότητες βλάβης με την εξής τεχνική: Ένα παράθυρο Morlet κινείται κατά τον οριζόντιο άξονα του φάσματος, μέσα στα δύο προκαθορισμένα πεδία που ορίζονται από ένα εύρος 20 Hz με κέντρο τις θεωρητικές συχνότητες βλάβης ($BPF0^{TH} \pm 10Hz$ και $BPF1^{TH} \pm 10Hz$). Ο μέγιστος μέσος όρος των ιδιόμορφων τιμών (Singular Value) των δύο πεδίων θεωρείται ότι εμφανίζεται στις πραγματικές συχνότητες βλάβης ($BPF0^M$ και $BPF1^M$ αντίστοιχα). Μόλις αυτό το βήμα ολοκληρωθεί, μπορούν πλέον να υπολογιστούν κι οι αρμονικές τους που δεν ξεπερνούν τα 1000Hz, καθώς κι οι δύο πρώτες αρμονικές της συχνότητας περιστροφής του άξονα.

Αυτές οι συχνότητες χρησιμοποιούνται ως κέντρα των παραθύρων Morlet σε μία μέθοδο υπολογισμού στιγμιαίων συχνοτήτων που φέρει τα πλεονεκτήματα του Complex Shift Morlet Wavelet (CSMW). Έτσι, εφαρμόζεται πάνω στο φάσμα μία συστάδα παραθύρων Morlet αριθμού ίσου με τον αριθμό των βασικών συχνοτήτων και των αρμονικών τους.

Τα μη μηδενικά Singular Value του προβλήματος της διάσπασης/αποσύνθεσης των Singular Value (Singular Value Decomposition, SVD) αντιστοιχούν στις βασικές συχνότητες και τις αρμονικές τους και δίνουν πολύ σημαντικές διαγνωστικές πληροφορίες. Αυτά τα Singular Value προτείνονται ως τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν καλύτερα την υγεία των ρουλεμάν. Για αυτόν τον λόγο, λαμβάνονται υπόψη όλα τα Singular Value, ολικά κι επιμέρους: α) Τα τοπικά Singular Value που αντιστοιχούν στις βασικές συχνότητες και τις αρμονικές τους, β) τα αθροιστικά Singular Value που αντιστοιχούν στις βλάβες εσωτερικού ή εξωτερικού δακτυλίου ρουλεμάν και γ) τα ολικά Singular Value που αντιστοιχούν στην καθολική υγεία του ρουλεμάν.

Σ' αυτό το βήμα, εισάγεται μία συστημική προσέγγιση ανίχνευσης σφάλματος βασισμένη σε στατιστικά μοντέλα διαγραμμάτων ελέγχου. Κατά τη διάρκεια της offline εκπαίδευσης, και με βάση τα διαγράμματα ελέγχου, τα εξαχθέντα χαρακτηριστικά εκπαιδεύουν το σύστημα ώστε να υπολογιστεί το ανώτατο όριο ελέγχου, UCL. Μετά την ολοκλήρωση της εκπαίδευσης, το UCL θεωρείται πλέον το όριο ανάμεσα στην υγιή ή όχι κατάσταση λειτουργίας.

Στη φάση της online επαλήθευσης κι ενημέρωσης, η καινοτόμος μέθοδος εξαγωγής χαρακτηριστικών χρησιμοποιείται για να υπολογιστούν τα Singular Value των υπό εξέταση τροποποιημένων σήματος. Το εκπαιδευμένο μοντέλο διαγραμμάτων ελέγχου ενεργοποιείται για να εξετάσει την νέα στατιστική τιμή που

έχει προκύψει βάσει του νέου Singular Value. Μία υπό εξέταση τιμή που βρίσκεται μέσα στο όριο UCL θεωρείται κανονική κι ως αποτέλεσμα, η μηχανή από την οποία καταγράφηκε το αρχικό σήμα θεωρείται ότι λειτουργεί καλώς. Σ' αυτήν την περίπτωση, η νέα στατιστική τιμή θα χρησιμοποιηθεί για να επανυπολογιστεί το όριο UCL. Οπότε, αν θεωρηθεί ότι δεν υπάρχει βλάβη, τα υπόλοιπα μέρη του προτεινόμενου πλαισίου δεν λαμβάνουν χώρα. Αν αντίθετα, η τιμή είναι εκτός ορίου, θα θεωρηθεί ότι υπάρχει βλάβη και θα γίνει ταξινόμηση της βλάβης σύμφωνα με το προτεινόμενο πλαίσιο.

Για να είναι δυνατόν να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου ανίχνευσης βλάβης σε ρουλεμάν, εξετάζονται δύο περιπτώσεις με διαφορετικού τύπου βλάβες στα ρουλεμάν. Τα δεδομένα πάνω στα οποία έγινε αυτή η εργασία, είναι διαθέσιμα στο Prognostics Center Excellence (<http://ti.arc.nasa.gov/project/prognostic-data-repository>).

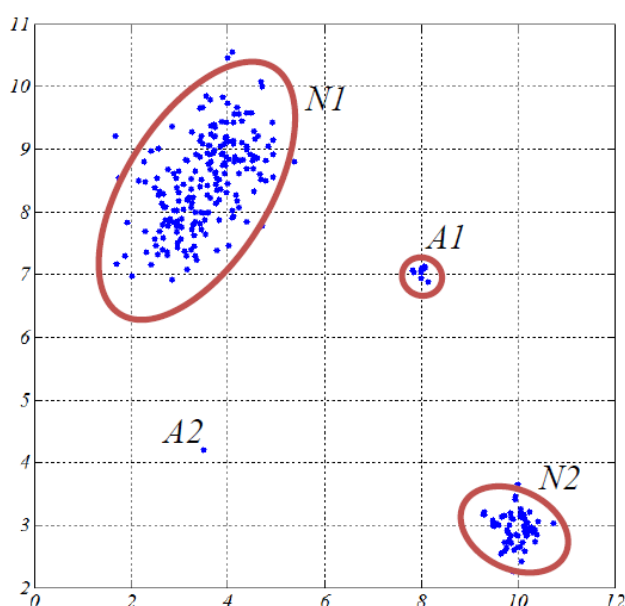
Τελικά, τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος όχι μόνο ανιχνεύει σφάλματα σε πρώιμα στάδια, αλλά παρέχει και την δυνατότητα ταξινόμησης της βλάβης, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους.

1 Εισαγωγή

Η ανίχνευση σφάλματος αποτελεί ένα σημαντικό ερευνητικό πρόβλημα ήδη από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα. Το 'σφάλμα' ορίζεται ως η απόκλιση από μία σαφώς ορισμένη ως κανονική συμπεριφορά. Μερικές φορές αυτές οι αποκλίσεις ονομάζονται έκτοπα ή εξαιρέσεις. Η 'ανίχνευση' σφαλμάτων αναφέρεται στον εντοπισμό απροσδόκητης συμπεριφοράς ή στην εύρεση μοντέλων που δεν συνάδουν με τυπικές λειτουργίες. Η ανίχνευση σφαλμάτων εκτείνεται σε πεδία όπως ο εντοπισμός απάτης, η ασφάλεια δικτύων κι η παρακολούθηση κατάστασης μηχανών κι ήδη χρησιμοποιείται εκτεταμένα. Η ανίχνευση σφαλμάτων είναι σημαντική καθώς οι αποκλίσεις είναι συνήθως στατιστικά αξιόλογες. Ο εντοπισμός παράτυπης συμπεριφοράς είναι καθοριστικής σημασίας είτε πρόκειται για ασυνήθεις μεγάλους κόστους συναλλαγές με πιστωτική κάρτα, είτε για ακανόνιστο μοντέλο δρομολόγησης ηλεκτρονικού δικτύου, είτε για ανωμαλίες σε ιατρικές απεικονίσεις, είτε για λανθασμένα δεδομένα αισθητήρων. Ένα ανώμαλο σήμα ηλεκτροκαρδιογραφήματος (ΗΚΓ) θα μπορούσε να αποτελέσει ένδειξη καρδιακής ανεπάρκειας. Ασυνήθιστες συναλλαγές με πιστωτική κάρτα υποδεικνύουν πιθανότητα κλοπής της. Σε κάθε περίπτωση, οι αποκλίσεις είναι σημαντικές και χρειάζονται άμεση επέμβαση.

1.1 Ιστορικό της ανίχνευσης σφαλμάτων

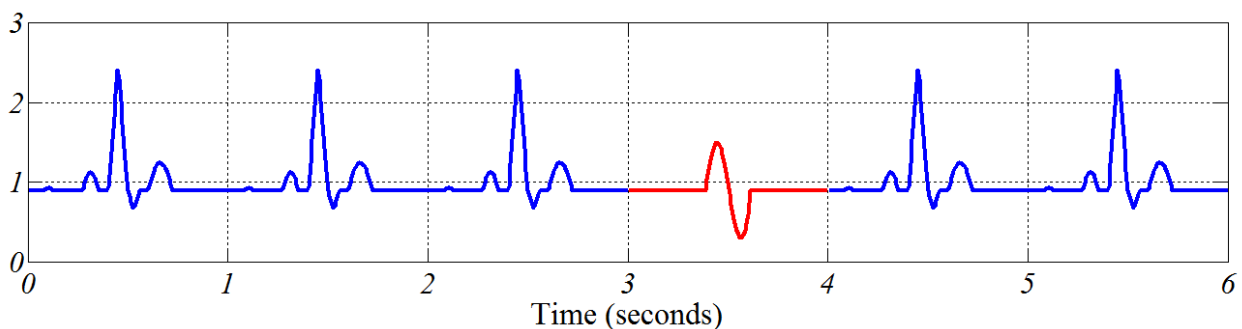
Διάφορες τεχνικές ανίχνευσης σφαλμάτων είναι διαθέσιμες για ποικίλες καταστάσεις και σχεδόν σε κάθε τομέα. Στο Σχ. 1.1 παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα διδιάστατων δεδομένων τα οποία περιέχουν αποκλίσεις. Το συγκεκριμένο σετ δεδομένων ορίζει δύο κανονικές περιοχές, τις N_1 και N_2 . Τα περισσότερα δεδομένα βρίσκονται μέσα στις κανονικές αυτές περιοχές. Οι περιοχές A_1 κι A_2 υποδηλώνουν ότι τα σημεία εντός αυτών είναι μη φυσιολογικά λόγω του γεγονότος ότι είναι σημαντικά απομακρυσμένα από τις κανονικές περιοχές. Ενώ, το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι ένα βασικό παράδειγμα που δείχνει πως μπορούν οπτικά να ξεχωρίσουν τα κανονικά δεδομένα σε σχέση με αυτά που αποκλίνουν, ωστόσο ο ορισμός των κανονικών περιοχών και των περιοχών απόκλισης μπορεί να είναι δύσκολος. Το ακριβές όριο διαχωρισμού φυσιολογικών δεδομένων από τα δεδομένα απόκλισης ορίζεται σε πολλές περιπτώσεις από το χρήστη και είναι εξειδικευμένο στον τύπο της εφαρμογής.



Σχ. 1.1: Παράδειγμα σφαλμάτων σε ένα σετ δεδομένων δύο διαστάσεων

Γενικά, η ανίχνευση σφάλματος βασίζεται σε εκτίμηση της μηχανικής μάθησης (machine learning) όταν εφαρμόζεται σε πραγματικά προβλήματα. Η μηχανική μάθηση είναι η ικανότητα ενός προγράμματος να βελτιώνει την απόδοσή του με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η βελτίωση μπορεί να προκύψει σε δύο τύπους περιβάλλοντων μάθησης (learning environment). Οι επιβλεπόμενες μέθοδοι εκμάθησης είναι διαθέσιμες όταν ήδη είναι γνωστό ένα σετ δεδομένων χωρίς σφάλματα. Όσο περισσότερα σετ τέτοιων (φυσιολογικών) δεδομένων είναι διαθέσιμα, τόσο βελτιώνεται η επίδοση της ανίχνευσης. Οι μη επιβλεπόμενες μέθοδοι εκμάθησης, ωστόσο, είναι απαραίτητες σε εφαρμογές όπου δεν υπάρχουν σημεία αναφοράς ή γνωστές από πριν περιοχές φυσιολογικής συμπεριφοράς. Και στις δύο προσεγγίσεις, οι βασικές μέθοδοι απαιτούν εκ των προτέρων παραδοχές για ξεχωρίσουν μη φυσιολογικές συμπεριφορές σε μετέπειτα παρατηρήσεις. Συνήθως, η παραδοχή είναι ότι οι μη φυσιολογικές συμπεριφορές δεν εμφανίζονται στα περισσότερα δεδομένα. Γενικά, αν μία άγνωστη κατανομή z των δεδομένων με μία εξαρτημένη από τις διαστάσεις πυκνότητα d εμφανιστεί στην εισαγωγή του συνόλου Z που αφορά την κατανομή του μ στο Z , οι μη φυσιολογικές συμπεριφορές εμφανίζονται όπου ισχύει η ανισότητα $d(z) > \rho$, όπου το ρ είναι ένα σταθερό οριακό επίπεδο που βασίζεται στο μ . Ένα σετ $\{z < \rho\}$ ορίζει τις φυσιολογικές παρατηρήσεις. Χρησιμοποιώντας ένα προσομοιωμένο σήμα ΗΚΓ (Σχ. 1.2) ένας μη φυσιολογικός καρδιακός χτύπος διακρίνεται σαφώς σε $t=3$ sec. Τρεις φυσιολογικοί καρδιακοί χτύποι εμφανίζονται από το πρώτο έως το τρίτο δευτερόλεπτο. Πολλές φορές η ανίχνευση μη φυσιολογικών δεδομένων εμφανίζεται σε υποομάδες ή παράθυρα όπου οι μεταβάσεις προκύπτουν φυσικά. Εδώ το μήκος ενός καρδιακού παλμού είναι σύνηθες για μήκος ΗΚΓ παραθύρου. Μέρη της πυκνότητας του σήματος $d(z)$ όπου το z είναι κάθε επιμέρους παράθυρο καρδιακών παλμών που εκτείνεται πέρα από τα ορισμένα από τον χρήστη όρια ρ είναι μη φυσιολογικά (τα οποία και περιγράφουν τον τέταρτο παλμό). Πυκνότητα παραθύρου χαμηλότερη από το όριο υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει μη ομαλή δραστηριότητα.

Πολλές πρακτικές εντοπισμού σφαλμάτων μπορούν να ανιχνεύσουν τον μη συνήθη παλμό του παραπάνω παραδείγματος. Ωστόσο, ο τομέας έρευνας, η φύση κι η διαθεσιμότητα των δεδομένων και διάφοροι περιορισμοί κι απαιτήσεις επιρραίζουν τον τρόπο επιλογής. Ευρείες έρευνες για γενικά σφάλματα κι ακραίες τιμές και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους μπορούν εύκολα να βρεθούν. Η ανίχνευση σφάλματος μέσω μηχανικής εκμάθησης ή βασισμένης σε νοημοσύνη, προκύπτει από μία από μερικές γενικές μεθόδους. Μέθοδοι βάσει ταξινόμησης, στην πλέον βασική τους μορφή, κατηγοριοποιούν μία νέα περίπτωση, με βάση εκπαιδευμένα μοντέλα που έχουν παραχθεί από ένα παλαιότερο σετ παρατηρήσεων. Τα μοντέλα μπορεί να προκύψουν σε πολλαπλές κλάσεις, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.1 όπου χρησιμοποιούνται δύο κλάσεις. Τυπικά, οι περιοχές των κανονικών και μη κανονικών δεδομένων είναι γνωστές εκ των προτέρων. Η ανάλυση Bayesian κι η ανάλυση νευρωνικών δικτύων (Neural Network) είναι κλάδοι αυτής της τακτικής. Οι μέθοδοι βασισμένες σε τεχνικές των πλησιέστερων γειτόνων (Nearest Neighbor) είναι συνήθης μέθοδοι όπου τα φυσιολογικά δεδομένα εμφανίζονται σε πυκνές περιοχές. Τα μη φυσιολογικά δεδομένα διατηρούν μια συγκεκριμένη απόσταση ανάμεσα σ' αυτές τις περιοχές. Προσφάτως, η έρευνα σε στατιστικά βασισμένες μεθόδους επεκτείνεται. Παράδειγμα αποτελεί η Ανάλυση των Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis, PCA). Γενικά, η εμφάνιση φυσιολογικών δεδομένων έχει μεγάλη πιθανότητα, ενώ η εμφάνιση μη φυσιολογικών δεδομένων, μικρή πιθανότητα.



Σχ. 1.2: Προσομοιωμένο σήμα ΗΚΓ με μη σύνηθη καρδιακό παλμό

1.2 Συντήρηση βάσει κατάστασης (Condition-Based Monitoring, CBM)

Ο εντοπισμός σφαλμάτων εφαρμόζεται συγκεκριμένα σε μηχανικά συστήματα. Γενικά, αυτές οι μέθοδοι αναφέρονται ως Συντήρηση Βάσει Κατάστασης και προσπαθούν να ανιχνεύσουν απόκλιση από την ονομαστική συμπεριφορά ενός δυναμικού συστήματος στην πάροδο του χρόνου. Αυτές οι εφαρμογές μειώνουν το κόστος συντήρησης και επιμηκύνουν τη διάρκεια ζωής της μηχανής. Μη σύννομες αλλαγές στην απόδοση ενός συστήματος μπορούν να είναι αποτέλεσμα αυτοδιέγερσης, όπως για παράδειγμα η χειροτέρευση μίας κακής ευθυγράμμισης, ή από ένα εξωτερικό ερέθισμα, όπως για παράδειγμα η διέγερση της ιδιοσυχνότητας λόγω δόνησης παρακείμενης μηχανής. Τα τελευταία χρόνια μεγάλες επενδύσεις έχουν γίνει στον τομέα της CBM, ειδικά στην αεροδιαστημική και τις κατασκευαστικές βιομηχανίες. Γρήγορη ανίχνευση μη φυσιολογικής συμπεριφοράς μπορεί να υποδείξει ύπαρξη σφάλματος πριν η μηχανή χρειαστεί επισκευή η οποία συνήθως είναι χρονοβόρα και δαπάνηρη.

Η CBM είναι μία μη καταστρεπτική διαδικασία πραγματικού χρόνου. Τα πλεονεκτήματα τέτοιων μεθόδων για παρακολούθηση μηχανών περιλαμβάνουν:

- Ελαχιστοποιούν το κόστος ιδιοκτησίας, επιμηκύνοντας το διάστημα μεταξύ δύο συντηρήσεων.
- Ελαχιστοποιούν τον χρόνο διακοπής λειτουργίας κι ασφάλειας, μειώνοντας τον αριθμό των στοιχείων μηχανής τα οποία είναι να αστοχίσουν σύντομα.
- Αυξάνουν τον χρόνο χρήσης των στοιχείων μηχανής, μεγιστοποιώντας την πρακτική ζωή τους.

Οι μέθοδοι εντοπισμού σφαλμάτων οι οποίες είναι βασισμένες στην CBM, σε αντίθεση με διαγνωστικές τεχνικές συγκεκριμένων βλαβών -οι οποίες απαιτούν ανθρώπινη τεχνογνωσία για να είναι δυνατή η ανίχνευση βλάβης- έχουν ένα σαφές προβάδισμα στην ανίχνευση σφαλμάτων στη μηχανή, λόγω του γεγονότος ότι η μη φυσιολογική συμπεριφορά εμφανίζεται πριν το σφάλμα εξελιχθεί πλήρως.

Γενικά, η συντήρηση φέρει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Γενικός αλγόριθμος για πολλούς τύπους μηχανής
- Δυνατότητα να παρακολουθεί δεδομένα πολλαπλών τύπων (πίεση, θερμοκρασία, κ.λ.π.)
- Ικανότητα να εκπαιδεύεται σε διαφορετικές τάσεις λειτουργίας με την πάροδο του χρόνου και να ανιχνεύει τα μη συνήθη δεδομένα αυτών
- Ικανότητα να ειδοποιεί για αρχόμενα σφάλματα έγκαιρα

1.3 Κρίσιμη ανάλυση ανίχνευσης σφαλμάτων

Αρκετοί παράγοντες κάνουν την ανίχνευση σφαλμάτων δύσκολη για την CBM. Το να προσδιοριστεί η κανονική κατάσταση ώστε να αναγνωρίζονται όλες οι πιθανές φυσιολογικές συμπεριφορές ενός συστήματος είναι δύσκολο, καθώς τα μηχανικά στοιχεία κι η μηχανή έχουν δυναμικές σχέσεις. Το πιο δύσκολο σημείο της ανίχνευσης σφάλματος είναι να αποφασιστεί το όριο μεταξύ φυσιολογικής και μη συμπεριφοράς. Ασυνήθης παρατηρήσεις μπορεί να βρίσκονται κοντά στο όριο του φυσιολογικού κι αντιστρόφως. Συγκεκριμένα, η διάκριση ανάμεσα σε μη φυσιολογική και φυσιολογική συμπεριφορά είναι έως και προβληματική σε στοιχεία μηχανής όπως τα ρουλεμάν τα οποία μπορεί να έχουν μία ή και περισσότερες διαφορετικές μη φυσιολογικές καταστάσεις (για παράδειγμα, βλάβη σε διαφορετικά μέρη την ίδια στιγμή). Σε πιο εξελιγμένες περιπτώσεις βλάβης, οι εξαιρετικά μη φυσιολογικές παρατηρήσεις αρχίζουν να γίνονται πιο φυσιολογικές (για παράδειγμα, ελάττωμα σε στοιχείο μηχανής γίνεται πιο ομαλό με την πάροδο του χρόνου).

Οι διάφορες στατιστικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στην ανίχνευση μη φυσιολογικών συμπεριφορών. Συγκεκριμένα, η σε στατιστική μέθοδο βασισμένη CBM αντιμετωπίζει πολλά από τα μειονεκτήματα των μηχανικών συστημάτων. Το να αποκτηθούν τα απαραίτητα δεδομένα για την

εκπαίδευση είναι λιγότερο δύσκολο. Το να αναγνωριστεί το εύρος της φυσιολογικής συμπεριφοράς απλά προϋποθέτει την συλλογή δεδομένων νωρίς στην εγκατάσταση της μηχανής ή αποκτώντας ιστορικά δεδομένα. Ακόμα κι όταν κατασκευαστικά σφάλματα ή ατελής εγκαταστάσεις είναι παρόντα σε ένα σύστημα, το σύνολο των μη φυσιολογικών συμπεριφορών μπορεί και πάλι να προκύψει από την “φυσιολογική” συμπεριφορά με την καταγραφή του σφάλματος του συστήματος στην πάροδο του χρόνου. Αυτό το σφάλμα μπορεί να οφείλεται σε πολλαπλές φθορές που εξελίσσονται. Ακόμα, το να ανιχνευθεί ένα σφάλμα σε ένα μηχανικό σύστημα δεν απαιτεί προηγούμενη γνώση ελαττωμάτων ούτε και ανθρώπινη παρέμβαση. Η ανίχνευση μη φυσιολογικών συμπεριφορών γίνεται τυπικά με μία γενική προσέγγιση κι έτσι εξελίφει την ανάγκη για εξαιρετικά ακριβή και συγκεκριμένα συστημικά μοντέλα οποία μπορεί να είναι δύσκολο να αποκτηθούν για όλες τις συμπεριφορές της μηχανής. Αυτή η εργασία περιλαμβάνει μία σε στατιστικές μεθόδους τεχνική.

Μία κοινή εφαρμογή της CBM επεκτείνεται στα ρουλεμάν λόγω των υψηλών δυναμικών φορτίων που αυτά μεταφέρουν και του μεγάλου κόστους αστοχίας κι απώλειας παραγωγής. Τα ρουλεμάν παράγουν ιδιαίτερα ξεχωριστά φάσματα βλάβης και για αυτόν τον λόγο είναι καλοί υποψήφιοι για παρακολούθηση.

1.4 Επισκόπηση βιομηχανικών πρακτικών στην ανίχνευση σφαλμάτων σε ρουλεμάν

Η βλάβη των ρουλεμάν είναι δυνατό να αποφευχθεί με γρήγορη ανίχνευση των ελαττωμάτων τους. Ειδικά σε περιβάλλοντα όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια και ποιότητα, ο μειωμένος χρόνος διακοπής λειτουργίας κι η υψηλή απόδοση των μηχανών είναι απαραίτητα. Σε μερικές κρίσιμες καταστάσεις η απόδοση των ρουλεμάν και το εξαγόμενο της παραγωγής συσχετίζονται. Υπάρχουν αναφορές ότι η απόδοση μιας μηχανής χαρτοποιίας συσχετίζεται άμεσα με τη λειτουργία των ρουλεμάν. Λόγω της κρίσιμης φύσης των ρουλεμάν η παρακολούθηση της βιομηχανίας έχει στις μέρες μας επεκταθεί κι αναμενόμενη αγορά ανάλογου εξοπλισμού έως το 2015 αναμένεται στα 2.1 εκατομμύρια δολάρια.

Η παρακολούθηση των δονήσεων των περιστρεφόμενων μηχανών στη βιομηχανία χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

- Στην προληπτική συντήρηση ISO 10816 και
- στην προβλεπτική συντήρηση ISO 13373.

Η συντήρηση ISO 10816 είναι απλά μια σειρά οδηγιών για τον υπολογισμό της δριμύτητας των δονήσεων από το πλάτος των σημάτων. Όμως, η ανάλυση αυτή δεν δίνει στοιχεία για την πηγή των δονήσεων. Πολλές φορές το σήμα που προκύπτει από ένα εσφαλμένο ρουλεμάν εμφανίζεται αποδεκτό εξαιτίας του γεγονότος ότι συχνά, τέτοια δεδομένα έχουν φάσματα μικρού σχετικά πλάτους. Επίσης, η συντήρηση συνιστάται από τους κατασκευαστές. Αντίθετα, οι διαδικασίες της προβλεπτικής συντήρησης ISO 13373 επεξεργάζονται τα δεδομένα των δονήσεων μέσω διαγνωστικών τεχνικών. Οι διαδικασίες αυτές απαιτούν περισσότερες γνώσεις πάνω στην απόκριση των μηχανών για να γίνουν ακριβείς διαγνώσεις αλλά επιτρέπουν την ανίχνευση συγκεκριμένων σφαλμάτων και την ανίχνευση των πηγών παραγωγής των δονήσεων.

Υπάρχει η εναλλακτική προσέγγιση ISO 22096 η οποία περιλαμβάνει μεθόδους ακουστικής εκπομπής (Acoustic Emissions, AE). Οι τεχνικές αυτές καταγράφουν συχνότητες πολύ υψηλότερες σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές μέσω της απόπειρας ανίχνευσης εκπεμπόμενων ηχητικών κυμάτων υψηλής συχνότητας που παράγονται από παροδικές εντάσεις λόγω πρόσκρουσης. Αναφέρεται ότι σε κάποιες περιπτώσεις οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να ανιχνεύσουν το επίπεδο της μηχανικής βλάβης πριν τα αδύναμα σημεία του μηχανισμού γίνουν σφάλματα επιφάνειας. Άλλες, λιγότερο διαδεδομένες μέθοδοι περιλαμβάνουν ανάλυση της θερμοκρασίας, του ηλεκτρικού ρεύματος και παρακολούθηση των λιπαντικών λαδιών. Ωστόσο, οι μετρήσεις των δονήσεων είναι οι πιο ευρέως μελετημένες κι αποδοτικές για ανίχνευση σφαλμάτων. Υπάρχει μια ευρεία ποικιλία μεθόδων για την καταγραφή των δονήσεων για τις διάφορες εφαρμογές, η καθεμία από τις οποίες εμπίπτει σε ένα από τα τρία παρακάτω πεδία:

- χρόνου,
- συχνότητας, ή
- συνδυασμού των δύο.

2. Θεωρητικό μέρος

2.1 Μορφολογική ανάλυση

Με τον όρο μορφολογική ανάλυση σημάτων εννοείται ένα σύνολο από θεωρητικές έννοιες, μαθηματικά εργαλεία επεξεργασίας σήματος, μη γραμμικούς τελεστές, μεθόδους σχεδιασμού και συστήματα εφαρμογών που συσχετίζονται με την μαθηματική μορφολογία.

Η μαθηματική μορφολογία έχει σαν σκοπό την ποσοτική περιγραφή της γεωμετρικής δομής των σχημάτων. Εισήχθη από τους Matheron και Serra το 1960. Η μαθηματική μορφολογία συστηματοποίησε παλαιότερες προσπάθειες για ανάλυση δυαδικών εικόνων και πρόσθεσε νέες έννοιες και τελεστές. Οι αρχές της μαθηματικής μορφολογίας βασίζονται στη θεωρία συνόλων και τη στοχαστική γεωμετρία. Οι παραδοσιακές μέθοδοι επεξεργασίας γραμμικών συστημάτων και η ανάλυση Fourier δεν είναι αποτελεσματικές στην επίλυση προβλημάτων που αφορούν τη γεωμετρία της χρονικής ακολουθίας διότι δεν αντιμετωπίζουν ευθέως το θέμα της ποσοτικοποίησης του σχήματος και του μεγέθους των σημάτων.

Αρχικά, εφαρμόστηκε για την ανάλυση εικόνων στη γεωλογία και στη βιολογία. Όπως υποδηλώνεται από το όνομα της, η μορφολογική προσέγγιση αντιλαμβάνεται τα εξεταζόμενα αντικείμενα με τρόπο που συμφωνεί με την ανθρώπινη αντίληψη των σχημάτων, αντίθετα με άλλες μεθόδους, που βασίζονται στη λογική των συχνοτήτων.

Οι εφαρμογές σε μονοδιάστατες χρονικές σειρές είναι περιορισμένες και αφορούν βιολογικά σήματα, όπως καρδιογραφήματα και εγκεφαλογραφήματα.

Η μορφολογική προσέγγιση δεν συναντάται συχνά σε εφαρμογές που σχετίζονται με την επεξεργασία δυναμικών σημάτων, όπως οι κραδασμοί που παράγονται κατά τη λειτουργία των ένσφαιρων τριβέων. Όπως, έχει ήδη αναφερθεί, η μορφολογική επεξεργασία αξιοποιεί χαρακτηριστικά που υπάρχουν στη χρονική μορφή των σημάτων. Παρ' ότι η μορφολογική επεξεργασία δυσκολεύεται να ανιχνεύσει χαρακτηριστικά, τα οποία είναι κρυμμένα στη χρονική κυματομορφή του σήματος, εν τούτοις σε πολλές περιπτώσεις δύναται να αξιοποιηθεί ούτως ώστε να εξαχθούν τα κρουστικά χαρακτηριστικά των κραδασμών με αποτελεσματικότερο τρόπο από τις παραδοσιακές μεθόδους.

Στην μαθηματική μορφολογία εφαρμόζεται μια σειρά από μη γραμμικούς μετασχηματισμούς, οι οποίοι βασίζονται στην έννοια των συνόλων. Οι βασικοί τύποι μορφολογικών συνόλων είναι η πρόσθεση και η αφαίρεση συνόλων Minkowski.

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

$$A \oplus B = \{a + b, a \in A, b \in B\} = \bigcup_{b \in B} A_b \quad (2.1.1)$$

όπου το μαθηματικό σύμβολο \bigcup ορίζει την ένωση συνόλων και A_b είναι ένα σύνολο που προκύπτει με 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 εκφραστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$A \ominus B = (A^c \oplus B)^c = \bigcap_{b \in B} A_b \quad (2.1.2)$$

όπου A^c είναι το συμπλήρωμα του συνόλου A και το σύμβολο \bigcap 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 (2.1.1) και (2.1.2) αντίστοιχα, ορίζονται οι δύο βασικοί μορφολογικοί τελεστές: η διαστολή (dilation) και η διάβρωση (erosion).

$$dil(A, B) = A \oplus B^r = \{x, B_x \cap A \neq \emptyset\} = \bigcup_{b \in B} A_{-b} \quad (2.1.3)$$

$$er(A, B) = A \ominus B^r = \{x, B_x \subseteq A\} = \bigcap_{b \in B} A_{-b} \quad (2.1.4)$$

όπου ο όρος B^r παριστάνει κατοπτρικό σύνολο συναρτήσεως της αρχής του συνόλου B.

Ένα παράδειγμα διαστολής και διάβρωσης απεικονίζεται στο Σχ. 2.1. Τα σύνολα A και B λαμβάνουν δυαδικές τιμές (1 ή 0 → ‘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.

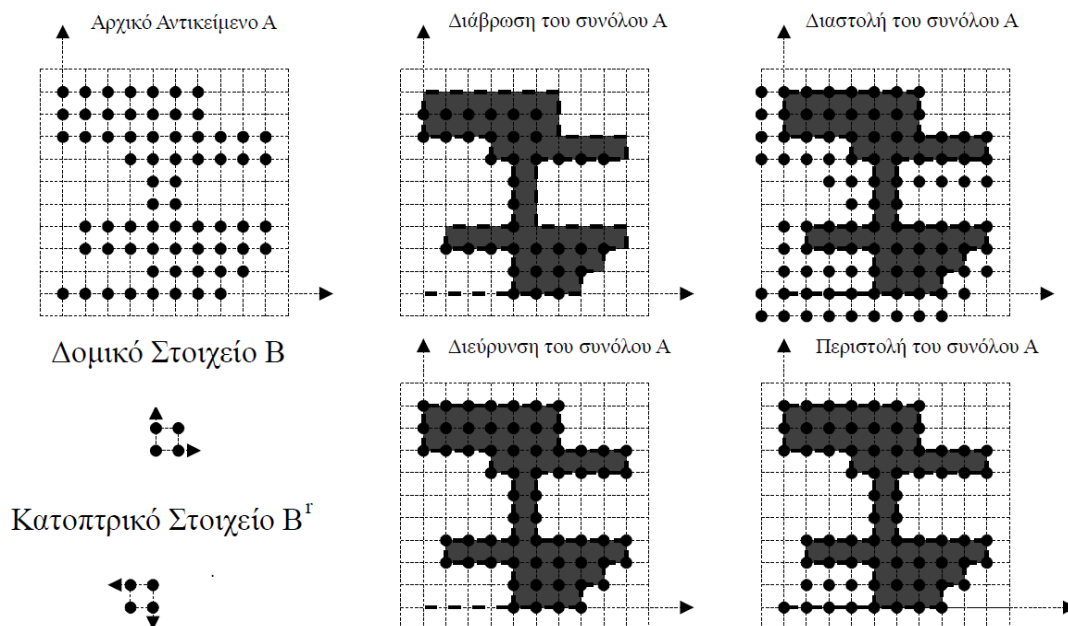
Με βάση τη διαστολή και τη διάβρωση ορίζονται δύο ακόμη βασικοί μορφολογικοί τελεστές: η περιστολή (closing) και η διεύρυνση (opening).

$$cl(A, B) = A \bullet B = (A \oplus B^r) \ominus B \quad (2.1.5)$$

$$op(A, B) = A \circ B = (A \ominus B^r) \oplus B \quad (2.1.6)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (2.1.5), η περιστολή ορίζεται ως η διαστολή του συνόλου A από το σύνολο B συνοδευόμενη από αφαίρεση Minkowski του συνόλου B. Αντίστοιχα, η διεύρυνση δύναται να εκφραστεί ως η διάβρωση του συνόλου A από το σύνολο B συνοδευόμενη από πρόσθεση Minkowski του συνόλου B.

Το σύνολο που προκύπτει από την περιστολή πάντα περιλαμβάνει το αρχικό σύνολο, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.1. Επίσης, η μορφολογική περιστολή καλύπτει τα κενά του αρχικού αντικειμένου, ενώ η μορφολογική διεύρυνση εξαλείφει λεπτά και αιχμηρά τμήματα του αρχικού αντικειμένου. Περαιτέρω εφαρμογή των μορφολογικών τελεστών με το ίδιο δομικό στοιχείο δεν αλλάζει το αποτέλεσμα.



Σχ. 2.1: 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

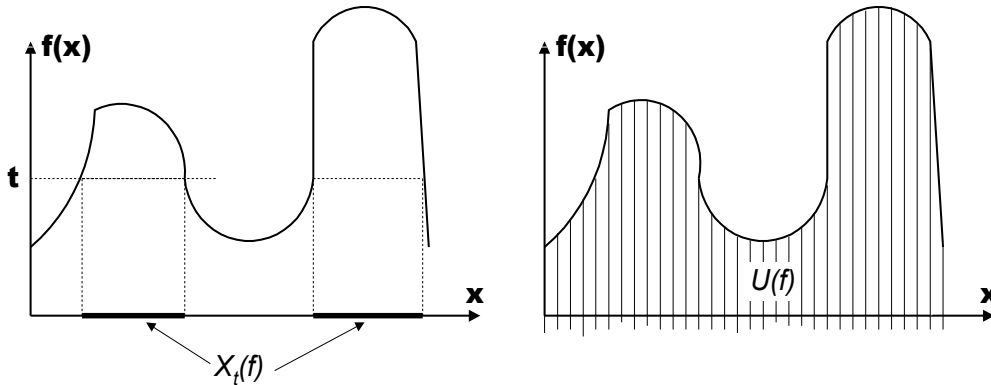
Η βάση της μαθηματικής μορφολογίας είναι το σύνολο. Για την ανάλυση πολυδιάστατων σημάτων έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές προσεγγίσεις.

Για μονοδιάστατες συναρτήσεις ορίζεται η διατομή (cross section) μιας συνάρτησης:

$$X_t(f) = \{x \in D : f(x) \geq t\}, t \in V \quad (2.1.7)$$

όπου $f(x)$ είναι μία συνάρτηση, D είναι το πεδίο ορισμού της f στο σύνολο των ακεραίων Z ή στο σύνολο R των πραγματικών αριθμών, V είναι το πεδίο τιμών της $f(x)$ και ο όρος t εκφράζει ένα όριο (threshold).

Μια ενδεικτική διατομή μιας συνάρτησης αναπαρίσταται στο Σχ. 2.2.



Σχ. 2.2: Παράσταση συνάρτησης με σύνολα: (α) η διατομή $X_t(f)$ και (β) η σύσκια αναπαράσταση $U(f)$

Έστω ότι η συνάρτηση $f(x)$ είναι συνεχής και εμφανίζει θετικές κορυφές (upper semi-continuous function). Τότε είναι δυνατή η ανακατασκευή της συνάρτησης από τις διατομές της που λαμβάνονται από μία ακολουθία συνόλων:

$$f(x) = \sup \{t \in R : x \in X_t\} \quad (2.1.8)$$

Η δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιεί τη σύσκια αναπαράσταση (umbra) $U(f)$ της συνάρτησης (Σχ. 2.2). Είναι ένα σύνολο U που ορίζεται στο καρτεσιανό επίπεδο με τον ακόλουθο τρόπο:

$$(x, t) \in U \Leftrightarrow t \leq f \Leftrightarrow x \in X_t(f) \quad (2.1.9)$$

$$(x, t) \in U \Leftrightarrow (x, a) \in U, \forall a < t \quad (2.1.10)$$

Σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς το μορφολογικό φιλτράρισμα τροποποιεί τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σημάτων δια μέσου της επεξεργασίας με ένα άλλο σήμα ή συνάρτηση, που καλείται δομικό στοιχείο (structuring element). Το δομικό στοιχείο στην πράξη έχει απλούστερη μορφή από το τροποποιούμενο σήμα.

Χρησιμοποιώντας τη διατομή $X_t(f)$ και τη σύσκια αναπαράσταση $U(f)$ μιας συνάρτησης συνόλων, η πρόσθεση και η αφαίρεση Minkowski μεταξύ δύο συναρτήσεων δύναται να εκφραστούν ως εξής:

$$(f \oplus g)(x) = \sup_{y \in D} \{f(y) + g(x - y)\} \quad (2.1.11)$$

$$(f\Theta g)(x) = \inf_{y \in D} \{f(y) - g(x - y)\} \quad (2.1.12)$$

Στις σχέσεις (2.1.11) και (2.1.12), το σύνολο D μπορεί να ταυτισθεί με το σύνολο των πραγματικών αριθμών R . Όμως, για πρακτικές εφαρμογές υποτίθεται ότι το σύνολο D είναι ένα συμπαγές υποσύνολο του R . Επίσης, δίχως αλλοίωση της γενικότητας, η συνάρτηση $g(x)$ μπορεί να ορισθεί σε ένα υποσύνολο του D .

Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω ορισμούς της πρόσθεσης και της αφαίρεσης Minkowski μεταξύ συναρτήσεων, οι τέσσερις βασικές μορφολογικές λειτουργίες μπορούν να ορισθούν ως εξής:

$$dil(f, g) = (f \oplus g^r)(x) = f(x) \oplus g(-x) = \sup_{y \in D} \{f(y) + g(y - x)\} \quad (2.1.13)$$

$$er(f, g) = (f\Theta g^r)(x) = f(x)\Theta g(-x) = \inf_{y \in D} \{f(y) - g(y - x)\} \quad (2.1.14)$$

$$cl(f, g) = (f \bullet g)(x) = [(f \oplus g^r)\Theta g](x) \quad (2.1.15)$$

$$op(f, g) = (f \circ g)(x) = [(f\Theta g^r) \oplus g](x) \quad (2.1.16)$$

όπου η $g^r(x)$ είναι συμμετρική συνάρτηση της $g(x)$ σε σχέση με την αρχή του άξονα x .

Σύμφωνα με την κλασσική γραμμική συνέλιξη $f * g$ μεταξύ δύο συναρτήσεων $f(x)$ και $g(x)$, η πρόσθεση και η αφαίρεση συνόλων κατά Minkowski μπορούν να εκφραστούν εναλλακτικά σαν μη γραμμικές συνέλιξεις, στις οποίες ο πολλαπλασιασμός μεταξύ των δύο συναρτήσεων αντικαθίσταται από πρόσθεση ή αφαίρεση, και η ολοκλήρωση αντικαθίσταται από τους τελεστές μεγιστοποίησης (\max) ή ελαχιστοποίησης (\min).

Οι εξισώσεις (2.1.13) έως (2.1.16) μπορούν να απλοποιηθούν όταν η συνάρτηση $g(x)$ είναι άρτια, δηλαδή $g(x) = g(-x)$ κι οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται είναι διακριτές. Έτσι, για ένα σήμα $f(k)$, το οποίο ορίζεται στο πεδίο D_f , και για ένα δομικό στοιχείο που εκφράζεται από τη συνάρτηση $g(u)$ μήκους L , η οποία ορίζεται στο πεδίο D_g , οι τέσσερις βασικοί μορφολογικοί τελεστές μπορούν να ορισθούν ως εξής:

$$dil(k) = (f \oplus g)(k) = \max_{u \in D_g} \{f(k + u) + g(u)\} \quad (2.1.17)$$

$$er(k) = (f\Theta g)(k) = \min_{u \in D_g} \{f(k + u) - g(u)\} \quad (2.1.18)$$

$$cl(k) = (f \bullet g)(k) = er(dil(k)) \quad (2.1.19)$$

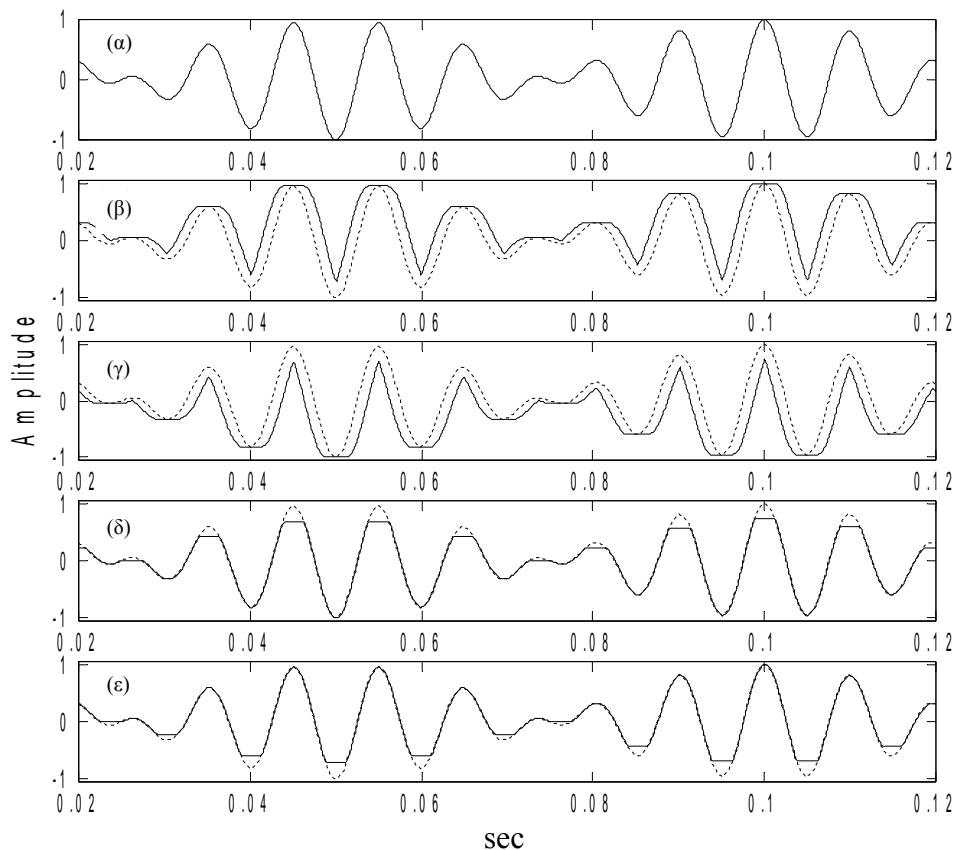
$$op(k) = (f \circ g)(k) = dil(er(k)) \quad (2.1.20)$$

Η μη γραμμικότητα των τελεστών διαστολής και διάβρωσης έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφορών μεταξύ των μορφολογικών τελεστών και της γραμμικής συνέλιξης.

Για να είναι σαφή τα βασικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων μορφολογικών τελεστών στις μονοδιάστατες συναρτήσεις, εφαρμόζεται η μορφολογική μεθοδολογία σε μία διαμορφωμένη κατά πλάτος ημιτονοειδή συνάρτηση. Στο Σχ. 2.3 αναπαρίστανται οι μορφολογικοί μετασχηματισμοί της διαμορφωμένης κατά πλάτος αρμονικής συνάρτησης. Στη διαδικασία χρησιμοποιείται ένα επίπεδο δομικό στοιχείο (flat structuring element). Τα επίπεδα δομικά στοιχεία εμφανίζουν πολύ απλή

μορφή και απαιτούν για την εφαρμογή τους την εκτίμηση μίας μόνο παραμέτρου, που είναι το μήκος τους L . Η διάρκεια του δομικού στοιχείου είναι $0,25T$, όπου T είναι η περίοδος του αρμονικού σήματος. Στο Σχ. 2.3, η διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει το αρχικό σήμα.

Η μορφολογική διαστολή (Σχ. 2.3(β)) αποκόπτει τις θετικές κορυφές και μειώνει το πλάτος των αρνητικών κορυφών ανάλογα με τη διάρκεια του δομικού στοιχείου. Αντίθετα, η μορφολογική διάβρωση (Σχ. 2.3(γ)) αποκόπτει τις αρνητικές κορυφές κι οξύνει τις θετικές κορυφές. Η μορφολογική διεύρυνση (Σχ. 2.3(ε)) μόνο αποκόπτει τις θετικές κορυφές και τέλος η μορφολογική περιστολή (Σχ. 2.3(δ)) μόνο αποκόπτει τις αρνητικές κορυφές.



Σχ. 2.3: Μορφολογικές λειτουργίες σε μία αρμονική συνιστώσα, η οποία είναι διαμορφωμένη κατά πλάτος, με την εφαρμογή επίπεδου δομικού στοιχείου: α)το αρχικό διαμορφωμένο σήμα, β)διαστολή, γ)διάβρωση, δ)περιστολή και ε)διεύρυνση

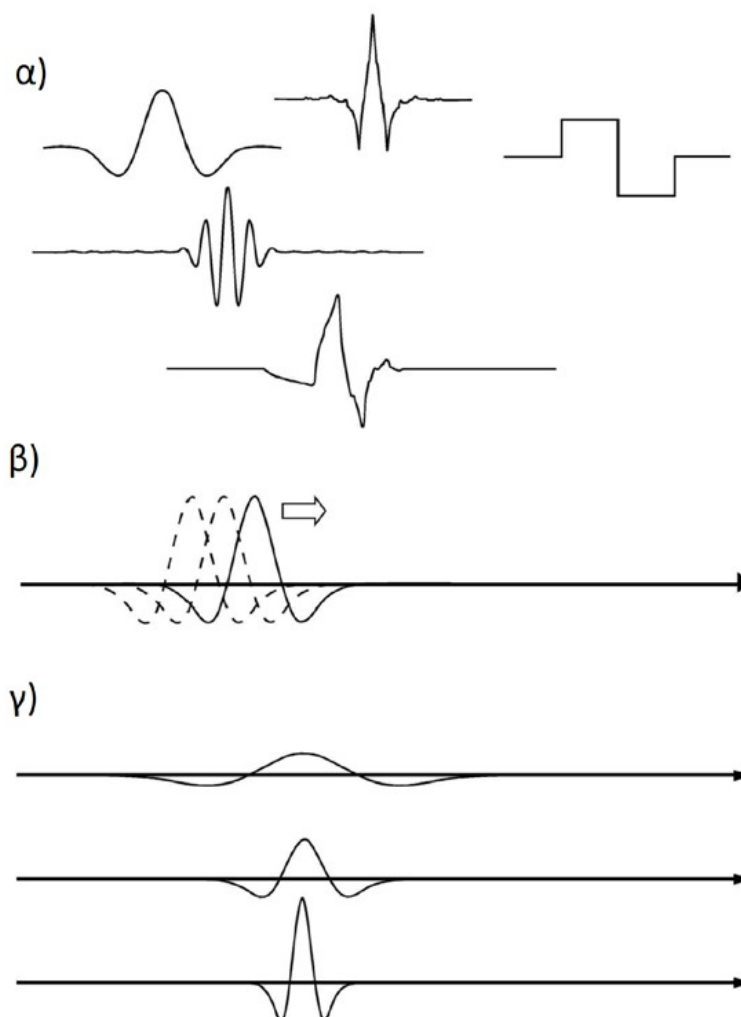
2.2. Ανάλυση κυματιδίων

2.2.1 Ο μετασχηματισμός κυματιδίου (WT)

Ο μετασχηματισμός κυματιδίου (wavelet transform, WT) είναι ιδιαίτερα χρήσιμος στην ανάλυση σημάτων που χαρακτηρίζονται ως απεριοδικά, ασυνεχή, με απότομες αλλαγές και θόρυβο. Η ικανότητά του να εξετάζει το σήμα ταυτόχρονα στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας σε αντίθεση με το μετασχηματισμό Fourier (που η διακριτική ικανότητά του περιορίζεται στη συχνότητα ενώ χάνει οποιαδήποτε πληροφορία στο πεδίο του χρόνου) είχαν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλών εξελιγμένων

μεθόδων βασισμένων στα κυματίδια. Σήμερα ο μετασχηματισμός κυματιδίου έχει εφαρμογές σε πάρα πολλούς τομείς και βοηθάει στην ανάλυση πλείστων φυσικών φαινομένων με μεγάλη επιτυχία. Έτσι κάποια παραδείγματα αποτελούν η ανάλυση κλιματικών φαινομένων, οικονομικών μεγεθών, καρδιολογικών σημάτων, μηχανικών διατάξεων, η αποθορυβοποίηση σεισμικών και αστρονομικών σημάτων, η συμπίεση βίντεο και πολλά άλλα. Επιπλέον στην μεταλλουργία για τον έλεγχο των επιφανειών, στην οικονομία, για την ανίχνευση ιδιοτήτων στις τιμές. Τα κυματίδια έχουν τη δυνατότητα να διακρίνουν εάν το σύντομο σήμα υπάρχει, και σε θετική περίπτωση, μπορούν να το τοποθετήσουν στο χρόνο.

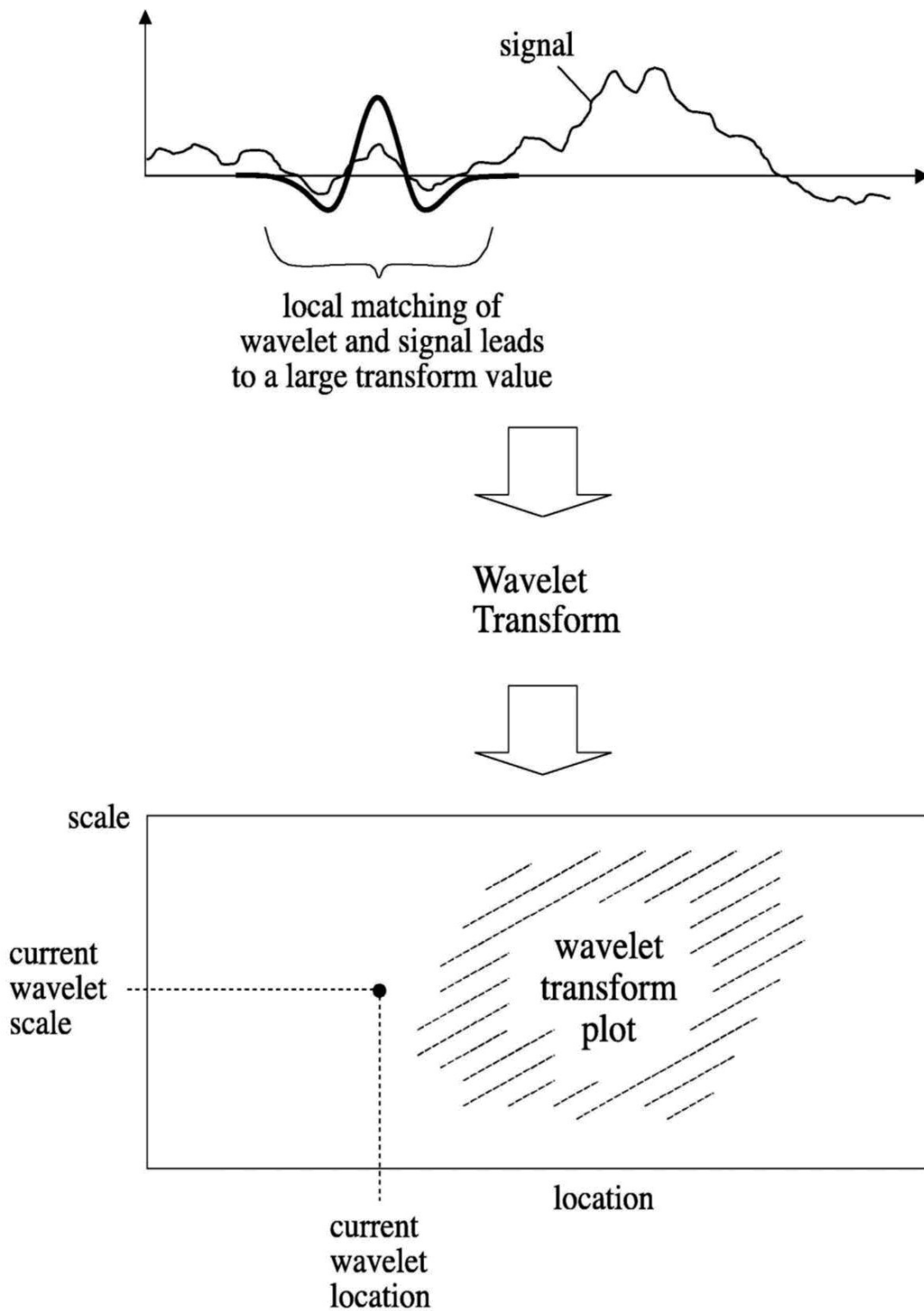
Πιο συγκεκριμένα η ανάλυση μετασχηματισμού κυματιδίου χρησιμοποιεί μικρές κυματοειδείς συναρτήσεις γνωστές ως κυματίδια. Το Σχ. 2.4(α) δείχνει μερικά παραδείγματα κάποιων κοινών κυματιδίων που χρησιμοποιούνται στην πράξη. Τα κυματίδια μετασχηματίζουν το υπό ανάλυση σήμα με τέτοιο τρόπο ώστε να παρουσιάζει την πληροφορία με μια πιο χρήσιμη μορφή. Αυτός ο μετασχηματισμός είναι γνωστός ως μετασχηματισμός κυματιδίου. Μιλώντας με μαθηματικούς όρους, ο μετασχηματισμός κυματιδίου αποτελεί ουσιαστικά τη συνέλιξη του κυματιδίου με το σήμα.



Σχήμα 2.4: α) Κάποια κυματίδια β) Αλλαγή τοποθεσίας γ) Αλλαγή κλίμακας

Ένα κυματίδιο μπορεί να μεταλλαχθεί με δύο τρόπους. Πρώτον μπορεί να μεταφερθεί σε διάφορες τοποθεσίες του σήματος (Σχ. 2.4(β)) και δεύτερον μπορεί να απλωθεί ή να συμπιεστεί (Σχ. 2.4(γ)). Το Σχ. 2.5 αποτελεί μια σχηματική αναπαράσταση του μετασχηματισμού κυματιδίου, ο οποίος βασικά υπολογίζει

την τοπική ομοιότητα του κυματιδίου με το σήμα.



Σχ. 2.5: Το κυματίδιο, το σήμα κι ο μετασχηματισμός

Αν το κυματίδιο ταιριάζει αρκετά με το σχήμα του σήματος σε συγκεκριμένη κλίμακα και τοποθεσία, όπως συμβαίνει στην πρώτη απεικόνιση του Σχ. 2.5, τότε λαμβάνεται μια μεγάλη τιμή μετασχηματισμού.

Αντίθετα, αν το κυματίδιο και το σήμα δεν συσχετίζονται ικανοποιητικά, τότε λαμβάνεται μια χαμηλή τιμή μετασχηματισμού. Κατόπιν, η τιμή του μετασχηματισμού τοποθετείται σε ένα διδιάστατο πεδίο μετασχηματισμού όπως φαίνεται στη δεύτερη απεικόνιση του Σχ. 2.5 (μαύρη τελεία). Ο μετασχηματισμός υπολογίζεται σε διάφορες τοποθεσίες του σήματος και για διάφορες κλίμακες του κυματιδίου, συμπληρώνοντας έτσι το πεδίο μετασχηματισμού. Αυτό μπορεί να γίνει είτε σε συνέχεια, οπότε έχουμε συνεχή μετασχηματισμό κυματιδίου (Continuous Wavelet Transform, CWT), είτε με διακριτά βήματα, οπότε έχουμε διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίου (Discrete Wavelet Transform, DWT). Σχεδιάζοντας τον μετασχηματισμό κυματιδίου, καθίσταται ικανή η συσχέτιση του κυματιδίου και του σήματος, σε διάφορες κλίμακες και σημεία.

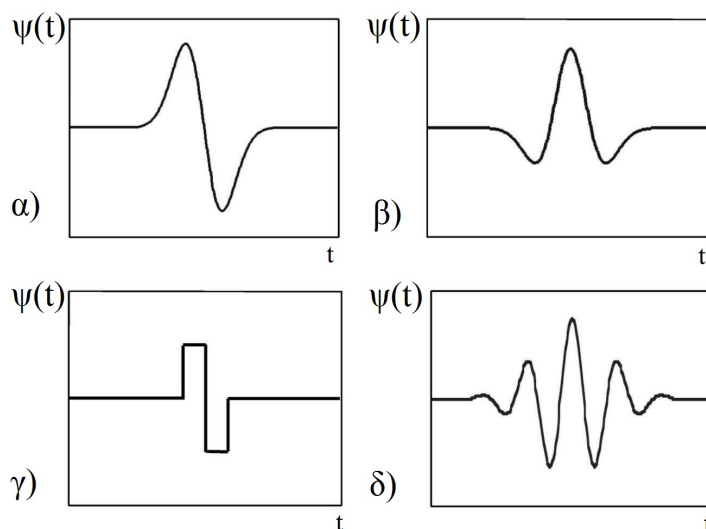
2.2.2 Το κυματίδιο

Ο μετασχηματισμός κυματιδίου είναι μια μέθοδος μετατροπής μιας συνάρτησης (ή ενός σήματος) σε μια άλλη μορφή η οποία είτε κάνει κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του αρχικού σήματος πιο ευδιάκριτα προς μελέτη, είτε επιτρέπει το αρχικό πακέτο δεδομένων να περιγραφεί πιο περιεκτικά. Για να εκτελεστεί ένας μετασχηματισμός κυματιδίου χρειάζεται ένα κυματίδιο το οποίο στην ουσία αποτελεί μία συνάρτηση $\psi(t)$ που ικανοποιεί συγκεκριμένα μαθηματικά κριτήρια (δηλαδή, το κυματίδιο εξαρτάται από το χρόνο). Ωστόσο, πολλές εφαρμογές των κυματιδίων έχουν ως ανεξάρτητη μεταβλητή το χώρο κι όχι το χρόνο.

Στο Σχ. 2.6 φαίνονται κάποια συχνά χρησιμοποιούμενα κυματίδια. Έχουν τη μορφή μικρών κυμάτων τοποθετημένων στον άξονα του χρόνου. Στην πράξη υπάρχει ένας τεράστιος αριθμός κυματιδίων που χρησιμοποιείται στην ανάλυση των δεδομένων. Η καλύτερη επιλογή για μια συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από τη φύση του σήματος και από τι επιδιώκεται από την ανάλυση.

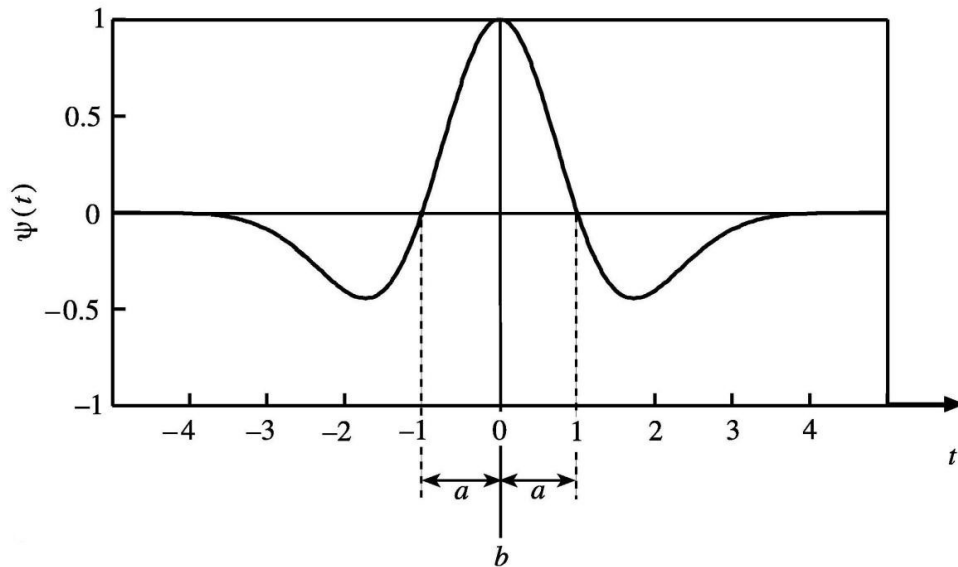
Για παράδειγμα, το κυματίδιο Mexican hat (Mh), απεικονίζεται στο Σχ. 2.7 κι ορίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$\psi(t) = (1 - t^2) e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (2.2.1)$$



Σχ. 2.6: Διάφορα κυματίδια: α)Gaussian β)Mexican hat γ)Haar και δ)Morlet (πραγματικό μέρος)

Το κυματίδιο της εξίσωσης (2.2.1) είναι γνωστό ως μητρικό κυματίδιο (mother wavelet). Αυτή είναι η βασική μορφή του κυματιδίου από την οποία προέρχονται διάφορες εκδόσεις του που χρησιμοποιούνται στον μετασχηματισμό κυματιδίου.



Σχ. 2.7: Κυματίδιο Mexican hat, έννοια των a και b

2.2.3 Ορισμός του συνεχή μετασχηματισμού κυματιδίου

Έστω ότι έχει γίνει η επιλογή του κυματιδίου κι έπεται η ανάλυσή του. Πρώτα όμως απαιτείται το κυματίδιο να είναι πιο εύκαμπτο (flexible) από το αρχικά ορισμένο μητρικό. Δύο βασικές μετατροπές είναι δυνατό να μετασχηματίσουν το κυματίδιο σε πιο επιθυμητές μορφές:

- Η διαστολή-συστολή του (dilation) με αλλαγή της παραμέτρου a κι
- η μεταφορά του (translation) κατά μήκος του οριζόντιου άξονα με αλλαγή της παραμέτρου b .

Στο Σχ. 2.8(a) φαίνεται η διαστολή-συστολή ενός κυματιδίου Mexican hat για διάφορες τιμές της παραμέτρου a και στο Σχ. 2.8(b) φαίνεται η μεταφορά ενός κυματιδίου Mexican hat κατά μήκος του οριζόντιου άξονα -του χρόνου στην συγκεκριμένη περίπτωση- για διάφορες τιμές της παραμέτρου b .

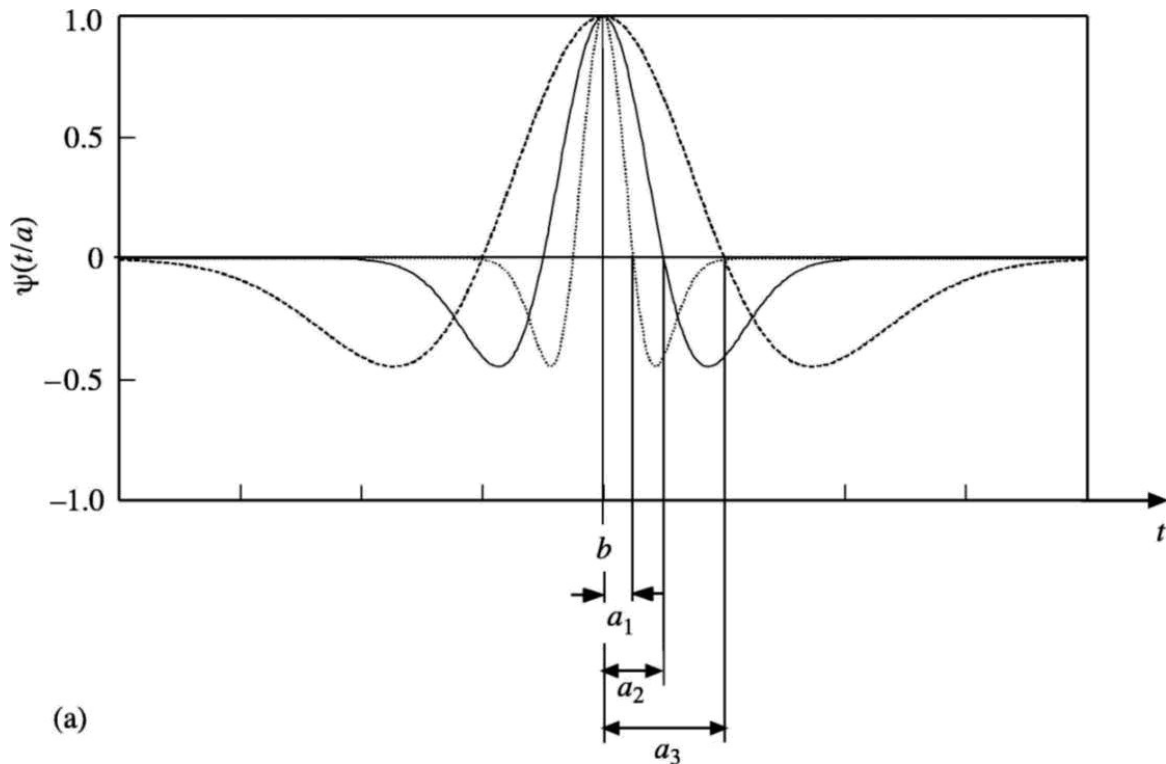
Έτσι, τοποθετώντας τα a και b στην αρχική εξίσωση (2.2.1) οι νέες εκδόσεις του μητρικού κυματιδίου ορίζονται από τον τύπο:

$$\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = \left[1 - \left(\frac{t-b}{a}\right)^2\right] * \exp\left(\frac{-1}{2} \left(\frac{t-b}{a}\right)^2\right) \quad (2.2.2)$$

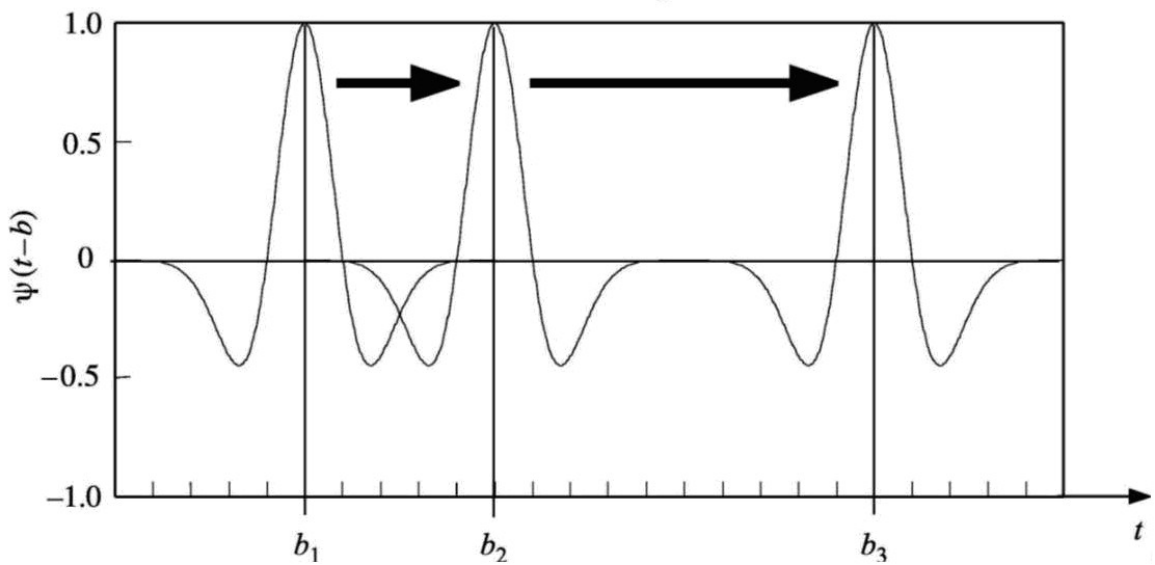
Στην εξίσωση (2.2.2) μπορούμε να αλλάξουμε τις τιμές των δύο παραμέτρων κατά βούληση. Ο τύπος του συνεχή μετασχηματισμού κυματιδίου ορίζεται ως εξής:

$$T(a, b) = w(a) \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) * \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.2.3)$$

όπου το $w(a)$ είναι μια συνάρτηση βάρους η οποία συνήθως τίθεται ίση με $1/\sqrt{a}$ για λόγους διατήρησης της ενέργειας.



(a)



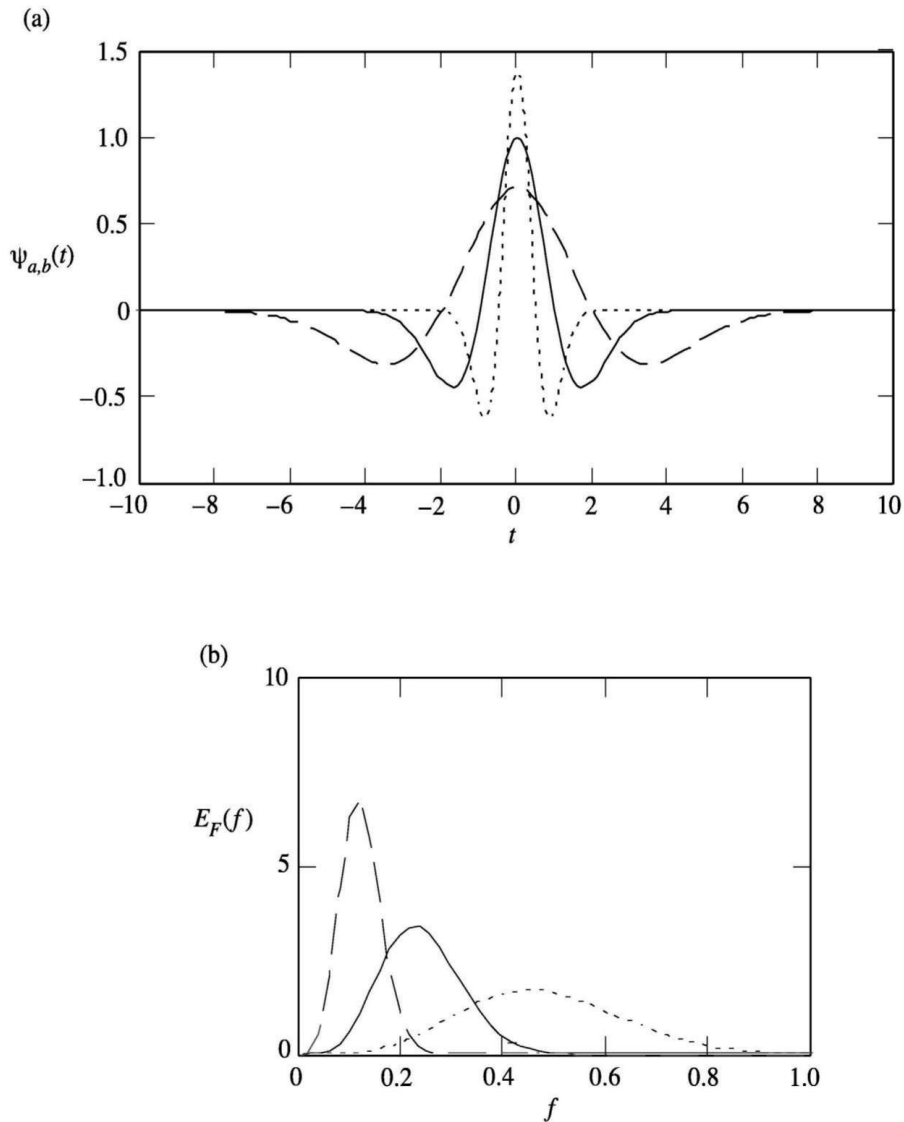
(b)

Σχ. 2.8: a) Διαστολή-συστολή κυματιδίου, $a_2=2*a_1$, $a_3=2*a_2$ και b) Μεταφορά κυματιδίου στο χρόνο

Από τον τύπο (2.2.3) φαίνεται και πάλι ότι ο μετασχηματισμός κυματιδίου αποτελεί μία πράξη συνέλιξης.

Ένα τελευταίο σημαντικό στοιχείο που πρέπει να σημειωθεί είναι η επίδραση της παραμέτρου a στο κυματίδιο Mexican hat (Σχ. 2.9). Όσο το κυματίδιο διαστέλλεται στο χρόνο το φάσμα του περιορίζεται, μια λογική συνέπεια αφού η επιμήκυνση των χρονικών περιόδων έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των αντίστοιχων συχνοτήτων. Έτσι το a είναι αντιστρόφως ανάλογο με όλες τις χαρακτηριστικές συχνότητες του

κυματιδίου, f_c .



Σχ. 2.9: α) Τρία κυματίδια Μh με $\alpha=0.5, 1.0, 2.0$ και $b=0$ και β) Ενεργειακό φάσμα των τριών Μh

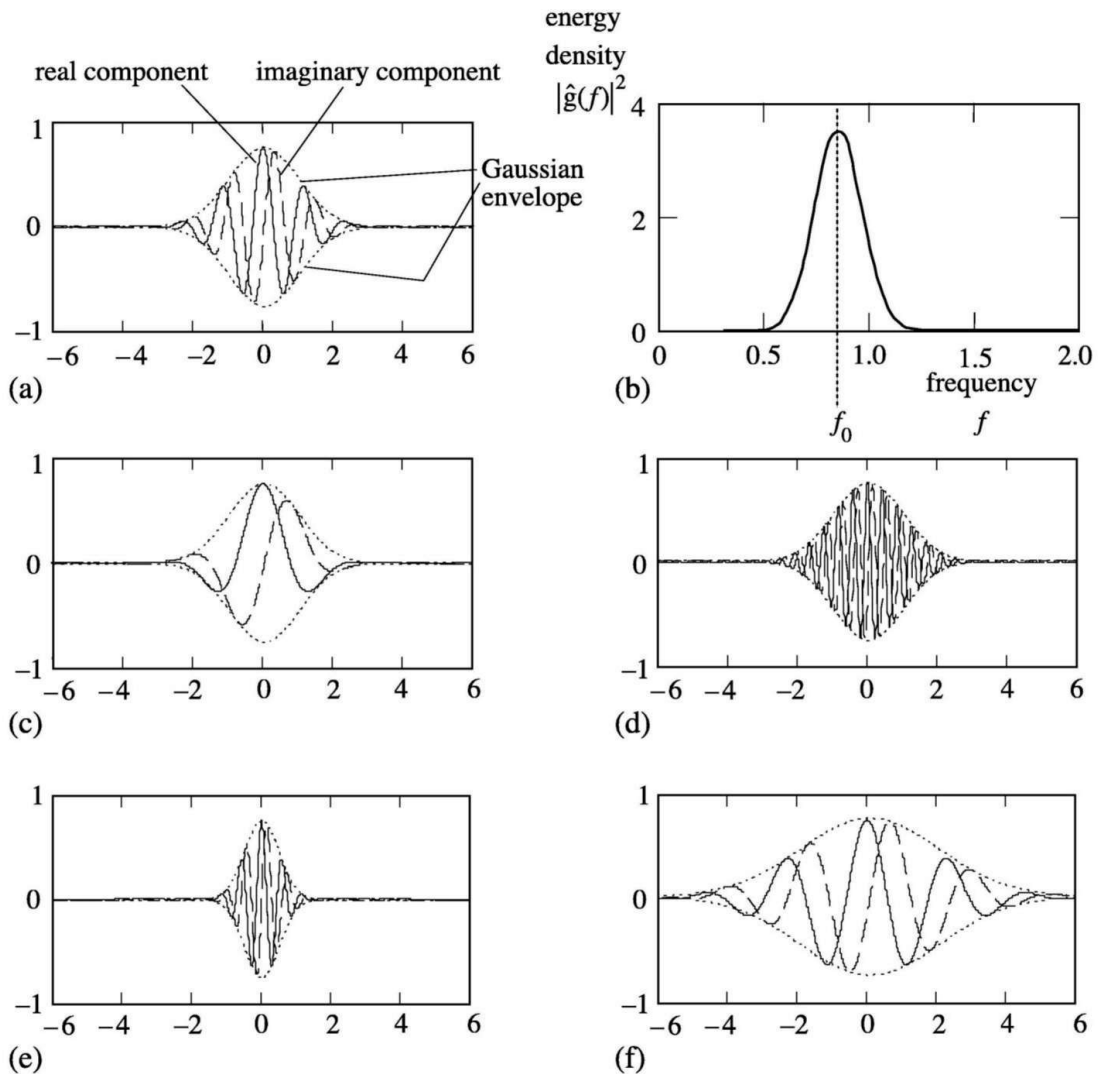
2.2.4 Μιγαδικά κυματίδια: Κυματίδιο Morlet

Μιγαδικά κυματίδια ονομάζονται τα κυματίδια τα οποία έχουν και πραγματικό και φανταστικό μέρος. Τα μιγαδικά κυματίδια έχουν μετασχηματισμούς Fourier των οποίων οι τιμές στις αρνητικές συχνότητες είναι μηδενικές. Χρησιμοποιώντας μιγαδικά κυματίδια, γίνεται δυνατός ο διαχωρισμός των φάσεων και των πλατών των συνιστωσών του σήματος. Το πιο κοινό μιγαδικό κυματίδιο είναι το Morlet του οποίου ο τύπος είναι:

$$\psi(t) = \frac{1}{\pi^{1/4}} \left[\exp(i2\pi f_o t) - \exp\left(\frac{-(2\pi f_o)^2}{2}\right) \right] \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) \quad (2.2.4)$$

όπου f_0 είναι η κεντρική συχνότητα του μητρικού κυματιδίου. Ο όρος μέσα στην αγκύλη είναι γνωστός ως όρος διόρθωσης. Για $f_0 \gg 0$ είναι αμελητέος και μπορεί να παραληφθεί.

Το κυματίδιο Morlet είναι ένα μιγαδικό κύμα μέσα σε μια περιβάλλουσα (envelope) Gaussian. Αυτό φαίνεται στο Σχ. 2.10 για διάφορες τιμές των f_0 και a . Σημειώνεται ότι το πραγματικό και φανταστικό ημιτονοειδές έχουν διαφορά φάσης $\pi/2$.



Σχ. 2.10: a)Κυματίδιο Morlet με $\alpha=1$, $f_0=0.849$ (αυτή η κεντρική συχνότητα χρησιμοποιείται συνήθως) b)Ενεργειακό φάσμα κυματιδίου Morlet c)Κυματίδιο Morlet με $\alpha=1$, $f_0=0.318$ d)Κυματίδιο Morlet με $\alpha=1$, $f_0=1.909$ e)Κυματίδιο Morlet με $\alpha=0.5$, $f_0=0.849$ και f)Κυματίδιο Morlet με $\alpha=2$, $f_0=0.849$

Για την διαστολή-συστολή και τη μεταφορά στο χρόνο του κυματιδίου Morlet, αντικαθίσταται στην εξίσωση (2.2.4) το t με $(t-b)/a$ όπου a και b οι γνωστές παράμετροι. Έτσι στο Σχ. 2.11 απεικονίζεται ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου ενός σήματος με κυματίδιο Morlet στις διάφορες μορφές στις οποίες δίνει τη δυνατότητα το μιγαδικό κυματίδιο. Βέβαια για την ανάλυση των σημάτων χρησιμοποιήθηκε το πραγματικό μέρος του μετασχηματισμού κυματιδίου. Αυτό έγινε:

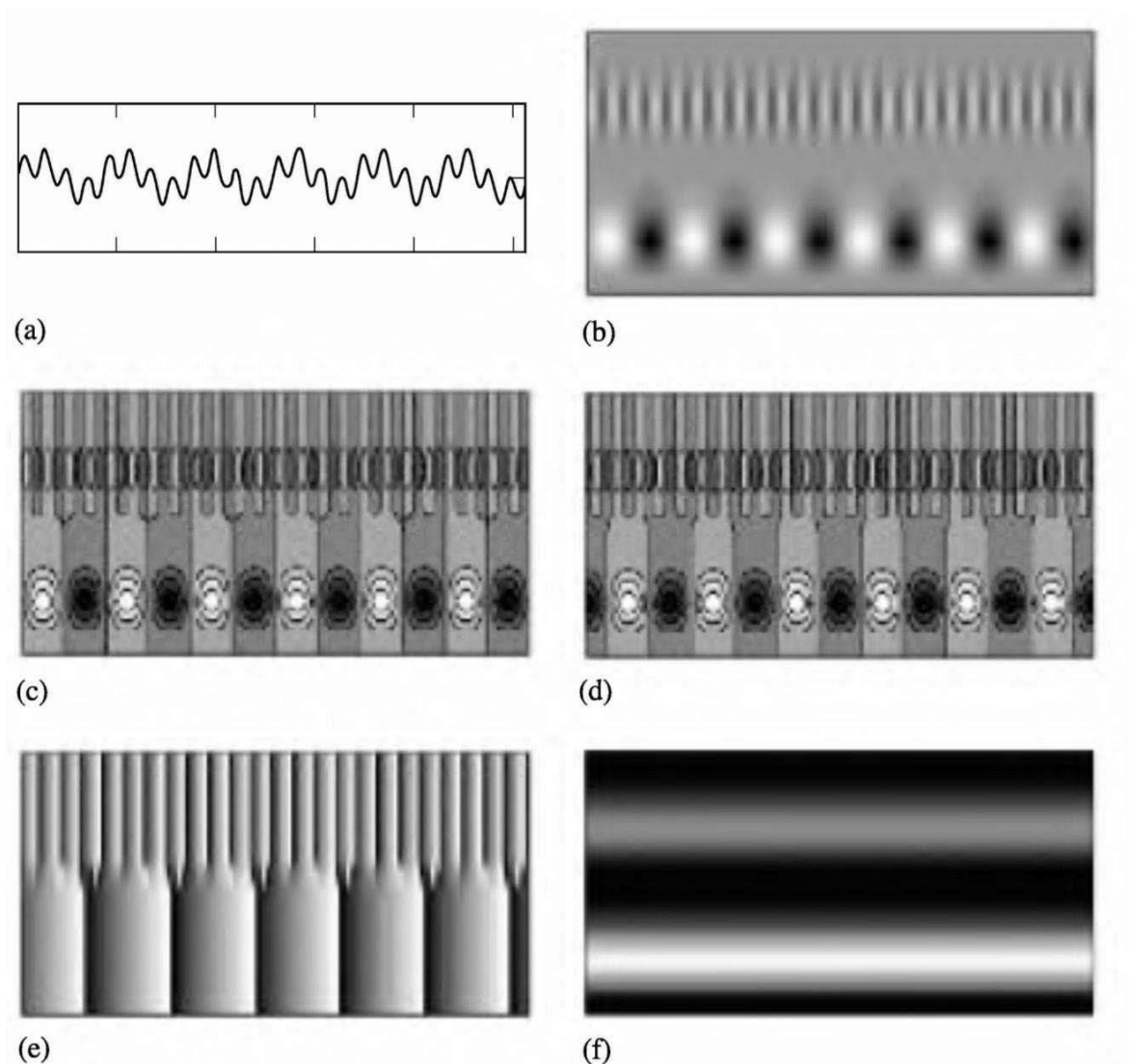
- Πρώτον, γιατί το φανταστικό μέρος του μετασχηματισμού (Σχ. 2.11(a)) είναι ουσιαστικά ίδιο με το πραγματικό, μετατοπισμένο κατά $\pi/2$, και
- δεύτερον, επειδή αν κι η απεικόνιση της φάσης και του μέτρου του μετασχηματισμού (Σχ. 2.11(ε))

και Σχ. 2.11(στ) αντίστοιχα) παρουσιάζουν ενδιαφέροντα αποτελέσματα, είναι δύσκολο να ερμηνευτούν σε περίπτωση πολύπλοκων σημάτων.

Η φάση και το μέτρο του μετασχηματισμού κυματιδίου είναι:

$$\varphi(\alpha, b) = \tan^{-1} \left(\frac{\Im(T(\alpha, b))}{\Re(T(\alpha, b))} \right) \quad (2.2.5)$$

$$T(\alpha, b) = \sqrt{[\Re(T(\alpha, b))]^2 + [\Im(T(\alpha, b))]^2} \quad (2.2.6)$$



Σχ. 2.11: α)Αρχικό σήμα, β)Πραγματικό μέρος του WT, δηλαδή $\Re(T(\alpha, b))$, γ)Πραγματικό μέρος του WT (αλλά διαφορετικό χρωματογράφημα), δ)Φανταστικό μέρος του WT, δηλαδή $\Im(T(\alpha, b))$ ε)Φάση του WT και στ)Μέτρο του WT

2.3. Complex Shift Morlet Wavelet (CSMW)

Το Complex Shift Morlet Wavelet (CSMW) ορίζεται χρονικά ως ένα αρμονικό κύμα συχνότητας f_c που έχει πολλαπλασιαστεί με ένα επίσης χρονικά ορισμένο παράθυρο τύπου Gauss.

$$Y(t) = ce^{-\sigma^2 t^2} e^{-j2\pi f_c t} \quad (2.3.1\alpha)$$

όπου το c είναι ένας θετικός ακεραίος. Οι παράμετροι του κύματος τυπικά επιλέγονται ως:

$$c = 2\sigma / \sqrt{\pi} \quad (2.3.1\beta)$$

$$f_c = \omega_c / 2\pi \quad (2.3.1\gamma)$$

$$f_b = \sigma \quad (2.3.1\delta)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω επιλογή της μεταβλητής c , ο Μετασχηματισμός Fourier του κύματος Morlet γίνεται:

$$\hat{Y}(f) = \hat{Y}^*(f) = 2e^{-\frac{\pi^2}{\sigma^2}(f-f_c)} \quad (2.3.2)$$

όπου $\hat{Y}(f)$ είναι μία σύνθετη σύζευξη των $\hat{Y}(f)$ και $\hat{Y}(f) = \hat{Y}^*(f)$, αφού το $\hat{Y}(f)$ ανήκει στους πραγματικούς αριθμούς \mathbf{IR} .

Το κύμα έχει την ίδια μορφή με ένα παράθυρο τύπου Gauss στο πεδίο της συχνότητας. Η συχνότητα που αποτελεί το κέντρο του παραθύρου ορίζεται από τη συχνότητα f_c της συμμετέχουσας αρμονικής και το πλάτος του παραθύρου ορίζεται από την παράμετρο σ .

Η κλιμάκωση του αρχικού κύματος ταυτόχρονα μετατοπίζει το σημείο εφαρμογής του παραθύρου Morlet καθώς κι επηρεάζει το ύψος του και τροποποιεί το πλάτος του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το εύρος του κύματος δεν είναι δυνατό να επιλεγθεί ανεξάρτητα από την κεντρική συχνότητα. Για αυτόν τον λόγο, αντί για κλιμάκωση του αρχικού σήματος, έχει προταθεί μόνο μετατόπισή του.

Για μία συγκεκριμένη επιλογή του ζεύγους κεντρικής συχνότητας και πλάτους, οι συντελεστές του κύματος ενός σήματος $x(t)$ είναι δυνατό να επιλεγθούν στο πεδίο του χρόνου μέσω του αποτελέσματος του πολλαπλασιασμού του Αντίστροφου Μετασχηματισμού Fourier του σήματος και του Μετασχηματισμού Fourier του, και του Μετασχηματισμού Fourier του κύματος:

$$W_{f_c, f_b}(t) = F^{-1} \left\{ X(f) \hat{Y}_{f_c, f_b}^*(f) \right\} \quad (2.3.3)$$

όπου το $X(f)$ είναι το αποτέλεσμα του Μετασχηματισμού Fourier του σήματος $x(t)$, το $F\{\}$ δηλώνει τον Μετασχηματισμό Fourier μίας συνάρτησης και το $F^{-1}\{\}$ δηλώνει τον Αντίστροφο Μετασχηματισμό Fourier.

Στην περίπτωση ενός απλού αρμονικού σήματος:

$$x(t) = A \cos(\omega t) \quad (2.3.4\alpha)$$

η εξίσωση (3) οδηγεί στο εξής σύνθετο σήμα $w(t)$ κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες:

$$w(t) = Ag \exp(j\omega t) \quad (2.3.4\beta)$$

$$g = \exp\left[-\left(\frac{\omega_c - \omega}{2\sigma}\right)^2\right] \quad (2.3.4\gamma)$$

Στην περίπτωση της επεξεργασίας ενός σήματος $x(t)$ που περιέχει αρμονικές συνιστώσες, P τον αριθμό:

$$x(t) = \sum_{i=1}^P A_k \cos(\omega_k t + \varphi_k) \quad (2.3.5)$$

μετά από αριθμού M CSMW οι εξισώσεις (2.3.4β) και (2.3.4γ) γίνονται:

$$w_i(t) = \sum_{k=1}^P A_k g_{ik} \exp[j(\omega_k t + \varphi_k)] \quad \text{για } i=1, 2, \dots, M \quad (2.3.6\alpha)$$

$$g_{ik} = \exp\left[-\left(\frac{\omega_{ci} - \omega_k}{2\sigma_i}\right)^2\right] \quad (2.3.6\beta)$$

Δηλώνοντας ως T τον ομοιόμορφο χρόνο δειγματοληψίας, η εξίσωση (2.3.6α) μπορεί επίσης να γραφεί για μία χρονική στιγμή $t_n = nT$, ως:

$$w_i(nT) = \sum_{k=1}^P g_{ik} s_k \quad (2.3.7\alpha)$$

$$s_k = A_k \exp(j\varphi_k) q_k^n \quad (2.3.7\beta)$$

ή στην εξής μορφή σύνθετου πίνακα:

$$w(n) = G \cdot s \quad (2.3.8\alpha)$$

$$[w(n)]_i = w_i(nT) \quad (2.3.8\beta)$$

$$[G]_{ik} = g_{ik} \quad (2.3.8\gamma)$$

$$[s]_k = s_k \quad (2.3.8\delta)$$

Για την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή $t_{n+1} = (n+1)T$, η εξίσωση (2.3.8α) γίνεται:

$$w(n+1) = G \cdot \Phi \cdot s \quad (2.3.9\alpha)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & q_r \end{bmatrix} \quad (2.3.9\beta)$$

$$q_k = \exp(j\omega_k T) \quad (2.3.9\gamma)$$

Μία προσεκτική παρατήρηση των εξισώσεων (2.3.8) και (2.3.9) αποκαλύπτει ότι είναι ακριβώς στην μορφή των εξισώσεων (2.3.9) και (2.3.10) του καθιερωμένου πλέον αλγόριθμου ESPRIT. Η βασική πρακτική αυτού του αλγόριθμου είναι να εκμεταλλευθεί την στροφική σταθερότητα του υποχώρου των σημάτων, με στόχο να οριστούν οι επιμέρους συχρότητες του σήματος μόνο από τις τιμές στην διαγώνιο του πίνακα Φ (Εξίσωση (2.3.9β)), ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες τιμές του σήματος.

Προς αυτήν την κατεύθυνση, πολλοί ικανοποιητικοί αλγόριθμοι έχουν καθιερωθεί εκ των οποίων ένα κλασικό παράδειγμα είναι ο αλγόριθμος TLS. Μία κατάλληλη προσαρμογή αυτού του αλγόριθμου στην συγκεκριμένη περίπτωση αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

1. Σε κάθε χρονική στιγμή $t_n = nT$ δημιουργείται ένας πίνακας δεδομένων Z διαστάσεων $2M \times N$.

$$Z = \begin{bmatrix} w(n-N-1) & w(n-N) & \cdots & w(N-k-1) & \cdots & w(n-1) \\ w(n-N) & w(n-N+1) & \cdots & w(N-k) & \cdots & w(n) \end{bmatrix} \quad (2.3.10)$$

2. Εκτελείται η αποσύνθεση των Singular Value του Z (Singular Value Decomposition, SVD). Το SVD έχει ως αποτέλεσμα έναν διαγώνιο πίνακα D του οποίου ο αριθμός των μη μηδενικών στοιχείων της διαγωνίου (τα Singular Value) υποδεικνύει τον αριθμό των αρμονικών συνιστωσών του σήματος.

$$\mathbf{Z} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{V}^T \quad (2.3.11)$$

όπου \mathbf{U} : $2M \times 2M$, \mathbf{D} : $2M \times N$, \mathbf{V} : $N \times N$

3. Επιλέγονται τα διανύσματα P του πίνακα \mathbf{U} που αντιστοιχούν στα μέγιστα Singular Value όπου:

$$\mathbf{U}_P = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_P] \quad (2.3.12)$$

4. Το $\underline{\mathbf{U}}$ διευθετείται ως εξής:

$$\mathbf{U}_P = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \end{bmatrix} \quad (2.3.13)$$

όπου: \mathbf{U}_1 : $M \times P$, \mathbf{U}_2 : $M \times P$

κι έτσι δημιουργείται ο πίνακας Ψ :

$$\Psi = (\mathbf{U}_1^H \mathbf{U}_1)^{-1} \mathbf{U}_1^H \mathbf{U}_2^H \quad (2.3.14)$$

5. Εκτελείται η ιδιο-ανάλυση του Ψ . Βάσει των ιδιοτήτων περιστροφικής σταθερότητας των πινάκων Φ και Ψ , οι ιδιοτιμές του Ψ είναι ίδιες με αυτές του Φ . Ως εκ τούτου, οι στιγμιαίες συχρότητες ω_i μπορούν να ανακτηθούν από την εξίσωση (2.3.9γ).

2.4 Στατιστικά Μοντέλα

Ένα στατιστικό μοντέλο είναι η τυποποίηση της σχέσης μεταξύ διαφόρων μεταβλητών με τη μορφή μαθηματικών εξισώσεων. Ένα στατιστικό μοντέλο περιγράφει πως μία ή περισσότερες τυχαίες μεταβλητές συσχετίζονται με μία ή περισσότερες άλλες μεταβλητές. Το μοντέλο είναι στατιστικό γιατί οι μεταβλητές δεν είναι νομοτελειακά αλλά στοχαστικά συσχετισμένες. Με μαθηματικούς όρους, ένα στατιστικό μοντέλο συχνά παρουσιάζεται σαν ένα ζεύγος (Y,P) όπου το Y είναι ένα σεν πιθανών παρατηρήσεων και το P είναι ένα σεν δυνατών κατανομών πιθανότητας του Y . Θεωρείται ότι υπάρχει ένα ξεχωριστό στοιχείο του P από το οποίο προκύπτουν τα καταγεγραμμένα δεδομένα. Τα στατιστικά συμπεράσματα επιτρέπουν τον εντοπισμό των στοιχείων του σεν που είναι περισσότερο πιθανό να είναι αληθή.

Ένα στατιστικό μοντέλο είναι μία συλλογή συναρτήσεων κατανομών πιθανοτήτων ή συναρτήσεων πυκνότητας πιθανοτήτων. Ένα παραμετρικό μοντέλο είναι μία συλλογή τέτοιων κατανομών στην κάθε μία από τις οποίες δίνεται ένας δείκτης μέσω μιας μοναδικής παραμέτρου πεπερασμένων διαστάσεων:

$$P = \{P_\theta : \theta \in \Theta\} \quad (2.4.1)$$

όπου το θ είναι μία παράμετρος και $\Theta \in \mathcal{R}^d$ είναι μία εφικτή περιοχή παραμέτρων η οποία είναι μία υποομάδα ενός Ευκλείδειου χώρου διαστάσεων αριθμού d . Ένα στατιστικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγραφούν ένα σεν κατανομών από τις οποίες υποτίθεται ότι έχει γίνει δειγματοληψία ενός συγκεκριμένου σεν δεδομένων. Για παράδειγμα αν θεωρηθεί ότι τα δεδομένα προκύπτουν από μία κατανομή τύπου Gauss μίας μοναδικής μεταβλητής τότε έχει θεωρηθεί το μοντέλο Gauss:

$$P = \left\{ P(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[\frac{-1}{2\sigma^2} (x - \mu)^2 \right] : \mu \in \mathcal{R}, \sigma > 0 \right\} \quad (2.4.2)$$

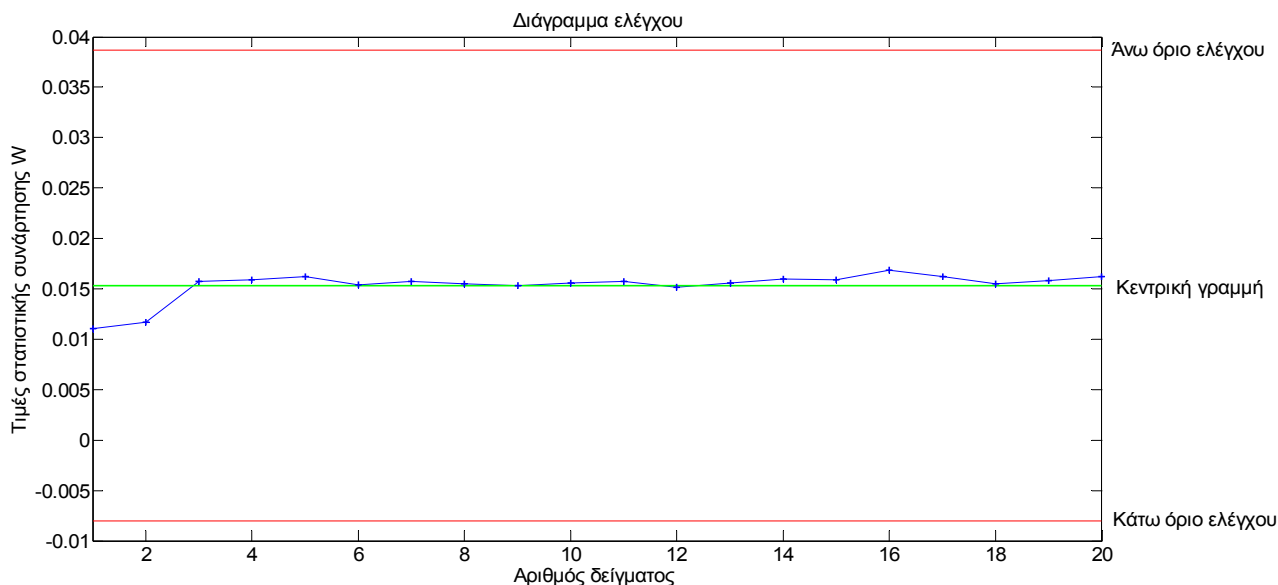
Ένα μη παραμετρικό μοντέλο είναι ένα σεν κατανομών πιθανοτήτων με απειροδιάστατες παραμέτρους. Ένα ημιπαραμετρικό μοντέλο επίσης έχει απειροδιάστατες παραμέτρους, αλλά δεν είναι πυκνό στο χώρο των κατανομών.

2.4.1 Τα στατιστικά μοντέλα στον έλεγχο δεδομένων

Πολύ σημαντική είναι η παρακολούθηση της συμπεριφοράς μιας κρίσιμης ποσότητας ενός (μετρήσιμου) χαρακτηριστικού X (τυχαία μεταβλητή) μίας ομάδας δειγμάτων (για παράδειγμα το χαρακτηριστικό X μπορεί να είναι το βάρος, ο όγκος προϊόντων, κ.τ.λ.). Η παρακολούθηση της κρίσιμης ποσότητας βασίζεται σε μετρήσεις του χαρακτηριστικού X (τυχαία μεταβλητή), έστω τα X_1, X_2, \dots

Χρησιμοποιώντας τα δείγματα X_1, X_2, \dots υπολογίζεται η τιμή $W_i = g(X_i)$ όπου $i=1, 2, \dots$ μιας κατάλληλης στατιστικής συνάρτησης (τυχαίας μεταβλητής) που εκτιμά (συνήθως αμερόληπτη εκτιμήτρια) την κρίσιμη ποσότητα που μας ενδιαφέρει (π.χ. μέση τιμή ή διακύμανση της X). Έτσι η (διαχρονική) παρακολούθηση της συμπεριφοράς της κρίσιμης ποσότητας επιτυγχάνεται με την παρακολούθηση των τιμών που λαμβάνει η στατιστική συνάρτηση W στα διάφορα δείγματα.

Για παράδειγμα, ένα τυπικό διάγραμμα ελέγχου Shewhart είναι μία γραφική παράσταση με την ακόλουθη μορφή (Σχ. 2.12):



Σχ. 2.12: Διάγραμμα ελέγχου Shewhart

Στο παραπάνω σχήμα, εκτός από τις παρατηρούμενες τιμές της W που έχουν παρασταθεί με σημεία τα οποία έχουν συνδεθεί με μια τεθλασμένη γραμμή, έχουν σχεδιαστεί κι άλλες τρεις γραμμές. Η κεντρική γραμμή (center line, CL) ή μέσο επίπεδο της διεργασίας παριστάνει συνήθως τη μέση τιμή (mean value) της W όπως αυτή προκύπτει από τη λειτουργία μιας εντός ελέγχου διεργασίας ή την τιμή στόχο του προϊόντος.

Οι δύο ακραίες γραμμές που εμφανίζονται ονομάζονται άνω και κάτω όρια ελέγχου (upper and lower control limits, UCL and LCL). Όσο οι τιμές (σημεία, δεδομένα) της W εμφανίζονται εντός των ορίων ελέγχου κι η συμπεριφορά τους είναι «τυχαία» μπορούμε να υποθέσουμε ότι η διεργασία παραμένει εντός ελέγχου (για την ακρίβεια εντός στατιστικού ελέγχου) και δεν χρειάζεται να προβούμε σε κάποια διορθωτική ενέργεια.

Αν όμως κάποιο σημείο βρεθεί εκτός των ορίων ελέγχου λέμε ότι υπάρχει ένδειξη ότι η διεργασία είναι εκτός ελέγχου οπότε αντιμετωπίζουμε κατάσταση συναγερμού (alarm) και πρέπει να προχωρήσουμε σε έρευνα για να ανακαλύψουμε τις ειδικές αιτίες μεταβλητότητας που είναι υπεύθυνες για αυτή τη συμπεριφορά κι αν κριθεί απαραίτητο να προβούμε σε διορθωτικές ενέργειες.

Για να αναλυθούν στατιστικά τα πειραματικά αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν οι εξής δύο στατιστικές μέθοδοι: Η μέθοδος διαγράμματος μέσης τιμής και τυπικής αποκλισης (\bar{X}) κι η μέθοδος διαγράμματος εκθετικού βαρυκεντρικού κινούμενου μέσου (X_{EWMA}).

2.4.2 Μέθοδος \bar{X}_{bar}

Σε βιομηχανικής εφαρμογής στατιστικές μετρήσεις, συχνά χρησιμοποιείται το διάγραμμα \bar{X}_{bar} ώστε να είναι δυνατή η παράκολουθηση του μέσου όρου διαδοχικών δειγμάτων σταθερού μεγέθους, n . Αυτός ο τύπος γραφήματος ελέγχου χρησιμοποιείται για χαρακτηριστικά που μπορούν να μετρηθούν σε συνεχή κλίμακα, όπως το βάρος, η θερμοκρασία, κ.τ.λ.

Η μέθοδος \bar{X}_{bar} πάντα χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ένα διάγραμμα μεταβολής, όπως το διάγραμμα μέσης τιμής και διακύμανσης ή το διάγραμμα μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης. Το διάγραμμα μέσης τιμής και διακύμανσης δείχνει τα διάφορα εύρη μεταξύ των δειγμάτων, ενώ το διάγραμμα μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης δείχνει την τυπική απόκλιση των δειγμάτων.

Γενικά, παρόλο που το διάγραμμα μέσης τιμής και διακύμανσης είναι μία απλή, σύντομη κι οικονομική μέθοδος, το διάγραμμα μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης προτιμάται γιατί είναι σαφώς πιο αξιόπιστος δείκτης για την διακύμανση μιας διαδικασίας και τα συμπεράσματα που εξάγονται από την μελέτη του αντίστοιχου διαγράμματος είναι πιο ασφαλή. Παράλληλα, η μέθοδος διαγραμμάτων μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης ενδείκνυται για αριθμό δειγμάτων μεγαλύτερο του 10 σε αντίθεση με την μέθοδο διαγραμμάτων μέσης τιμής και διακύμανσης.

Γενικά, η εκάστοτε τιμή $X_{\bar{bar}}(n+1)$ της μεθόδου διαγράμματος μέσης τιμής και διακύμανσης, $X_{\bar{bar}}$ για κάθε -αντίστοιχη- μέτρηση/τιμή ελέγχου δίνεται από τον τύπο:

$$X_{\bar{bar}}(n+1) = \frac{SV_{total}(n) + SV_{total}(n+1)}{2} \quad (2.4.3)$$

Δηλαδή, η εκάστοτε τιμή $X_{\bar{bar}}(n+1)$ δεν εξαρτάται μόνο από την αντίστοιχη τιμή ελέγχου $SV_{total}(n+1)$, αλλά κι από την αμέσως προηγούμενη της $SV_{total}(n)$.

Πριν από οποιονδήποτε υπολογισμό είναι απαραίτητο να υπολογιστούν η μέση τιμή, μ και η τυπική απόκλιση, σ του συνόλου των δειγμάτων ελέγχου.

Τελικά, αφού καταγραφούν οι τιμές $X_{\bar{bar}}$ για όλο το πλήθος των δειγμάτων μπορούν πλέον να υπολογιστούν και τα αποδεκτά όρια. Το ανώτερο όριο ελέγχου, UCL και το κατώτερο όριο ελέγχου, LCL δίνονται από τις εξισώσεις:

$$UCL = \mu + 3\sigma \quad \text{και} \quad (2.4.4)$$

$$LCL = \mu - 3\sigma \quad (2.4.5)$$

2.4.3 Μέθοδος X_{EWMA}

Η μέθοδος διαγράμματος εκθετικού βαρυκεντρικού κινούμενου μέσου είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη καθώς ανταποκρίνεται ακόμη και σε μικρές μόνο αλλαγές του μέσου, και για αυτόν τον λόγο, απολύτως κατάλληλη για την ανίχνευση συστηματικών σφαλμάτων κι ιδιαίτερα των μικρών συστηματικών σφαλμάτων που συνήθως περνούν απαρατήρητα. Το διάγραμμα EWMA περιγράφηκε για πρώτη φορά το 1959 κι από τότε χρησιμοποιήθηκε ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές. Με το διάγραμμα αυτό μπορούν να εντοπιστούν διεργασίες που δεν έχουν σχεδιαστεί σωστά κι οι οποίες, ενώ είναι εντός ελέγχου, ανταποκρίνονται σε χαμηλά επίπεδα ποιότητας, δηλαδή εμφανίζουν πολύ μεγάλη ενδογενή μεταβλητότητα.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου EWMA είναι ότι είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στις αποκλίσεις της κατανομής του ποιοτικού χαρακτηριστικού που μελετάται, από την κανονική, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό, σε σύνολο δεδομένων που δεν είναι κανονικά κατανομημένα.

Η μέθοδος EWMA καταγράφει την χρονική εξέλιξη μίας τιμής ελέγχου μίας ομάδας δειγμάτων, δίνοντας όλο και περισσότερη έμφαση στα πλέον πρόσφατα δείγματα. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές ανά πάσα στιγμή είναι εκθετικά σταθμισμένοι μέσοι όροι όλων των προηγούμενων μετρήσεων/τιμών ελέγχου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στο διάγραμμα EWMA δεν χρησιμοποιείται η ίδια η τιμή ελέγχου (μέσος όρος των δύο πλέον πρόσφατων SV_{total}), αντίθετα οι τιμές ελέγχου μετασχηματίζονται σε τιμές X_{EWMA} σύμφωνα με την εξίσωση:

$$X_{EWMA}(n+1) = w \frac{SV_{total}(n) + SV_{total}(n+1)}{2} + (1-w) X_{EWMA}(n) \quad (2.4.6)$$

Δηλαδή, η εκάστοτε τιμή $X_{EWMA(n+1)}$ δεν εξαρτάται μόνο από τον μέσο όρο των δύο πλέον πρόσφατων SV_{total} , αντίθετα εξαρτάται από όλες τις X_{EWMA} τιμές που προηγήθηκαν. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται εξομάλυνση (smoothing).

Ο συντελεστής που καθορίζει την εξάρτηση κάθε τιμής $X_{EWMA(n+1)}$ από τις προηγούμενες ονομάζεται συντελεστής βαρύτητας (weighting factor), συμβολίζεται με το λατινικό γράμμα w και παίρνει τιμές από 0 έως και 1 ($0 < w \leq 1$).

Στην διαδικασία εξομάλυνσης οφείλεται η δυνατότητα του διαγράμματος EWMA να ανιχνεύει μικρές μετατοπίσεις ή εκτροπές των τιμών ελέγχου γύρω από την τιμή στόχο, δηλαδή συστηματικά σφάλματα.

Η κατασκευή του διαγράμματος EWMA απαιτεί την συνεχή επίλυση πολύπλοκων εξισώσεων. Πριν από οποιονδήποτε υπολογισμό είναι απαραίτητο να υπολογιστούν η μέση τιμή, μ και η τυπική απόκλιση, σ των δειγμάτων ελέγχου. Οι τιμές των δειγμάτων ελέγχου τοποθετούνται στο διάγραμμα EWMA ως τιμές $X_{EWMA(n+1)}$ οι οποίες υπολογίζονται από την εξίσωση (2.4.6). Η πρώτη τιμή της εξίσωσης (2.4.6), δηλαδή η τιμή $X_{EWMA(0)}$ ισούται με την μέση τιμή, μ των δειγμάτων ελέγχου κι είναι η τιμή-στόχος των ορίων ελέγχου, CL (Central Limit).

Τελικά, αφού καταγραφούν οι τιμές X_{EWMA} για όλο το πλήθος των δειγμάτων μπορούν πλέον να υπολογιστούν και τα αποδεκτά όρια. Το ανώτερο όριο ελέγχου, UCL και το κατώτερο όριο ελέγχου, LCL δίνονται από τις εξισώσεις:

$$UCL = \mu + 3\sigma \sqrt{\frac{w}{2-w}} \quad \text{και} \quad (2.4.7)$$

$$LCL = \mu - 3\sigma \sqrt{\frac{w}{2-w}} \quad (2.4.8)$$

Ο συντελεστής βαρύτητας w καθορίζει την εξομάλυνση του μέσου όρου των δύο πλέον πρόσφατων SV_{total} . Η εξομάλυνση είναι μία διαδικασία απαλοιφής των διαφορών μεταξύ των τιμών ελέγχου κι η μετατροπή τους σε τιμές όσο το δυνατόν εγγύτερες προς την κεντρική τιμή CL. Ανάλογα με την τιμή του w υπάρχει μικρή ή μεγάλη εξομάλυνση κατά την οποία οι τιμές $X_{EWMA(n)}$ εξαρτώνται περισσότερο ή λιγότερο από τις προηγούμενες τιμές ελέγχου. Π.χ. όταν $w=0,3$ η τιμή $X_{EWMA(n+1)}$ εξαρτάται κατά 30% από την τρέχουσα τιμή και κατά 70% από τις προηγούμενες. Κατά συνέπεια η επιλογή του w έχει μεγάλη επίδραση στην μορφή του διαγράμματος EWMA.

3. Περιγραφή Μεθόδου

Στην παρούσα εργασία γίνεται επεξεργασία και στατιστική ανάλυση δύο ομάδων δεδομένων τα οποία έχουν καταγραφεί από τα ρουλεμάν ενός άξονα μηχανής. Η μέθοδος που ακολουθείται αποτελείται από δύο μέρη:

- Την εξαγωγή των χαρακτηριστικών παραμέτρων και
- την εκπαίδευση του συστήματος κι ανίχνευση βλάβης

Το πρώτο μέρος αποτελεί απλά την καταγραφή των σημάτων της μηχανής κι ανάλυσής τους ώστε να μετατραπούν στην επιθυμητή μορφή. Έπειτα, μέσω αυτής της νέας μορφής, είναι δυνατό να εξαχθούν ορισμένες χαρακτηριστικές παράμετροι οι οποίες δίνουν ζωτικής σημασίας πληροφορίες για το σήμα από το οποίο προέκυψαν.

Στο δεύτερο μέρος, με βάση τα αποτελέσματα των σημάτων που είναι γνωστό ότι καταγράφηκαν όταν ακόμα δεν είχε εμφανιστεί κανένα σφάλμα στην μηχανή, γίνεται η εκπαίδευση του συστήματος. Αυτό έχει, θεωρητικά, ως αποτέλεσμα την ικανότητα του συστήματος να αναγνωρίσει αν ένα μετέπειτα σήμα που προέρχεται από τη μηχανή, υποδεικνύει εμφάνιση ή όχι βλάβης. Εισάγοντας τα υπόλοιπα αναλυμένα σήματα των σετ δεδομένων, εξετάζεται η απόδοση του συστήματος κι αν τελικά αν όντως μπορεί το σύστημα να ανιχνεύσει εγκαίρως μία βλάβη.

3.1 Εξαγωγή χαρακτηριστικών παραμέτρων

Στο Σχ. 3.1 φαίνεται η διαδικασία που ακολουθείται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των σημάτων.

Αρχικά, αφού γίνει καταγραφή των κραδασμών της μηχανής για κάποιο ορισμένο χρονικό διάστημα, αναλύεται το σήμα που προκύπτει κι υπολογίζονται η συχνότητα περιστροφής του άξονα, f_{shaft} κι οι θεωρητικές τιμές των βλαβών σε εσωτερικό δακτύλιο ρουλεμάν, BPFI^{TH} κι εξωτερικό δακτύλιο ρουλεμάν, BPFO^{TH} . Οι συχνότητες αυτές είναι απαραίτητες ώστε να λάβει χώρα το πρώτο βήμα της διαδικασίας, η μορφολογική ανάλυση.

Για την μορφολογική ανάλυση δύο συντελεστές είναι σημαντικοί: Ο μορφολογικός τελεστής και το δομικό στοιχείο (Structural Element, SE). Πρακτικά, οι μορφολογικοί τελεστές επιλέγονται ανάλογα με την περίπτωση της ανάλυσης σήματος.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση (ανάλυση κραδασμικού σήματος), για να είναι εύκολο να ανιχνευθούν οι ακμές, ενισχύονται οι μεταβολές στην πυκνότητα του σήματος χρησιμοποιώντας διαβαθμισμένους τελεστές. Οι μορφολογικές διαβαθμίσεις είναι μορφολογικοί τελεστές που ενισχύουν την ένταση των pixel σε μία περιοχή ορισμένη από το δομικό στοιχείο.

Συγκεκριμένα, ο τελεστής Beucher είναι ένας βασικός διαβαθμισμένος μορφολογικός τελεστής ορισμένος ως η διαφορά του τελεστή διαστολής από τον τελεστή διάβρωσης του δομικού στοιχείου B και συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα ρ :

$$\rho_B = dil_B - er_B \quad (3.1.1)$$

Αυτός ο τελεστής εξάγει τη μέγιστη μεταβολή της έντασης του γκρι μέσα στην περιοχή που οριοθετείται από το δομικό στοιχείο κι όχι από την τοπική κλίση.

Το δομικό στοιχείο είναι επίσης ένας πολύ σημαντικός μορφολογικός τελεστής που παίζει καθοριστικό ρόλο στην ανάλυση του σήματος. Γενικά, το σήμα θα διατηρηθεί μόνο όταν η κλίμακα και το σχήμα του ταιριάζουν με αυτά του δομικού στοιχείου. Για αυτόν τον λόγο, το σχήμα, το μήκος (domain) και

το ύψος (amplitude) του δομικού στοιχείου πρέπει να επιλεγθούν ανάλογα με το σήμα που πρόκειται να αναλυθεί.

Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται επίπεδα δομικά στοιχεία (ύψος=1). Επιλέχθηκαν γιατί έχει ήδη δείχθει ότι το σχήμα του δομικού στοιχείου έχει μικρή επίδραση στην ανάλυση κι είναι από τα πλέον απλά δομικά στοιχεία. Με τα δομικά στοιχεία επίπεδα, η μόνη παράμετρος που απομένει να επιλεγθεί είναι το μήκος, L το οποίο είναι πολύ κρίσιμο: Όσο πιο μικρό είναι το μήκος του δομικού στοιχείου, τόσο περισσότερα κρουστικά χαρακτηριστικά θα ληφθούν από το σήμα όμως παράλληλα, ο περισσότερος θόρυβος θα διατηρηθεί. Αντίστοιχα, όσο πιο μεγάλο επιλεγθεί το μήκος του δομικού στοιχείου, τόσο λιγότερα κρουστικά χαρακτηριστικά θα εξαχθούν από το σήμα κι άρα πολλά χρήσιμα δεδομένα θα χαθούν. Τελικά, για την επιλογή του μήκους του δομικού στοιχείου επιλέχθηκε ως κριτήριο η κύρτωση.

Γενικά, το κάθε καταγεγραμμένο σήμα πέρασε από μορφολογικό φιλτράρισμα με 10 διαφορετικά δομικά στοιχεία με τα μήκη τους να απέχουν κατά 10% από τις τιμές των επαλαμβανόμενων παλμών. Η τιμή των επαναλαμβανόμενων παλμών, T είναι η περίοδος του παλμού είτε της βλάβης στον εσωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν είτε της βλάβης στον εξωτερικό δακτύλιο ρουλεμάν. Έπειτα, υπολογίστηκε η κύρτωση του κάθε μορφολογικά φιλτραρισμένου σήματος. Οι τιμές της κύρτωσης δίνουν μία κατά προσέγγιση εκτίμηση των κορυφών που υπάρχουν στο σήμα. Ως εκ τούτου, η μέγιστη τιμή της κύρτωσης υποδηλώνει το σήμα με τον μέγιστο αριθμό κορυφών που με τη σειρά του υποδηλώνει ότι μπορεί να υπάρχει βλάβη στην μηχανή, οπότε, το σήμα με την μέγιστη τιμή κύρτωσης επιλέγεται για περαιτέρω ανάλυση. Πρέπει να σημειωθεί ότι αν δύο τιμές κύρτωσης είναι ίσες, τότε οποιοδήποτε μήκος δομικού στοιχείου μπορεί να επιλεγθεί.

Το μήκος του δομικού στοιχείου, που δίνει τη μέγιστη τιμή της κύρτωσης, θα αλλάξει ανάλογα με το σήμα, τον μορφολογικό φορέα και την συχνότητα βλάβης. Ως εκ τούτου, το κριτήριο της κύρτωσης θα ελεγχθεί ξεχωριστά:

- Για κάθε σήμα,
- για κάθε φορέα ανάλυσης και
- για κάθε βλάβη (εξωτερικού ή εσωτερικού δακτυλίου ρουλεμάν) που πρέπει να εντοπιστεί.

Τελικά, με την μορφολογική ανάλυση προκύπτει μια νέα κυματομορφή κι ένα νέο φάσμα πλάτους-συχνότητας με μέγιστη συχνότητα τα 1000Hz, σε αντίθεση με τα συνήθη φάσματα πλάτους-συχνότητας.

Στο επόμενο βήμα της επεξεργασίας των σημάτων που ακολουθήθηκε, οι περιοχές εύρους 20 Hz με κέντρο τις δύο θεωρητικές συχνότητες, $BPF1^{TH}$ και $BPF0^{TH}$ σαρώνονται από δύο παράθυρα Morlet με πλάτος που δίνεται από την σχέση:

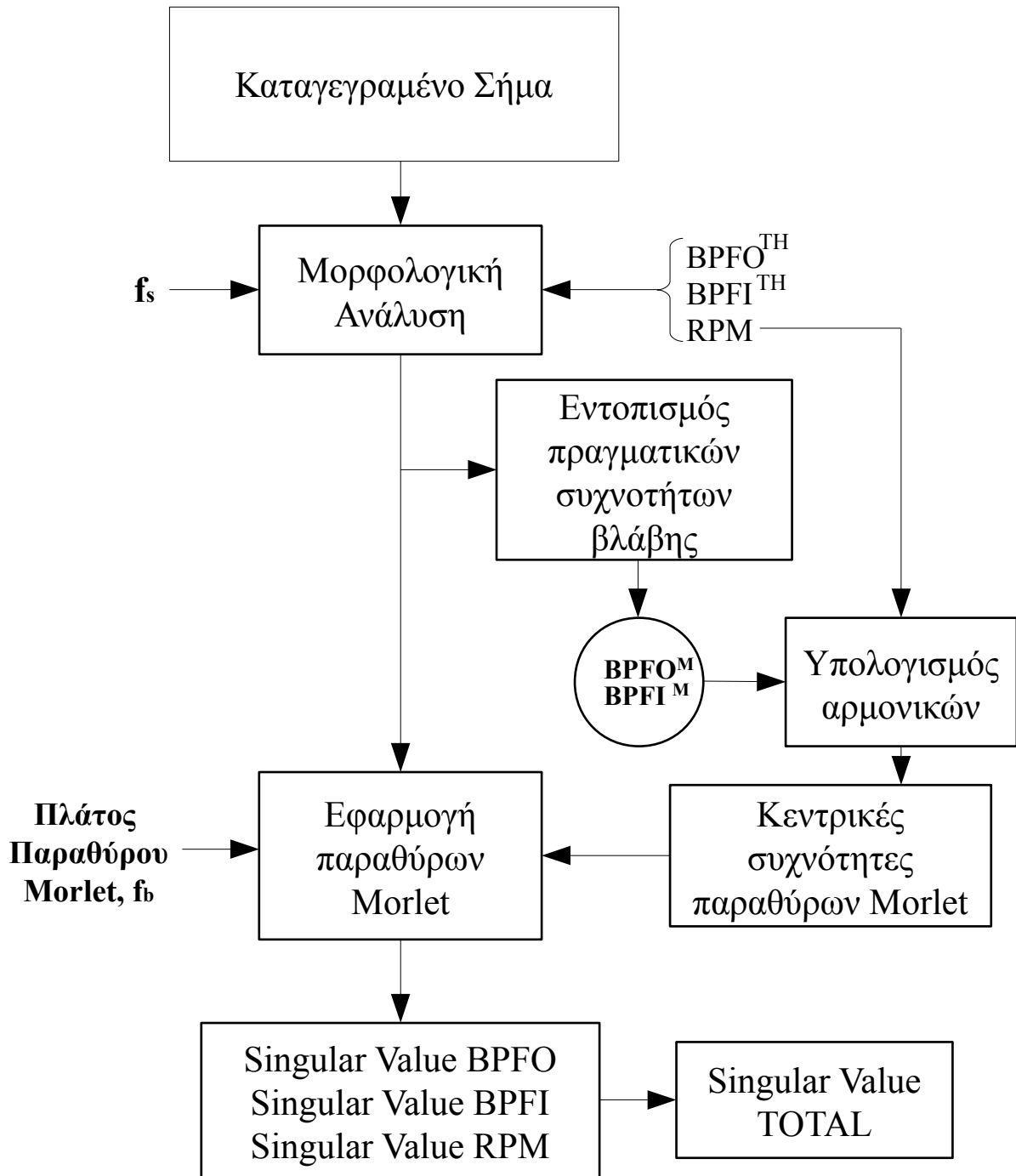
$$f_b = Ndf \quad (3.1.2)$$

Το βήμα με το οποίο τα παράθυρα σαρώνουν την περιοχή ισούται με df δηλαδή με την συχνότητα δειγματοληψίας προς το πλήθος των δειγμάτων. Για κάθε βήμα του παραθύρου Morlet υπολογίζεται ο μέσος όρος του Singular Value. Η συχνότητα στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη τιμή, θεωρείται ότι είναι κι η πραγματική συχνότητα βλάβης. Αυτό το βήμα της διαδικασίας λαμβάνει χώρα γιατί οι θεωρητικές συχνότητες συνήθως δεν ταυτίζονται με τις πραγματικές, ωστόσο σπάνια απέχουν περισσότερο από 10 Hz.

Με βάση τις γνωστές πλέον πραγματικές συχνότητες βλάβης εσωτερικού κι εξωτερικού δακτυλίου, υπολογίζονται κι όλες οι αρμονικές τους που δεν ξεπερνούν τα 1000 Hz.

Επίσης, υπολογίζονται οι δύο πρώτες αρμονικές της συχνότητας περιστροφής του άξονα, RPM και 2RPM.

Ύστερα, πάνω στο μορφολογικό φάσμα, εφαρμόζονται όσα χρειαστεί τον αριθμό παράθυρα Morlet. Το κάθε παράθυρο θα έχει κέντρο μία συχνότητα από τις υπολογισμένες πλέον αρμονικές των συχνοτήτων βλάβης εσωτερικού κι εξωτερικού δακτυλίου ρουλεμάν και τις δύο πρώτες αρμονικές περιστροφής του άξονα. Και πάλι, το πλάτος των παραθύρων Morlet δίνεται από τη σχέση (3.1.2).



Σχ. 3.1: Διάγραμμα καινοτόμου εξαγωγής παραμέτρων

Από κάθε παράθυρο Morlet προκύπτει μία αντίστοιχη τιμή Singular Value. Τελικά, τα Singular Value των αντίστοιχων παραθύρων θα προστεθούν μεταξύ τους για να προκύψουν τα επιμέρους Singular Value BPFO, Singular Value BPFI και Singular Value RPM. Συγκεκριμένα:

- Από τα παράθυρα Morlet που έχουν εφαρμοστεί στις αρμονικές της BPFO προκύπτουν τα -ισάριθμα- Singular Value. Το συνολικό άθροισμα αυτών των τιμών είναι το Singular Value BPFO.
- Από τα παράθυρα Morlet που έχουν εφαρμοστεί στις αρμονικές της BPFI προκύπτουν τα -ισάριθμα- Singular Value. Το συνολικό άθροισμα αυτών των τιμών είναι το Singular Value BPFI.

- Παράλληλα, υπολογίζονται και τα Singular Value της συχνότητας περιστροφής του άξονα και της δεύτερης αρμονικής της. Το άθροισμα των δύο αυτών τιμών είναι η τιμή Singular Value RPM.

Τελικά, το σύνολο των επιμέρους Singular Value προστίθεται και προκύπτει το ολικό Singular Value, Singular Value TOTAL.

Πρέπει να σημειωθεί, ότι τα επιμέρους Singular Value (Singular Value BPFO, Singular Value BPF1 και Singular Value RPM) παρέχουν πολύ σημαντικές πληροφορίες για το σύνολο των αρμονικών από τις οποίες προκύπτουν.

3.2 Εκπαίδευση του συστήματος κι εντοπισμός βλάβης

Αρχικά, για κάθε νέο σήμα που καταγράφεται, υπολογίζονται τα επιμέρους Singular Value (BPFO, BPF1 και RPM) και το σύνολό τους, Singular Value TOTAL όπως φαίνεται στο Σχ. 3.1 (καινοτόμος εξαγωγή παραμέτρων). Με βάση την νέα ολική τιμή Singular Value και τα Singular Value TOTAL των προηγούμενων σημάτων, υπολογίζονται τα εκάστοτε X_{bar} και X_{EWMA} και επανυπολογίζονται τα αποδεκτά όρια τους, UCL και LCL. Όταν αυτή η διαδικασία έχει λάβει χώρα για όλα τα σήματα που συμμετέχουν στην εκπαίδευση, τότε το σύστημα είναι θεωρητικά εκπαιδευμένο κι έτοιμο να εξετάσει αν τα επόμενα σήματα που θα καταγραφούν υποδεικνύουν βλάβη στην μηχανή ή όχι.

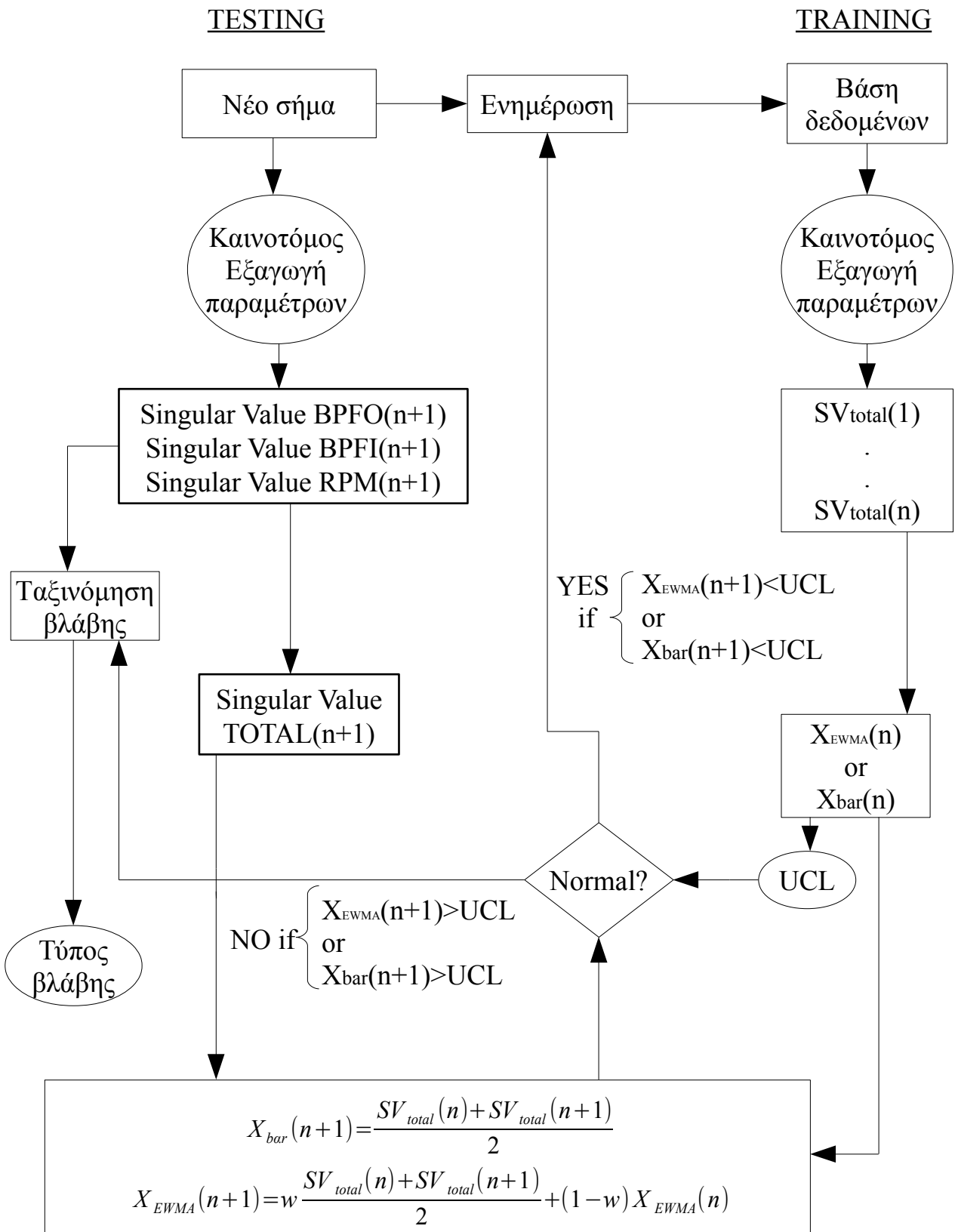
Ύστερα από το πέρας της εκπαίδευσής του, το σύστημα -όπως πάντα- υπολογίζει τα επιμέρους και το ολικό Singular Value του νέου σήματος, καθώς και τις στατιστικές τιμές του, X_{bar} και X_{EWMA} .

- Αν οι στατιστικές τιμές του σήματος, X_{bar} και X_{EWMA} είναι εντός των αποδεκτών ορίων UCL και LCL, τότε το σύστημα θεωρεί ότι η μηχανή δεν έχει παρουσιάσει βλάβη.
- Αν, αντίθετα, οι στατιστικές τιμές του σήματος, X_{bar} και X_{EWMA} είναι εκτός των αποδεκτών ορίων UCL και LCL, τότε το σύστημα θεωρεί ότι η μηχανή έχει παρουσιάσει βλάβη.

Στην περίπτωση που η μηχανή θεωρηθεί ότι δεν έχει παρουσιάσει βλάβη (δηλαδή οι τιμές X_{bar} και X_{EWMA} βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων) τότε οι νέες στατιστικές τιμές συμμετέχουν σε εκ νέου προσδιορισμό των αποδεκτών ορίων UCL και LCL. Έτσι, επιτυγχάνεται η συνεχής ενημέρωση του συστήματος.

Στην περίπτωση που θεωρηθεί ότι το σήμα που μόλις εξετάστηκε, υποδεικνύει ύπαρξη βλάβης, τότε το σύστημα προχωρά και στην ταξινόμησή της. Αυτό θα γίνει συγκρίνοντας την επιμέρους τιμή Singular Value BPFO με το άθροισμα των επιμέρους τιμών Singular Value BPF1 συν Singular Value RPM. Αν το άθροισμα είναι μεγαλύτερο από το Singular Value BPFO, τότε θεωρείται ότι η βλάβη έχει εμφανιστεί στον εσωτερικό δακτύλιο των ρουλεμάν της μηχανής. Αντίστοιχα, αν το άθροισμα είναι μικρότερο από την τιμή Singular Value BPFO, τότε θεωρείται ότι η βλάβη έχει εμφανιστεί στον εξωτερικό δακτύλιο των ρουλεμάν της μηχανής.

Η όλη διαδικασία που ακολουθείται κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης του συστήματος και της προσπάθειας ανίχνευσης οιασδήποτε βλάβης φαίνεται στο Σχ. 3.2



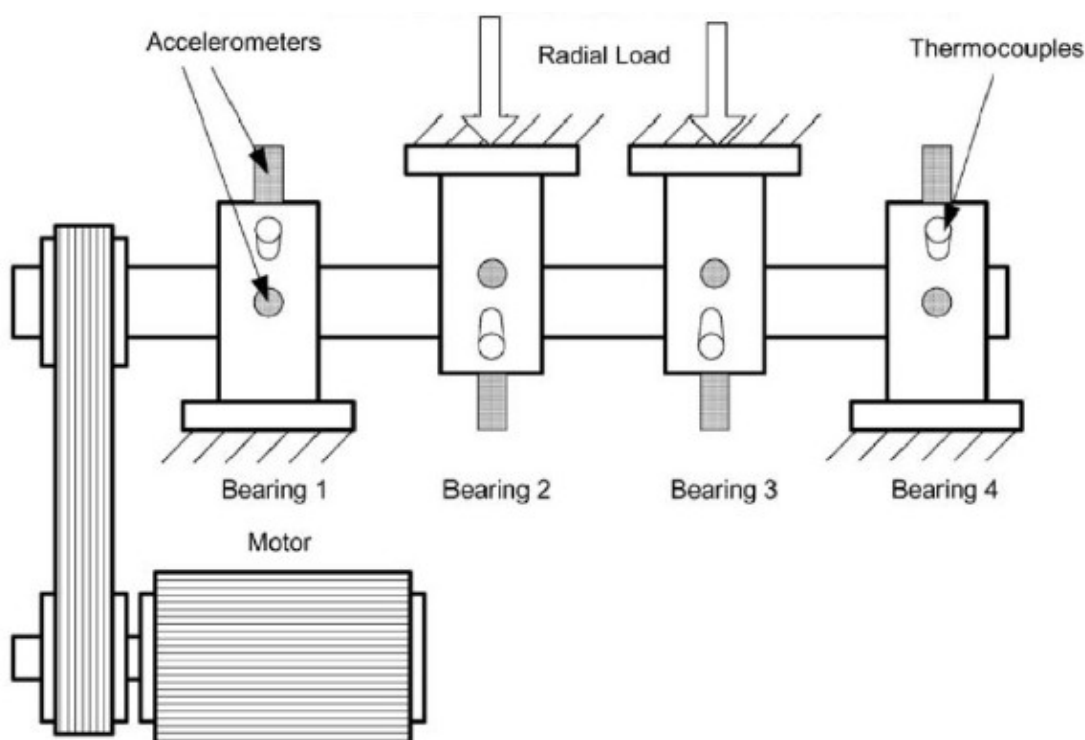
Σχ. 3.2: Διάγραμμα εκπαίδευσης συστήματος και διαδικασίας ανίχνευσης βλάβης

4. Πειραματική εφαρμογή

4.1. Περιγραφή του πειράματος

4.1.1 Εγκατάσταση

Η εγκατάσταση του πειράματος φαίνεται στο Σχ. 4.1. Πρόκειται για έναν άξονα πάνω στον οποίο έχουν συνδεθεί τέσσερα ρουλεμάν και στρέφεται σταθερά με 2000 rpm ενώ δέχεται σταθερό ακτινικό φορτίο 6000 lbs. Τα ρουλεμάν είναι τύπου Rexnord ZA-2115 διπλής σειράς με 16 σφαίρες ανά σειρά, pitch διαμέτρου 2,815 in, διάμετρο σφαιρών 0,331 in και γωνία επαφής $15,17^\circ$. Ο άξονας είναι συνδεδεμένος με έναν κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω ιμάντα. Ένα σύστημα κυκλοφορίας ρυθμίζει τη ροή και τη θερμοκρασία του λιπαντικού. Η συσσώρευση θραυσμάτων στο λιπαντικό παρακολουθείται κι όταν ένα όριο ξεπεραστεί το πείραμα θα σταματήσει.



Σχ. 4.1: Πειραματική εγκατάσταση

Σε κάθε ρουλεμάν έχουν συνδεθεί δύο επιταχυνσιόμετρα τύπου PCB 353B33 High Sensitivity Quartz ICP με κατευθύνσεις: οριζοντίως X και καθέτως Y με αποτέλεσμα σε ολόκληρη την εγκατάσταση να έχουν συνδεθεί συνολικά οχτώ επιταχυνσιόμετρα. Ο ρυθμός δειγματοληψίας ορίστηκε στα 20kHz.

4.1.2 Μετρήσεις

Το πρώτο μέρος του πειράματος ξεκίνησε στις 19 Δεκεμβρίου 2003 κι έληξε στις 30 Δεκεμβρίου 2003, κατά τη διάρκεια του οποίου, ελήφθησαν 2156 μετρήσεις σε σχετικά ισαπέχουσες χρονικές στιγμές, διάρκειας ενός δευτερολέπτου η κάθε μία. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων αυτών, φαίνεται η εξέλιξη της πρώτης βλάβης που αφορούσε τον εσωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν στη θέση 3. Με αυτόν τον τρόπο προέκυψαν 2156 σήματα με 20.480 στοιχεία από κάθε ρουλεμάν με την διάταξη που φαίνεται στον Πίν. 4.1.

Πίν. 4.1: Θέση και κατεύθυνση επιταχυνσιομέτρων

Στήλη	1	2	3	4	5	6	7	8
Θέση επιταχυν.	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η	6 ^η	7 ^η	8 ^η
Κατεύθυνση	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y

Όταν το ρουλεμάν στη θέση 3 ξεπέρασε σημαντικά το όριο της μηχανής, έληξε το πρώτο μέρος του πειράματος. Αφού ελέγχθηκε ότι δεν είχε εμφανιστεί καμία βλάβη στα ρουλεμάν των θέσεων 1, 2 και 4 κι αντικαταστάθηκε το φθαρμένο ρουλεμάν της θέσης 3, ξεκίνησε το δεύτερο (και τελευταίο) μέρος του πειράματος.

Στην περίοδο 12 Φεβρουαρίου 2004 με 19 Φεβρουαρίου 2004 ελήφθησαν 984 μετρήσεις διάρκειας ενός δευτερολέπτου η κάθε μία, όλες ισαπέχουσες χρονικά κατά 10 λεπτά. Με αυτόν τον τρόπο προέκυψαν 984 σήματα με 20.480 στοιχεία από κάθε ρουλεμάν με την διάταξη που φαίνεται στον Πίν. 4.2.

Πίν. 4.2: Θέση και κατεύθυνση επιταχυνσιομέτρων

Στήλη	1	2	3	4
Θέση επιταχυν.	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η
Κατεύθυνση	X	X	X	X

Στις νέες αυτές μετρήσεις φαίνεται η εξέλιξη της δεύτερης βλάβης που αφορούσε τον εξωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν στη θέση 1.

4.2. Μελέτη σημάτων

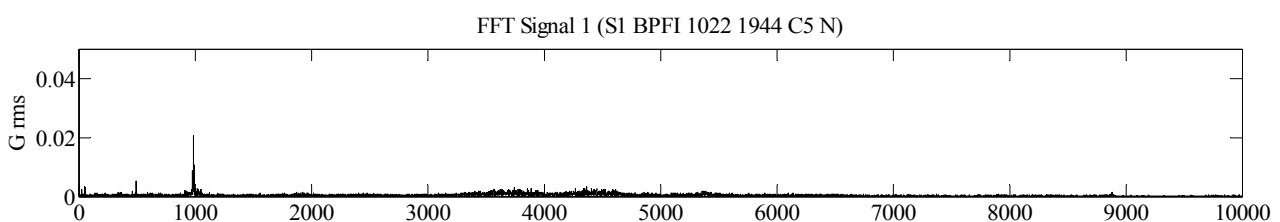
Ύστερα από προσεκτική ανάλυση των φασμάτων, εντοπίστηκε ότι η βλάβη του σετ 1 άρχισε να εμφανίζεται στο 1804^ο σήμα (2003.11.22.11.36.56), ενώ η βλάβη του σετ 2 στο 532^ο σήμα (2004.02.16.03.12.39).

Για να είναι πιο εύκολη η παρακολούθηση των βλαβών επιλέχθηκαν μόνο 42 από τα 2156 σήματα για το σετ 1 και 41 από τα 984 σήματα για το σετ 2, αντίστοιχα. Ωστόσο, και για τα δύο σετ, ανάμεσα στις επιλεγμένες μετρήσεις, ήταν σκόπιμο να επιλεγθούν και το πρώτο σήμα που εμφανίζει βλάβη και το αμέσως προηγούμενό του.

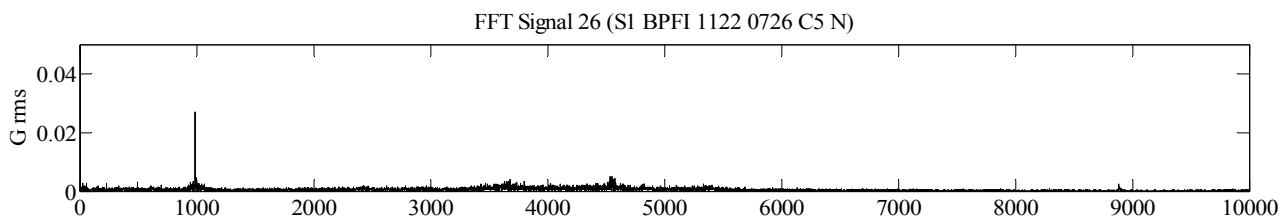
Οι πρώτες 27 μετρήσεις του σετ 1 απέχουν περίπου κατά 1 ημέρα, η 27^η κι η 28^η απέχουν κατά 10 λεπτά κι οι εναπομείνουσες 14 κατά περίπου 6 ώρες. Αντίστοιχα, στο σετ 2, οι πρώτες 30 μετρήσεις απέχουν μεταξύ τους περίπου 3 ώρες, η 30^η με την 31^η απέχουν 10 λεπτά κι οι εναπομείνουσες 10 απέχουν περίπου 7,5 ώρες.

Για το σετ 1 έγινε επεξεργασία μόνο των δεδομένων που καταγράφηκαν από το επιταχυνσιόμετρο στην θέση 3 με κατεύθυνση X (5^η στήλη) ενώ για το δεύτερο σετ μετρήσεων έγινε επεξεργασία μόνο των δεδομένων που καταγράφηκαν από το επιταχυνσιόμετρο στην θέση 1.

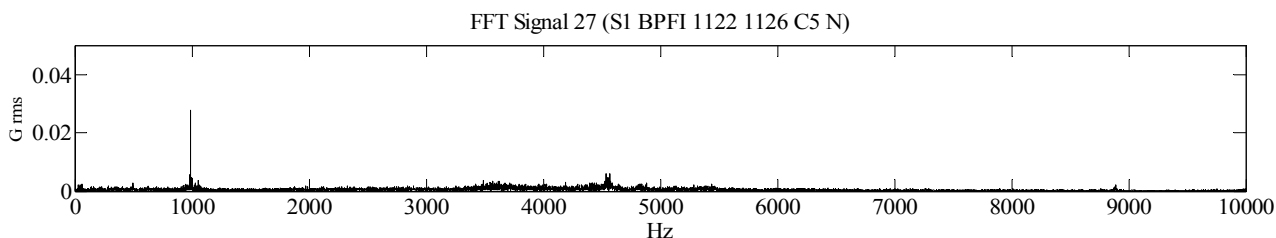
Παρακάτω, στα Σχ. 4.2. έως 4.7 παρουσιάζονται τα φάσματα ορισμένων σημάτων του σετ 1.



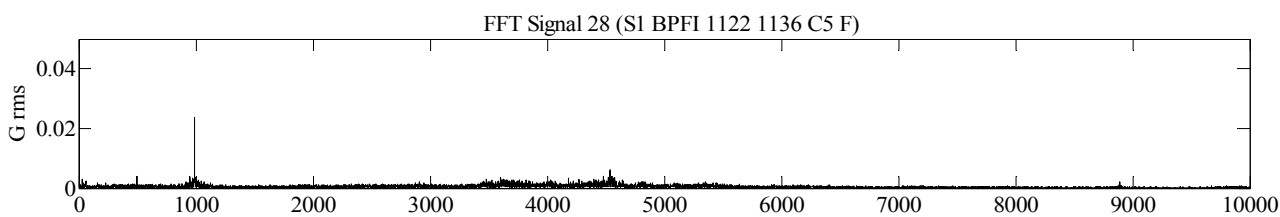
Σχ. 4.2: Φάσμα του 1^{ου} σε σειρά σήματος του σετ 1, 2003.10.22.19.44.13



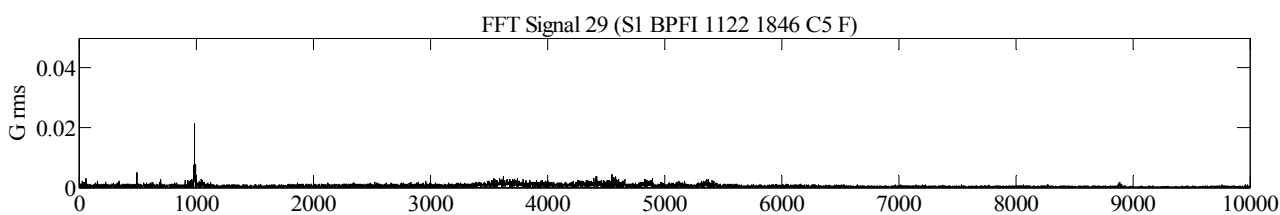
Σχ. 4.3: Φάσμα του 26^{ου} σε σειρά σήματος του σετ 1, 2003.11.22.07.26.56



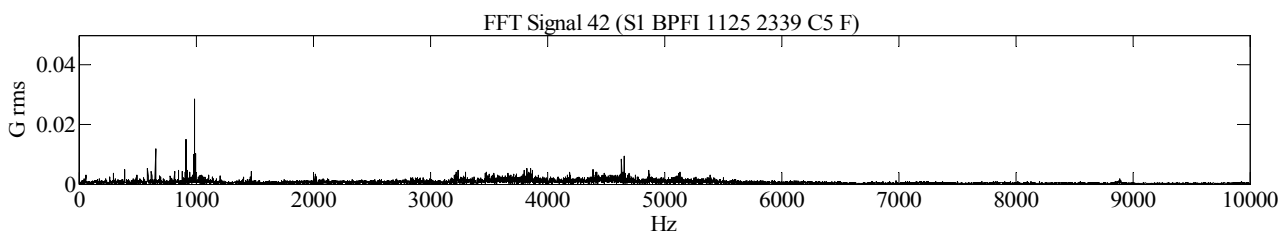
Σχ. 4.4: Φάσμα του 27^{ου} σε σειρά σήματος του σετ 1, 2003.11.22.11.26.56



Σχ. 4.5: Φάσμα του 28^{ου} σε σειρά σήματος του σετ 1, 2003.11.22.11.36.56

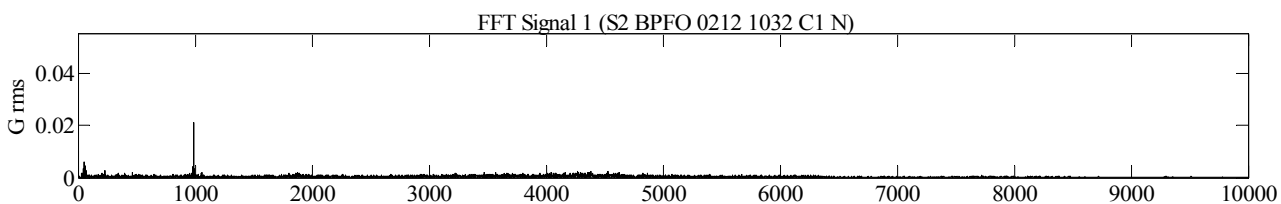


Σχ. 4.6: Φάσμα του 29^{ου} σε σειρά σήματος του σετ 1, 2003.11.22.18.46.56

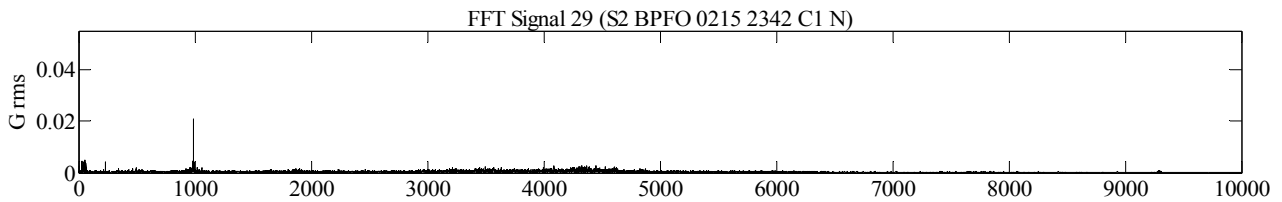


Σχ. 4.7: Φάσμα του 42^{ου} σε σειρά σήματος του σετ 1, 2003.11.25.23.39.56

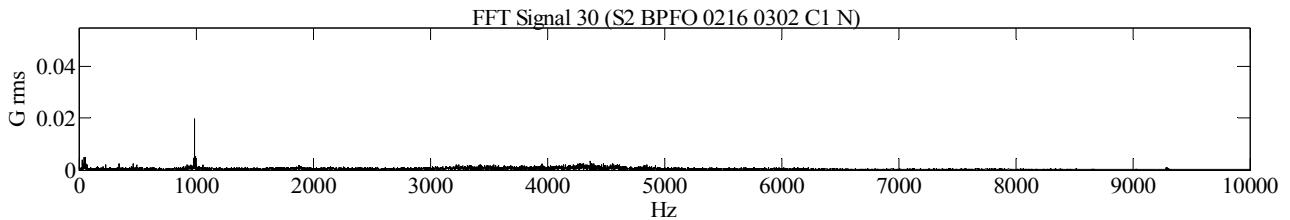
Στα Σχ. 4.8 έως 4.13 παρουσιάζονται τα φάσματα ορισμένων σημάτων του σετ 2.



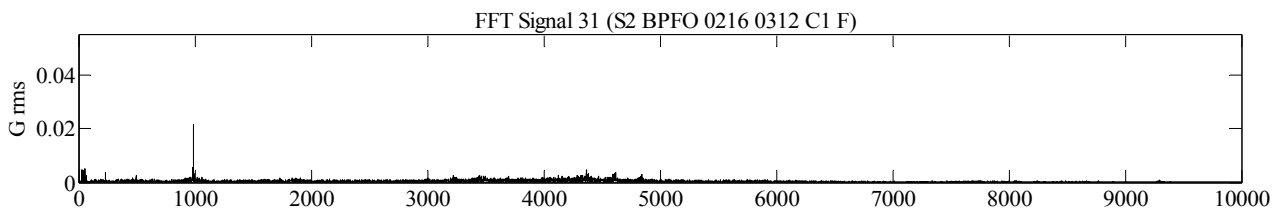
Σχ. 4.8: Φάσμα του 1^{ου} σε σειρά σήματος του σετ 2, 2004.02.12.10.32.39



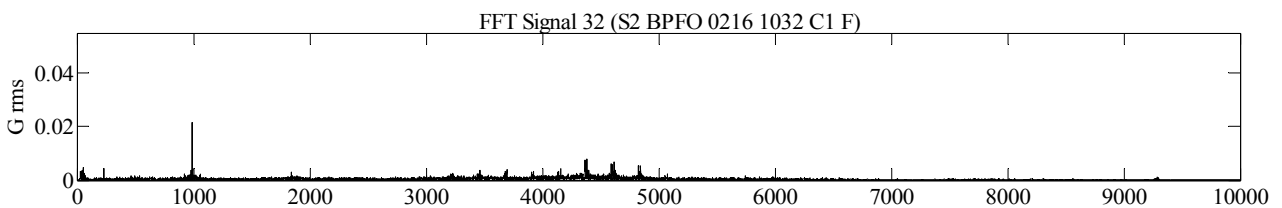
Σχ. 4.9: Φάσμα του 29^{ου} σε σειρά σήματος του σετ 2, 2004.02.15.23.42.39



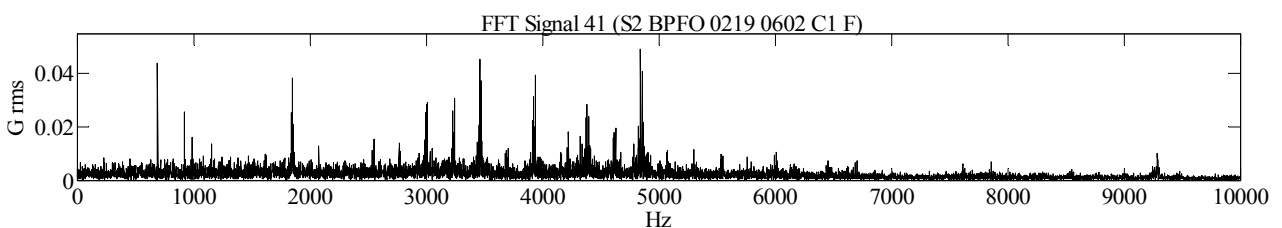
Σχ. 4.10: Φάσμα του 30^{ου} σε σειρά σήματος του σετ 2, 2004.02.16.03.02.39



Σχ. 4.11: Φάσμα του 31^{ου} σε σειρά σήματος του σετ 2, 2004.02.16.03.12.39



Σχ. 4.12: Φάσμα του 32^{ου} σε σειρά σήματος του σετ 2, 2004.02.16.10.32.39

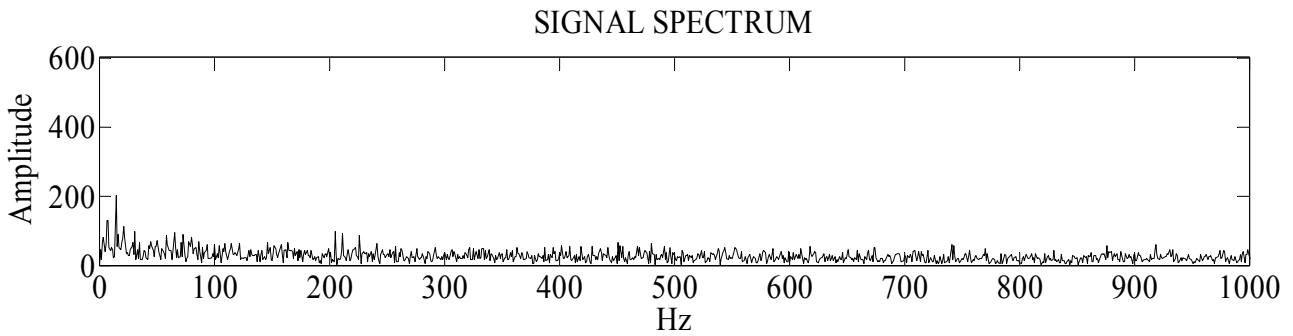


Σχ. 4.13: Φάσμα του 41^{ου} σε σειρά σήματος του σετ 2, 2004.02.19.06.02.39

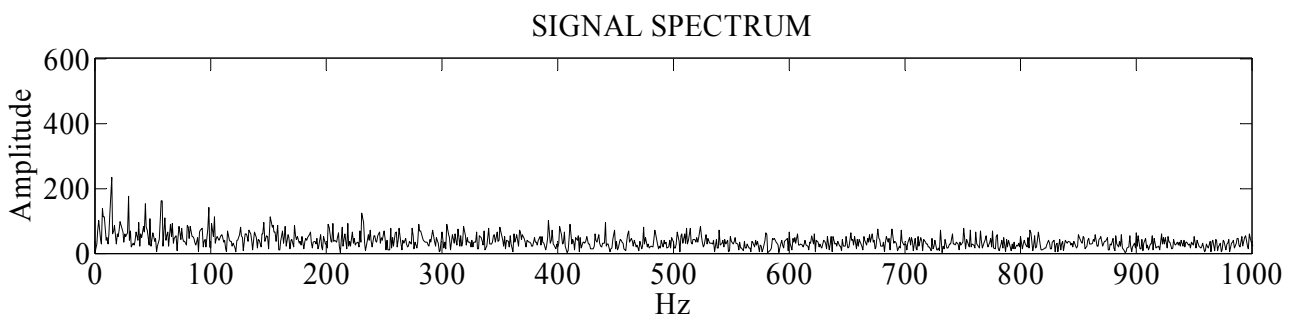
Με βάση τα δεδομένα του πειράματος υπολογίστηκαν οι τιμές των εξής συχνοτήτων: Η θεωρητική συχνότητα βλάβης στον εξωτερικό δακτύλιο των ρουλεμάν BPFOTH, η θεωρητική συχνότητα βλάβης στον εσωτερικό δακτύλιο των ρουλεμάν BPGITH κι η συχνότητα περιστροφής του άξονα f_{shaft} οι οποίες είναι: 236,4 Hz, 296,9 Hz και 33,33 Hz αντίστοιχα.

Αρχικά, έγινε η μορφολογική ανάλυση του συνόλου των σημάτων και για κάθε σήμα προέκυψε ένα νέο διάγραμμα πλάτους συναρτήσει της συχνότητας με μέγιστη συχνότητα έως τα 1000 Hz.

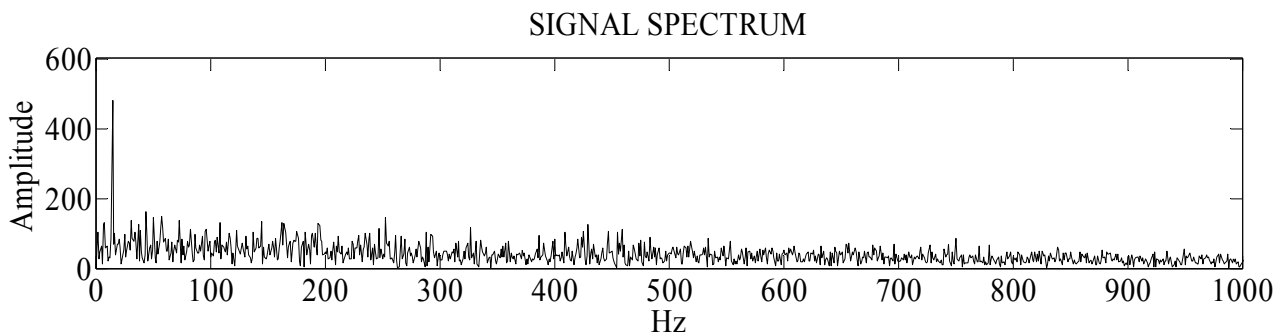
Στα Σχ. 4.14 έως 4.25 παρουσιάζονται τα φάσματα των αντίστοιχων μορφολογικών αναλυμένων σημάτων του σετ 1 και του σετ 2.



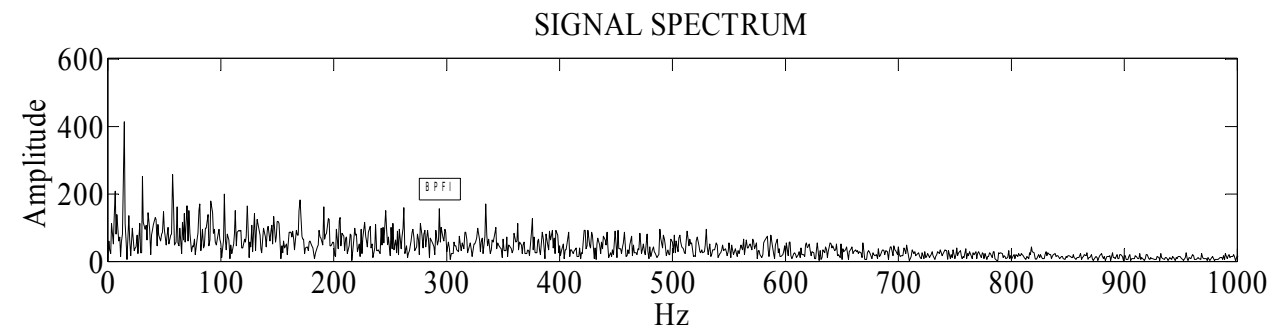
Σχ. 4.14: Φάσμα του αναλυμένου μορφολογικά σήματος 2003.10.22.19.44.13



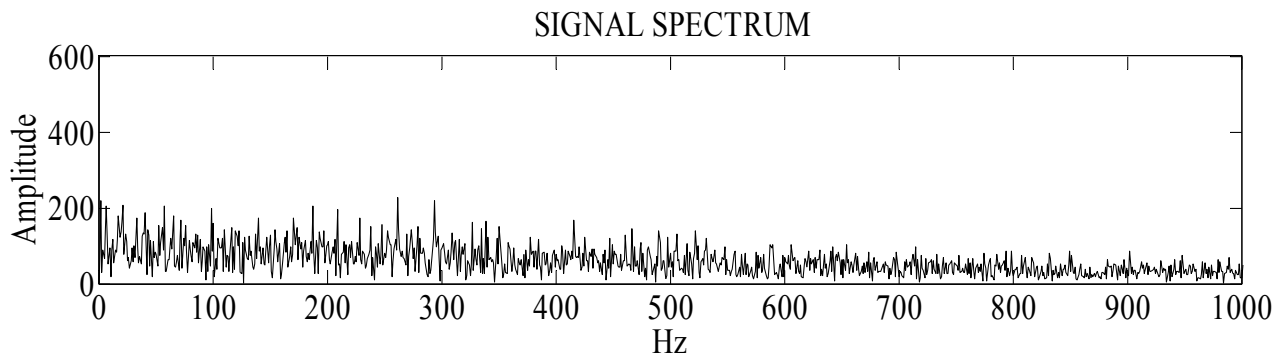
Σχ. 4.15: Φάσμα του αναλυμένου μορφολογικά σήματος 2003.11.22.07.26.56



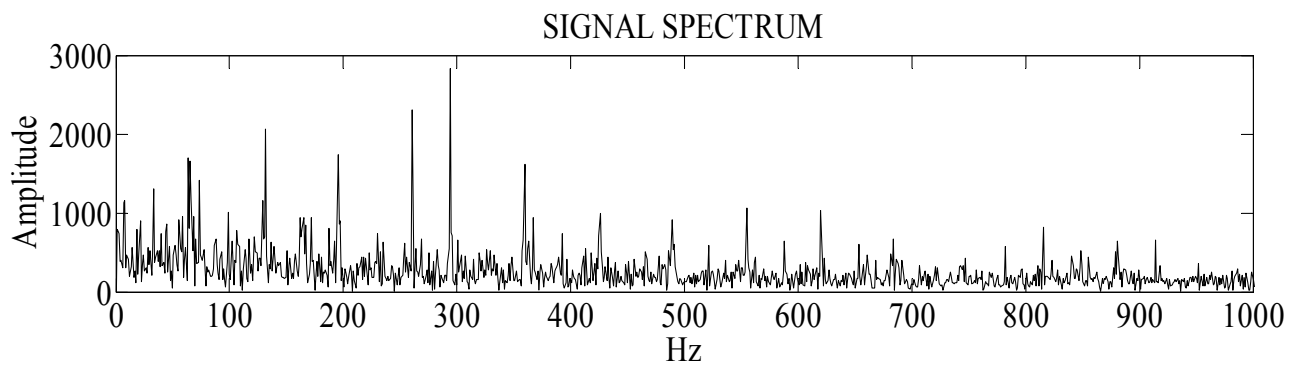
Σχ. 4.16: Φάσμα του αναλυμένου μορφολογικά σήματος 2003.11.22.11.26.56



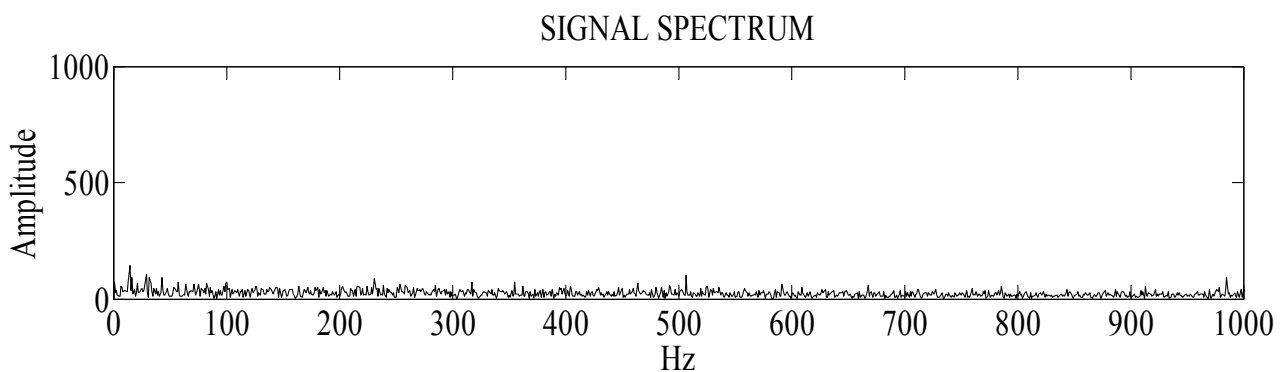
Σχ. 4.17: Φάσμα του αναλυμένου μορφολογικά σήματος 2003.11.22.11.36.56



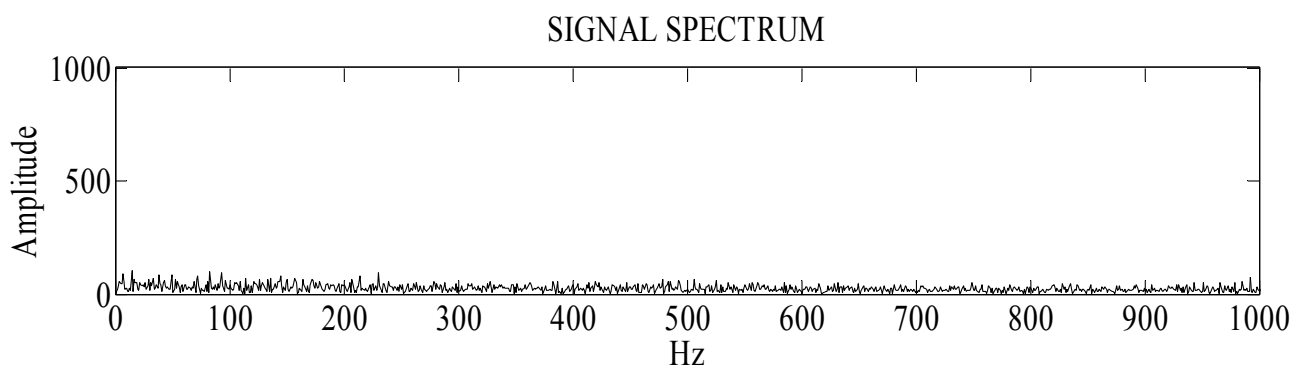
Σχ. 4.18: Φάσμα του αναλυμένου μορφολογικά σήματος 2003.11.22.18.46.56



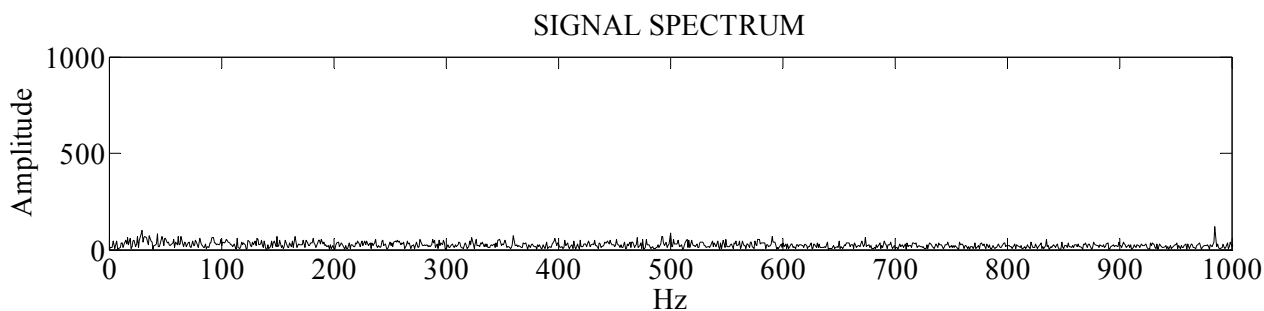
Σχ. 4.19: Φάσμα του αναλυμένου μορφολογικά σήματος 2003.11.25.23.39.56



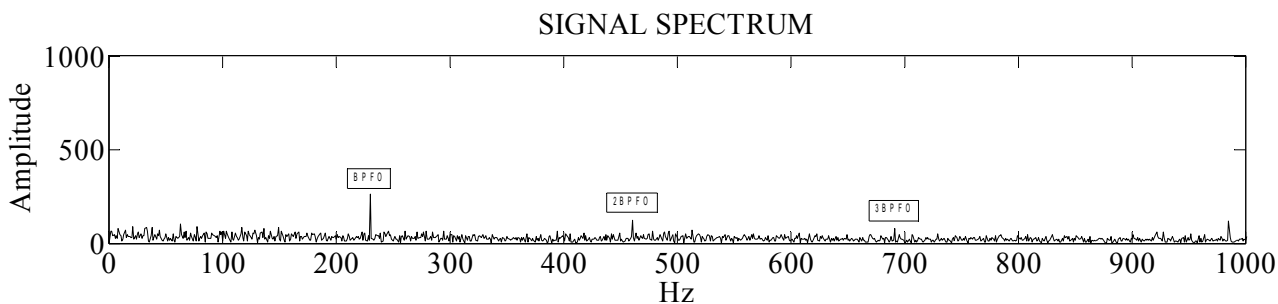
Σχ. 4.20: Φάσμα του αναλυμένου μορφολογικά σήματος 2004.02.12.10.32.39



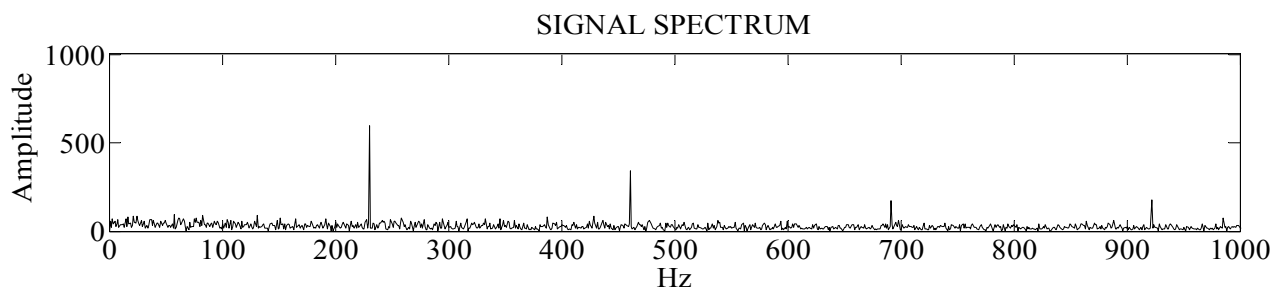
Σχ. 4.21: Φάσμα του αναλυμένου μορφολογικά σήματος 2004.02.15.23.42.39



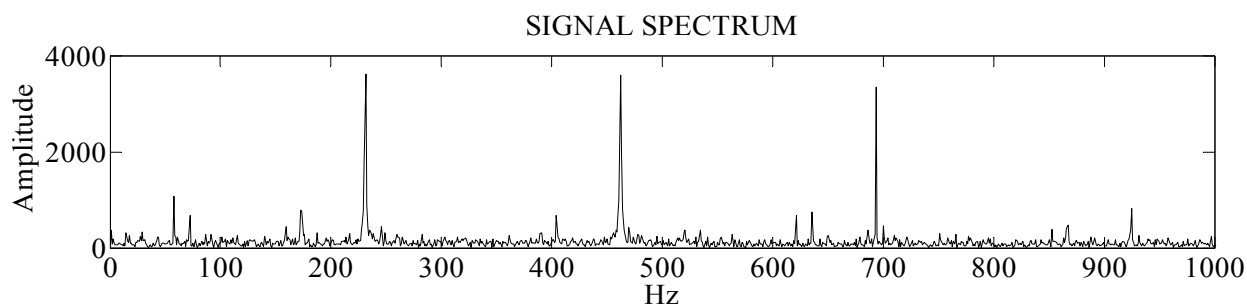
Σχ. 4.22: Φάσμα του αναλυμένου μορφολογικά σήματος 2004.02.16.03.02.39



Σχ. 4.23: Φάσμα του αναλυμένου μορφολογικά σήματος 2004.02.16.03.12.39



Σχ. 4.24: Φάσμα του αναλυμένου μορφολογικά σήματος 2004.02.16.10.32.39



Σχ. 4.25: Φάσμα του αναλυμένου μορφολογικά σήματος 2004.02.19.06.02.39

Το γεγονός ότι η βλάβη του σετ 1 άρχισε να εμφανίζεται στο 28^ο σήμα (1804^ο από το σύνολο) ενώ η βλάβη του σετ 2 άρχισε να εμφανίζεται στο 31^ο σήμα (532^ο από το σύνολο) επιβεβαιώθηκε όταν παρατηρήθηκε ότι τα φάσματα που προέκυψαν από τα χωρίς βλάβη μορφολογικά αναλυμένα σήματα ήταν σταθερά σε σημαντικό βαθμό, ενώ από το φάσμα του 28^{ου} κι αντίστοιχα το φάσμα του 31^{ου} σήματος, η εξέλιξη της βλάβης εμφανίζεται να εξελίσσεται ραγδαία.

Η κύρτωση, η μέση τετραγωνική τιμή κι η ενέργεια (power/Hz) πριν και μετά τη μορφολογική ανάλυση και τα Singular Value μετά τη μορφολογική ανάλυση υπολογίστηκαν για κάθε σήμα απο κάθε σετ. Η ακριβής μεταβολή όλων αυτών των τιμών φαίνεται στους Πίνακες 3, 4, 5 και 6.

Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται δύο πίνακες για κάθε σετ: Οι Πιν. 3 και 4 με όλα τα στατιστικά αποτελέσματα μόνο των σημάτων του σετ όσο ακόμα το σύστημα δεν έχει παρουσιάσει καμία φθορά (Τα πρώτα 27 για το σετ 1 και τα πρώτα 30 για το σετ 2) πριν και μετά τη μορφολογική τους ανάλυση κι οι Πιν. 5 και 6 με όλα τα στατιστικά αποτελέσματα των σημάτων του σετ που παρουσίασαν βλάβη (Τα τελευταία 15 και 11 αντίστοιχα) και πάλι, πριν και μετά τη μορφολογική τους ανάλυση.

Πιν. 4.3: Κύρτωση, μέση τετραγωνική τιμή, ενέργεια και Singular Value των πρώτων 27 σημάτων του σετ 1

A/A σήματος	Κύρτωση		RMS		Ενέργεια		Sing. Val.
	Ακατέργασ.	Μορφολ.	Ακατέργασ.	Μορφολ.	Ακατέργασ.	Μορφολ.	Μορφολ.
1	3,2659	5,0157	0,1303	0,2493	0,0166	0,0585	0,8618
2	3,4487	11,3801	0,1306	0,4356	0,0169	0,1872	0,7704
3	3,3189	4,6145	0,1594	0,3121	0,0250	0,0910	1,0671
4	3,4157	6,5862	0,1609	0,5015	0,0258	0,2486	0,9724
5	3,4264	5,6921	0,1613	0,3827	0,0264	0,1481	1,1542
6	3,4705	5,3737	0,1585	0,4535	0,0250	0,2016	1,0721
7	3,4807	7,4281	0,1596	0,4455	0,0255	0,1974	1,2285
8	3,4880	4,8886	0,1582	0,4691	0,0252	0,2220	1,2302
9	3,7518	8,6893	0,1587	0,5382	0,0250	0,2900	0,9982
10	3,4018	4,5777	0,1578	0,2977	0,0251	0,0866	0,9340
11	3,6201	6,2735	0,1575	0,4473	0,0254	0,2015	1,1130
12	4,0823	48,3071	0,1584	0,5389	0,0245	0,2755	1,2406
13	3,4575	5,1647	0,1577	0,4141	0,0248	0,1721	1,0751
14	3,8430	6,4196	0,1613	0,3876	0,0259	0,1481	1,2335
15	3,8368	7,2521	0,1599	0,3101	0,0259	0,0941	1,1395
16	4,0537	8,4113	0,1627	0,3891	0,0274	0,1574	1,3162
17	3,9189	8,4893	0,1609	0,5261	0,0264	0,2829	1,1715
18	3,5433	5,7203	0,1576	0,2984	0,0247	0,0841	1,1515
19	3,7272	18,9508	0,1598	0,5368	0,0255	0,2811	1,0962
20	3,6159	7,2011	0,1603	0,3772	0,0261	0,1416	1,1837
21	3,7204	7,1545	0,1612	0,3116	0,0255	0,0891	1,0084
22	3,6936	7,8728	0,1585	0,4509	0,0253	0,2083	1,1959
23	3,4804	5,2414	0,1584	0,3701	0,0250	0,1353	1,0982
24	3,9239	8,4612	0,1624	0,4406	0,0268	0,1996	1,2545
25	3,7574	9,9428	0,1601	0,4826	0,0261	0,2416	1,1637
26	3,6356	6,3188	0,1645	0,3238	0,0273	0,1005	1,1504
27	3,7120	6,2430	0,1652	0,4018	0,0277	0,1632	1,22704

Πιν. 4.4: Κύρτωση, μέση τετραγωνική τιμή, ενέργεια και Singular Value των πρώτων 30 σημάτων του σετ 2

A/A σήματος	Κύρτωση		RMS		Ενέργεια		Sing. Val.
	Ακατέργασ.	Μορφολ.	Ακατέργασ.	Μορφολ.	Ακατέργασ.	Μορφολ.	Μορφολ.
1	3,6288	5,5260	0,0742	0,1874	0,0055	0,0327	0,8229
2	3,5964	5,7439	0,0789	0,2004	0,0064	0,0394	0,9094
3	3,5707	5,7888	0,0799	0,2037	0,0064	0,0396	0,8639
4	3,4843	5,5154	0,0774	0,1971	0,0059	0,0363	0,8859
5	3,3948	5,1849	0,0788	0,2030	0,0061	0,0386	0,8921
6	3,3582	4,9810	0,0767	0,1948	0,0058	0,0352	0,7305
7	3,4765	5,6927	0,0765	0,1954	0,0060	0,0372	0,8914
8	3,3801	5,3009	0,0764	0,1946	0,0058	0,0358	0,8843
9	3,4161	5,4070	0,0756	0,1910	0,0057	0,0343	0,8183
10	3,4409	5,8163	0,0776	0,1967	0,0060	0,0365	0,8173
11	3,3541	5,4727	0,0781	0,2008	0,0060	0,0373	0,7854
12	3,5425	5,1489	0,0770	0,1962	0,0059	0,0359	0,8781
13	3,3903	5,0199	0,0785	0,2012	0,0063	0,0398	0,7509
14	3,5063	5,6072	0,0774	0,1971	0,0061	0,0382	0,7478
15	3,4292	5,2580	0,0767	0,1964	0,0058	0,0361	0,8483
16	3,4253	5,2188	0,0782	0,2003	0,0063	0,0361	0,7576
17	3,3312	5,4923	0,0777	0,1984	0,0060	0,0377	0,9283
18	3,4626	5,8553	0,0782	0,2006	0,0062	0,0389	1,0406
19	3,4207	5,3192	0,0783	0,2003	0,0061	0,0377	0,8773
20	3,5519	7,4122	0,0787	0,2013	0,0063	0,0394	0,9416
21	3,4050	4,9682	0,0767	0,1959	0,0058	0,0364	0,9109
22	3,3113	4,8808	0,0770	0,1963	0,0060	0,0367	0,8544
23	3,3873	5,2413	0,0754	0,1928	0,0057	0,0359	0,7446
24	3,4209	5,5944	0,0764	0,1959	0,0059	0,0366	0,7364
25	3,4387	4,9812	0,0782	0,2000	0,0060	0,0376	0,8901
26	3,4890	5,4920	0,0777	0,1971	0,0061	0,0376	0,7363
27	3,3059	5,4265	0,0785	0,3654	0,0062	0,1339	0,7737
28	3,3518	5,9018	0,0779	0,2008	0,0060	0,0381	0,8121
29	3,3030	5,2078	0,0775	0,1973	0,0060	0,0371	0,7912
30	3,3938	5,9663	0,0771	0,1983	0,0059	0,0380	0,7877

Γενικά, τα αποτελέσματα των δεικτών κύρτωσης, μέσης τετραγωνικής τιμής και ενέργειας και του Singular Value κρατήθηκαν σημαντικά σταθερά για κάθε σετ μέχρι αμέσως πριν την εμφάνιση της βλάβης.

Εξαιρέση αποτέλεσε η περίπτωση της κύρτωσης για τα μορφολογικά αναλυμένα σήματα, όπου αν και γενικά δεν ήταν ιδιαίτερα σταθερή, ωστόσο κινήθηκε στην ίδια τάξη μεγέθους.

Πιν. 4.5: Κύρτωση, μέση τετραγωνική τιμή, ενέργεια κι ολικό Singular Value των υπολοίπων 15 σημάτων του σετ 1

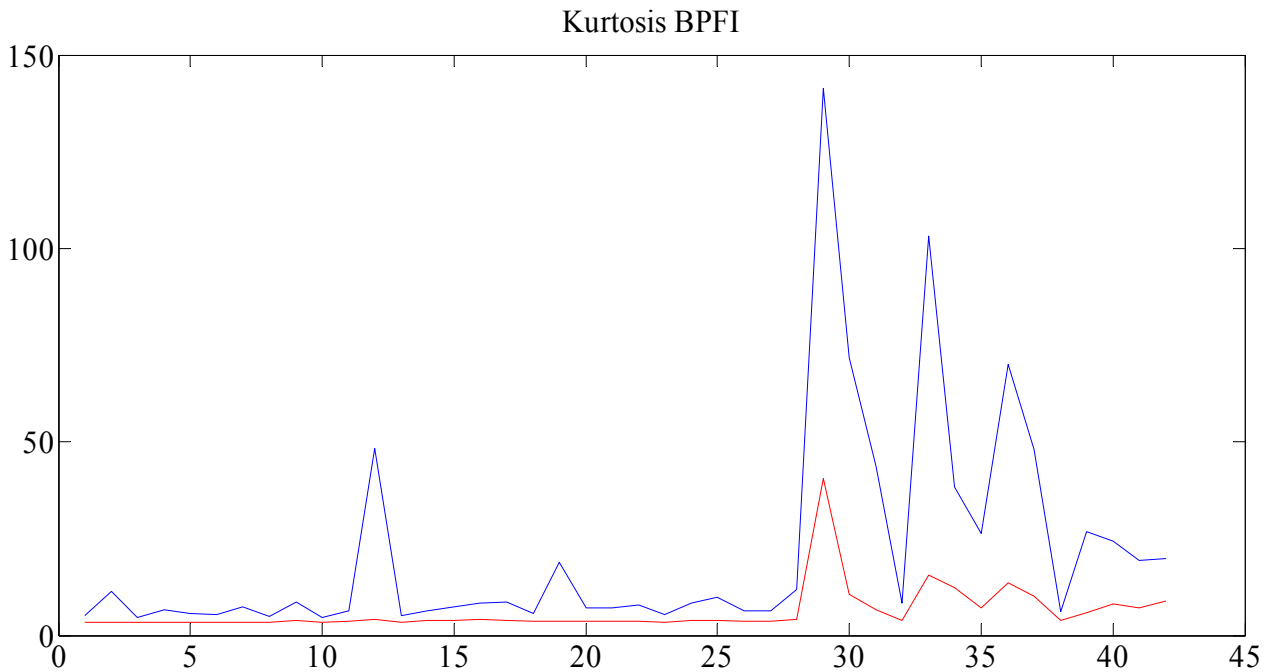
A/A σήματος	Κύρτωση		RMS		Ενέργεια		Sing. Val.
	Ακατέργασ.	Μορφολ.	Ακατέργασ.	Μορφολ.	Ακατέργασ.	Μορφολ.	Μορφολ.
28	4,0630	11,9139	0,1643	0,4539	0,0268	0,2000	1,5277
29	40,5814	141,3279	0,1672	0,4191	0,0277	0,1669	1,9522
30	10,5205	71,7091	0,1693	0,4883	0,0285	0,2321	2,0839
31	6,6893	43,4367	0,1695	0,5195	0,0286	0,2689	1,5854
32	3,7919	8,4022	0,1676	0,5606	0,0278	0,3036	1,2789
33	15,6822	103,1886	0,1772	0,4645	0,0315	0,2139	2,8036
34	12,4159	38,2291	0,1815	0,4826	0,0338	0,2417	3,1099
35	7,1434	26,2177	0,1799	0,4798	0,0326	0,2285	2,8591
36	13,6847	70,1042	0,1774	0,4707	0,0317	0,2201	2,5388
37	10,1183	47,9353	0,1822	0,5548	0,0331	0,2995	2,6066
38	3,7796	6,0841	0,1771	0,4586	0,0314	0,2098	1,8403
39	5,7703	26,9141	0,2146	0,6329	0,0464	0,4024	3,1832
40	8,2040	24,2563	0,2646	0,6808	0,0689	0,4250	4,8461
41	7,1506	19,2211	0,2756	0,7069	0,0768	0,4754	5,9431
42	8,9027	19,7448	0,5936	1,4554	0,3706	1,9655	14,5404

Πίν. 4.6: Κύρτωση, μέση τετραγωνική τιμή, ενέργεια κι ολικό Singular Value των υπολοίπων 11 σημάτων του σετ 2

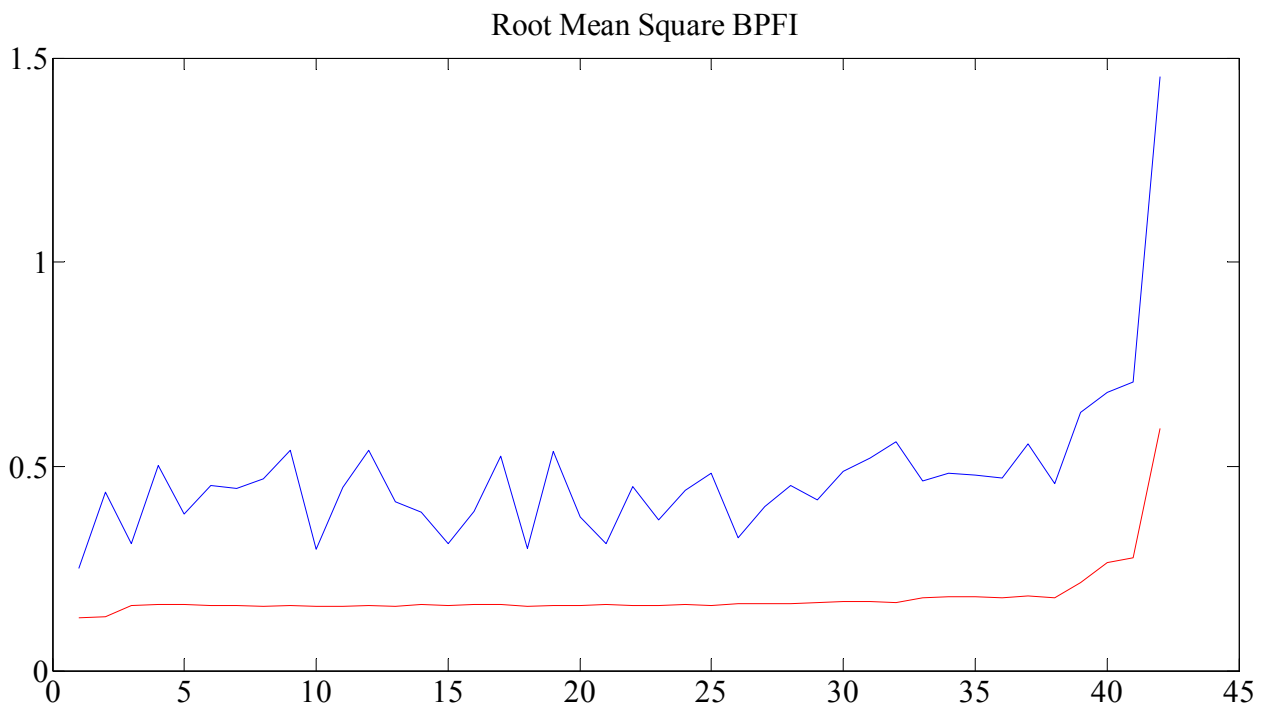
A/A σήματος	Κύρτωση		RMS		Ενέργεια		Sing. Val.
	Ακατέργασ.	Μορφολ.	Ακατέργασ.	Μορφολ.	Ακατέργασ.	Μορφολ.	Μορφολ.
31	3,5004	4,9861	0,0823	0,2131	0,0068	0,0433	1,3695
32	3,5135	4,7622	0,0882	0,2327	0,0077	0,0517	2,4760
33	3,6142	5,3877	0,0985	0,4770	0,0094	0,2216	2,0896
34	3,9260	4,0321	0,1069	0,2900	0,0112	0,0789	4,2553
35	5,2488	3,5387	0,1688	0,4672	0,0293	0,2185	10,6091
36	4,9975	5,1292	0,1259	0,3444	0,0159	0,1151	6,4335
37	3,9433	4,6308	0,1064	0,2844	0,0112	0,0755	3,6583
38	5,0488	3,6133	0,1642	0,4503	0,0268	0,1959	9,1982
39	4,7284	6,1307	0,1320	0,3485	0,0173	0,1159	6,2234
40	4,1907	4,0108	0,1956	0,5246	0,0390	0,2700	9,1751
41	7,8918	7,9749	0,4838	0,3169	0,2349	1,6623	19,5898

Παράλληλα, παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσεις των παραπάνω δεικτών πριν και μετά τη μορφολογική ανάλυση στα Σχ. 4.26 έως 4.33 ξεχωριστά για κάθε σετ. Με κόκκινο εμφανίζεται η χρονική μεταβολή των ακατέργαστων σημάτων που καταγράφονται από τα επιταχυνσιόμετρα, ενώ με μπλε η

μεταβολή στο χρόνο των σημάτων ύστερα από τη μορφολογική τους ανάλυση.



Σχ. 4.26: Η μεταβολή της κύρτωσης συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος με βλάβη στον εσωτερικό δακτύλιο

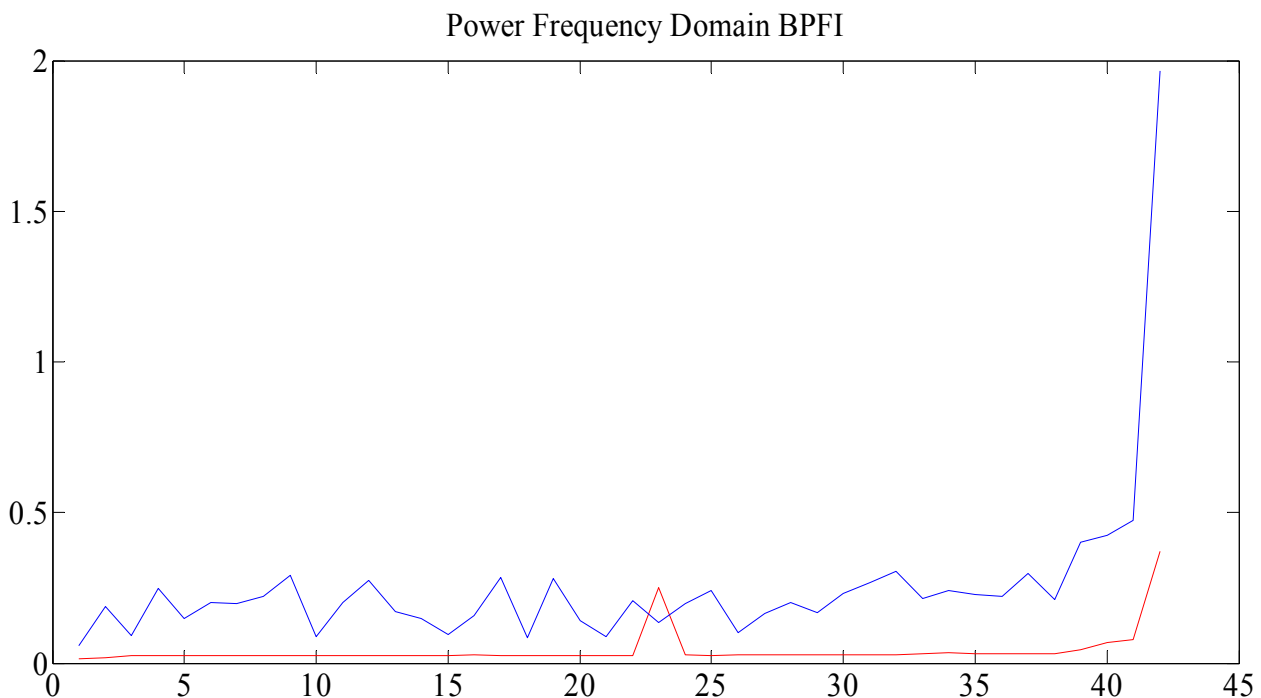


Σχ. 4.27: Η μεταβολή της μέσης τετραγωνικής τιμής συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος με βλάβη στον εσωτερικό δακτύλιο

Το Σχ. 4.26 παρουσιάζει τη μεταβολή της κύρτωσης πριν και μετά τη μορφολογική ανάλυση συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος με βλάβη στον εσωτερικό δακτύλιο (σετ 1). Τα αποτελέσματα ύστερα από τη μορφολογική ανάλυση φαίνονται να είναι πιο αξιόπιστα σε σχέση με τα αποτελέσματα από

τα μη επεξεργασμένα σήματα, αφού γενικά, ύστερα από την εμφάνιση της βλάβης, η τιμή της κύρτωσης των μορφολογικά αναλυμένων σημάτων είναι πολλαπλάσια συγκριτικά με την τιμή της κύρτωσης πριν την επεξεργασία τους. Παράλληλα, τα μορφολογικά αποτελέσματα δίνουν μια ελαφριά αύξηση στο 28° σήμα (πρώτο σήμα με εμφάνιση φθοράς) ενώ τα μη επεξεργασμένα δεν δείχνουν τίποτα σχετικό. Το γεγονός όμως ότι και στις δύο περιπτώσεις εμφανίζεται η τιμή της κύρτωσης γενικά πτωτική από το 30° σήμα και μετά (ακόμα περισσότερο στην περίπτωση των μη επεξεργασμένων σημάτων όπου η τιμή της κύρτωσης επιστρέφει στα αρχικά επίπεδα) συν την αυξημένη τιμή της κύρτωσης σε δύο χωρίς βλάβη σήματα ύστερα από τη μορφολογική τους ανάλυση, δείχνει ότι τελικά, η κύρτωση, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εντοπισμό βλάβης (περισσότερο στην περίπτωση της μορφολογικής ανάλυσης), δεν είναι ιδιαίτερα αξιόπιστη.

Στο Σχ. 4.27 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης τετραγωνικής τιμής πριν και μετά τη μορφολογική ανάλυση συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος με βλάβη στον εσωτερικό δακτύλιο (σετ 1). Τα αποτελέσματα για τα μη επεξεργασμένα σήματα είναι αρκετά αποθαρρυντικά αφού η οποιαδήποτε αξιοσημείωτη αύξηση της τιμής της μέσης τετραγωνικής τιμής εμφανίζεται στο 38° σήμα, πολύ αργότερα από την πρώτη εμφάνιση της βλάβης. Στην περίπτωση των επεξεργασμένων σημάτων, τα αποτελέσματα μέχρι το 28° σήμα εμφανίζονται πολύ ασταθή με αποτέλεσμα, ενώ από το 28° μέχρι το 38° σήμα η μέση τετραγωνική τιμή εμφανίζεται σχετικά αυξημένη, να μην υπερβαίνει τις μέγιστες τιμές που καταγράφησαν για τα σήματα χωρίς βλάβη. Παράλληλα, για τα επεξεργασμένα αποτελέσματα έχουμε σημαντική αύξηση της μέσης τετραγωνικής τιμής και πάλι, όχι νωρίτερα από το 38° σήμα. Γενικά, η μέση τετραγωνική τιμή και για τις δύο περιπτώσεις, δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

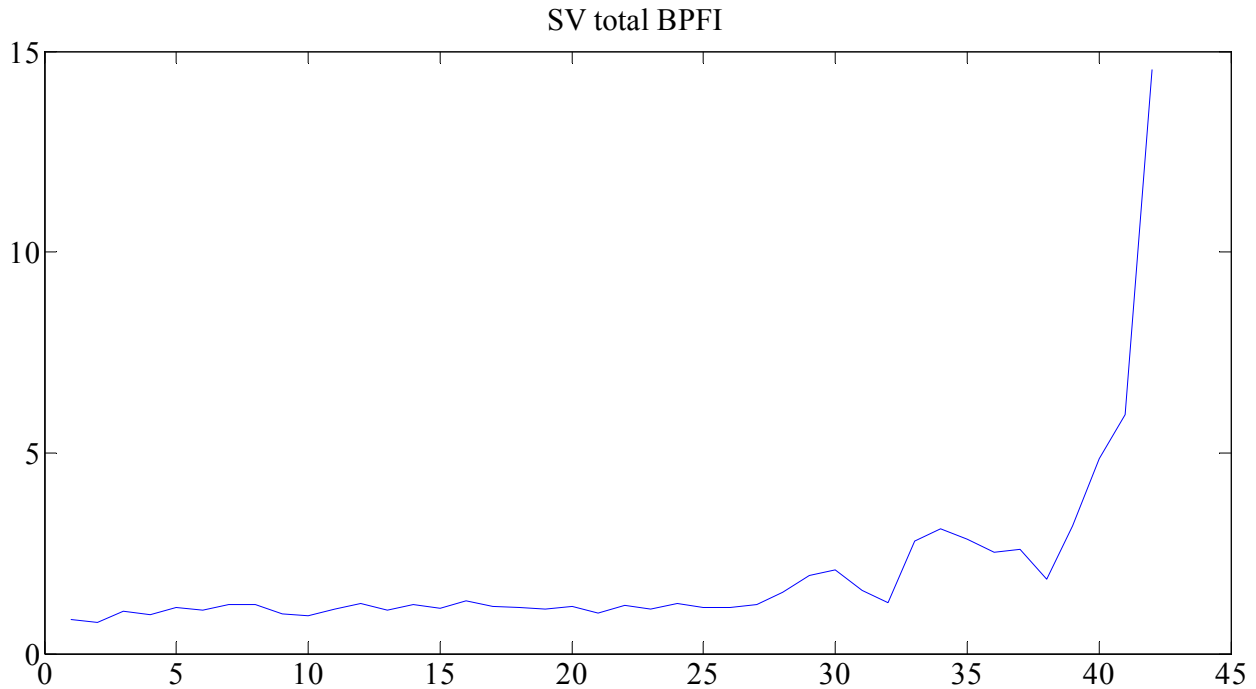


Σχ. 4.28: Η μεταβολή της ενέργειας συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος με βλάβη στον εσωτερικό δακτύλιο

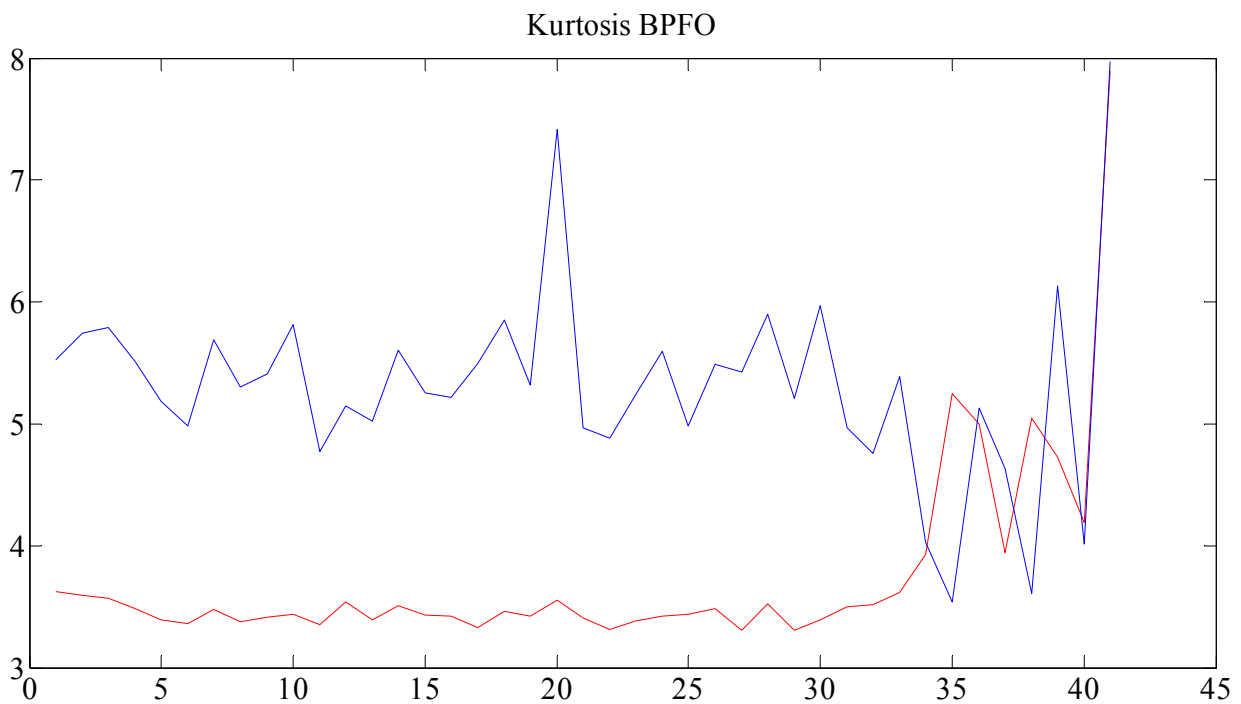
Το Σχ. 4.28 παρουσιάζει τη μεταβολή της ενέργειας πριν και μετά τη μορφολογική ανάλυση συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος με βλάβη στον εσωτερικό δακτύλιο (σετ 1). Τα αποτελέσματα και για τα επεξεργασμένα σήματα και για τα μη επεξεργασμένα δεν είναι καθόλου αποδεκτά καθώς, και στις δύο περιπτώσεις, η οποιαδήποτε ιδιαίτερη αύξηση της τιμής της ενέργειας εμφανίζεται στο 40° σήμα το οποίο είναι σήμα προχωρημένης βλάβης. Παράλληλα, για τα μη επεξεργασμένα σήματα, εμφανίζεται μια

σημαντική αύξηση στο 23^ο σήμα το οποίο δεν έχει εμφανίσει καμία βλάβη.

Στο Σχ. 4.29 παρουσιάζεται η μεταβολή των singular values συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος με βλάβη στον εσωτερικό δακτύλιο (σετ 1). Τα αποτελέσματα είναι αρκετά ενθαρυντικά αφού η τιμή κρατείται σημαντικά σταθερή μέχρι και το 27^ο σήμα ενώ, αντίθετα, από το πρώτο σήμα εμφάνισης βλάβης (28^ο) η τιμή αρχίζει να αυξάνει και συνεχίζει να αυξάνει όσο η βλάβη εξελίσσεται.



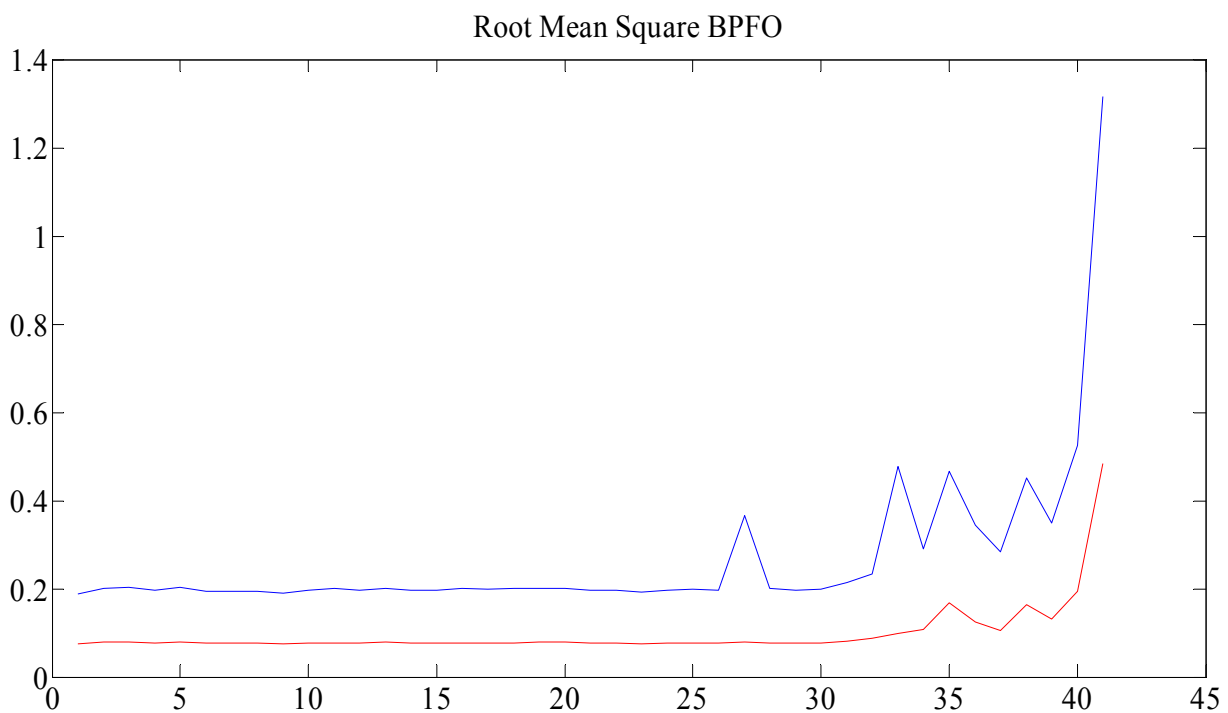
Σχ. 4.29: Η μεταβολή των Singular Value συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος με βλάβη στον εσωτερικό δακτύλιο



Σχ. 4.30: Η μεταβολή της κύρτωσης συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος με βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο

Το Σχ. 4.30 παρουσιάζει τη μεταβολή της κύρτωσης πριν και μετά τη μορφολογική ανάλυση συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος με βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο (σετ 2). Όσον αφορά τα αποτελέσματα των αναλυμένων μορφολογικά σημάτων, η τιμή της κύρτωσης είναι αρκετά ασταθής σε όλο το μήκος του διαγράμματος. Παράλληλα, στο 31° σήμα, παρατηρείται μία σημαντική πτώση της τιμής του δείκτη αυτού ενώ, αρχίζει πάλι να αυξάνει στο 39° σήμα, πολύ αργότερα από την έναρξη της βλάβης. Γενικά, ο δείκτης της κύρτωσης στην περίπτωση των επεξεργασμένων σημάτων δεν είναι καθόλου αξιόπιστος. Αντίθετα, τα αποτελέσματα των μη αναλυμένων σημάτων είναι αξιόλογα, με την τιμή της κύρτωσης να αυξάνει σημαντικά από το 35° σήμα και να συνεχίζει να αυξάνει όσο η φθορά εξελίσσεται. Αν και σε γενικές γραμμές φαίνεται ότι ο δείκτης της κύρτωσης στην περίπτωση των μη επεξεργασμένων σημάτων είναι αρκετά καλός, ωστόσο δίνει αξιοσημείωτα αποτελέσματα αφού η βλάβη έχει εξελιχθεί σημαντικά.

Συγκρίνοντας τις τιμές του δείκτη και για τις δύο βλάβες (στον εξωτερικό και τον εσωτερικό δακτύλιο), είναι σαφές ότι η κύρτωση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάγνωση βλάβης είτε στα αναλυμένα μορφολογικά είτε στα μη αναλυμένα μορφολογικά σήματα.

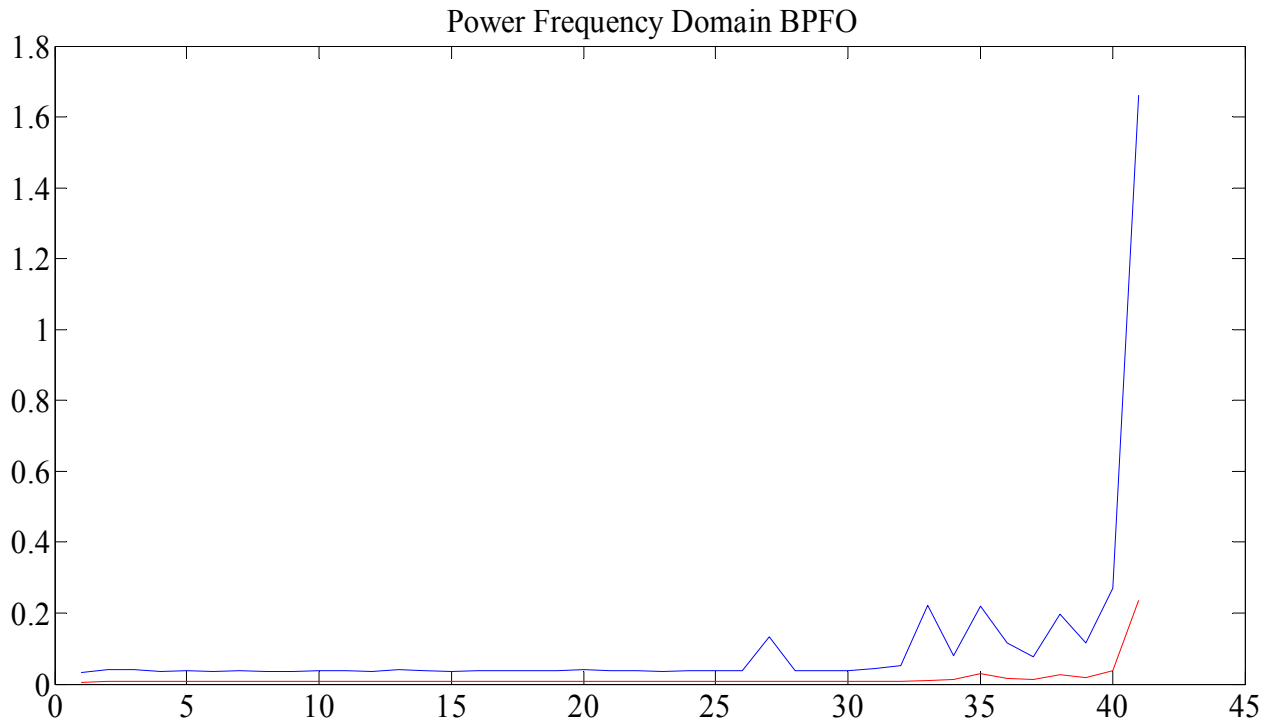


Σχ. 4.31: Η μεταβολή της μέσης τετραγωνικής τιμής συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος με βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο

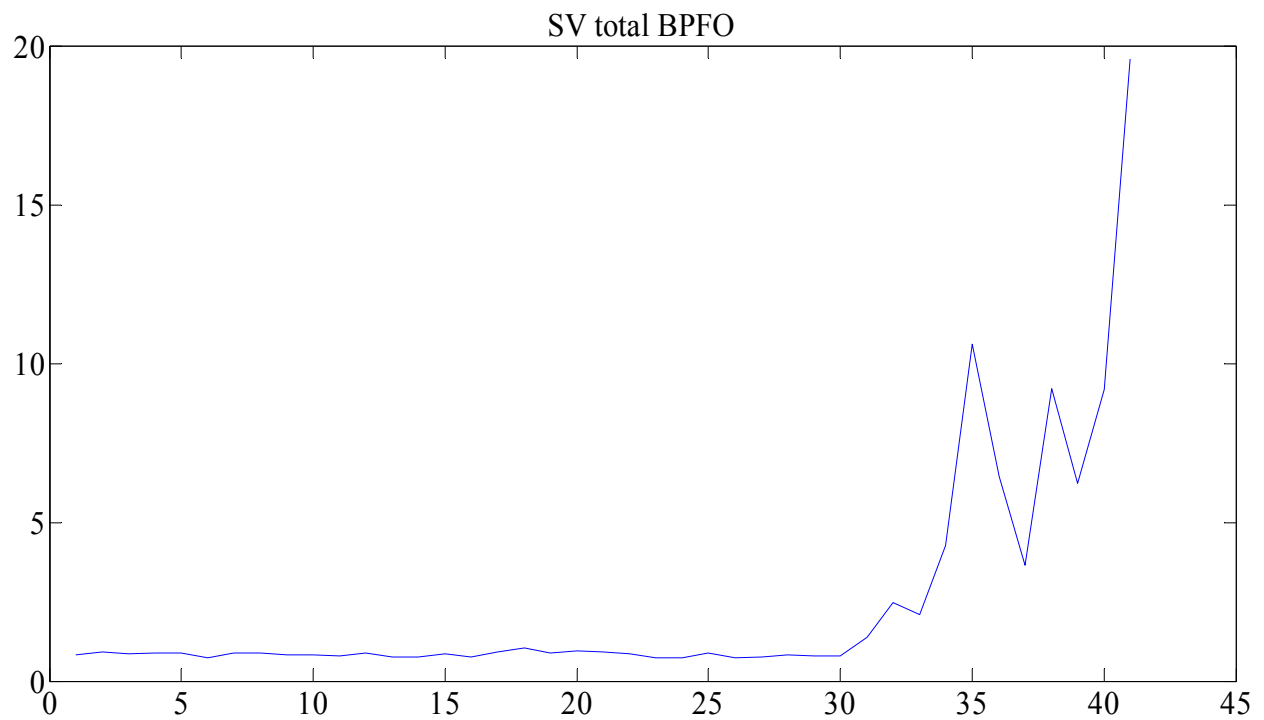
Στο Σχ. 4.31 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης τετραγωνικής τιμής συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος με βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο (σετ 2). Γενικά, και για τις δύο περιπτώσεις η μέση τετραγωνική τιμή παραμένει σταθερή για όλα τα σήματα χωρίς βλάβη. Τα αποτελέσματα ύστερα από τη μορφολογική ανάλυση δείχνουν αρκετά καλά με την τιμή να αυξάνει σημαντικά από το 33° σήμα και να συνεχίζει να αυξάνει όσο η φθορά εξελίσσεται. Αντίθετα, τα αποτελέσματα από τα μη επεξεργασμένα σήματα δίνουν αύξηση της μέσης τετραγωνικής τιμής αρκετά αργότερα (στο 35° σήμα), όχι όμως σημαντική. Γενικά, η μέση τετραγωνική τιμή φαίνεται σχετικά αξιόπιστη στην περίπτωση των αναλυμένων σημάτων, όχι όμως στην περίπτωση των μη επεξεργασμένων. Και πάλι όμως, ο εντοπισμός της βλάβης γίνεται με αρκετή καθυστέρηση.

Συγκρίνοντας τις τιμές του δείκτη και για τις δύο βλάβες (στον εξωτερικό και τον εσωτερικό δακτύλιο), φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των μη αναλυμένων σημάτων σίγουρα δεν μπορούν να βοηθήσουν

στον εντοπισμό βλάβης. Αντίθετα, τα αποτελέσματα των επεξεργασμένων σημάτων είναι συγκριτικά πιο αξιόλογα, αν και εντοπίζουν την βλάβη με αρκετή χρονική καθυστέρηση.



Σχ. 4.32: Η μεταβολή της ενέργειας συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος με βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο



Σχ. 4.33: Η μεταβολή των Singular Value συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος με βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο

Στο Σχ. 4.32 παρουσιάζεται η μεταβολή της ενέργειας πριν και μετά τη μορφολογική ανάλυση συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος με φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο (σετ 2). Ενώ, στην περίπτωση των μη αναλυμένων σημάτων τα αποτελέσματα είναι σαφώς αναξιόπιστα με την τιμή του δείκτη να παραμένει σταθερός σε όλο το μήκος του διαγράμματος, στην περίπτωση των αναλυμένων σημάτων τα αποτελέσματα είναι συγκριτικά καλύτερα με την τιμή να αυξάνει από το 33° σήμα και να συνεχίζει να αυξάνει όσο η βλάβη εξελίσσεται. Ωστόσο, και πάλι τα αποτελέσματα δεν είναι ενθαρυντικά.

Σε κάθε περίπτωση, ανεξάρτητα της φθοράς που έχει παρουσιαστεί, ο δείκτης της ενέργειας δεν δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για -έγκυρο ή μη- εντοπισμό της βλάβης.

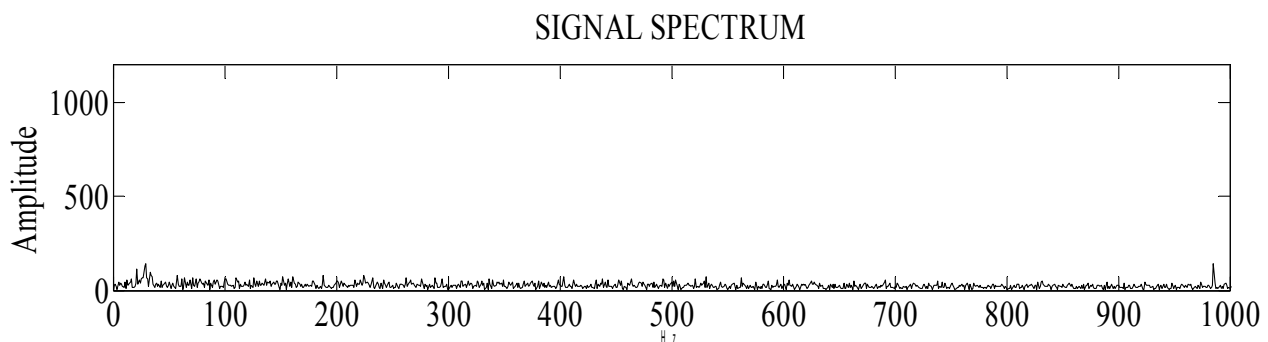
Στο Σχ. 4.33 παρουσιάζεται η μεταβολή των Singular Value συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος με βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο (σετ 2). Τα αποτελέσματα είναι αρκετά ενθαρυντικά αφού η τιμή παραμένει σταθερή μέχρι και το 30° σήμα ενώ, ήδη από το 31° σήμα, η τιμή αρχίζει να αυξάνει και συνεχίζει να αυξάνει όσο η φθορά εξελίσσεται.

Και για τις δύο περιπτώσεις, μορφολογικά αναλυμένων σημάτων ή μη, το Singular Value δίνει πολύ αξιόλογα αποτελέσματα.

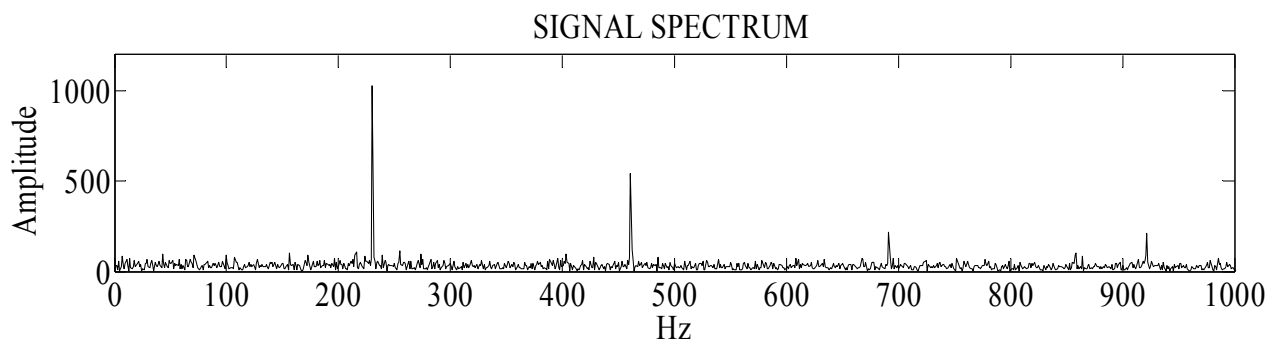
4.3 Εντοπισμός βασικών συχνοτήτων βλάβης

Για να είναι περισσότερο σαφές τι προσφέρει η διαδικασία της μορφολογικής ανάλυσης, θα μελετηθούν τα αποτελέσματα δύο σημάτων ενός σετ. Επιλέγονται τυχαία τα σήματα 2004.02.13.14.02.39 και 2004.02.18.00.12.39 του σετ 2. Το πρώτο είναι το 10° σήμα από τα 41 και καταγράφηκε αρκετά πριν την εμφάνιση της φθοράς ενώ, το δεύτερο είναι το 37° κι η φθορά πλέον έχει εξελιχθεί σημαντικά.

Στα Σχ. 4.34 και 4.35 παρουσιάζονται τα φάσματα των αναλυμένων μορφολογικά σημάτων.



Σχ. 4.34: Το μορφολογικό φάσμα του 2004.02.13.14.02.39

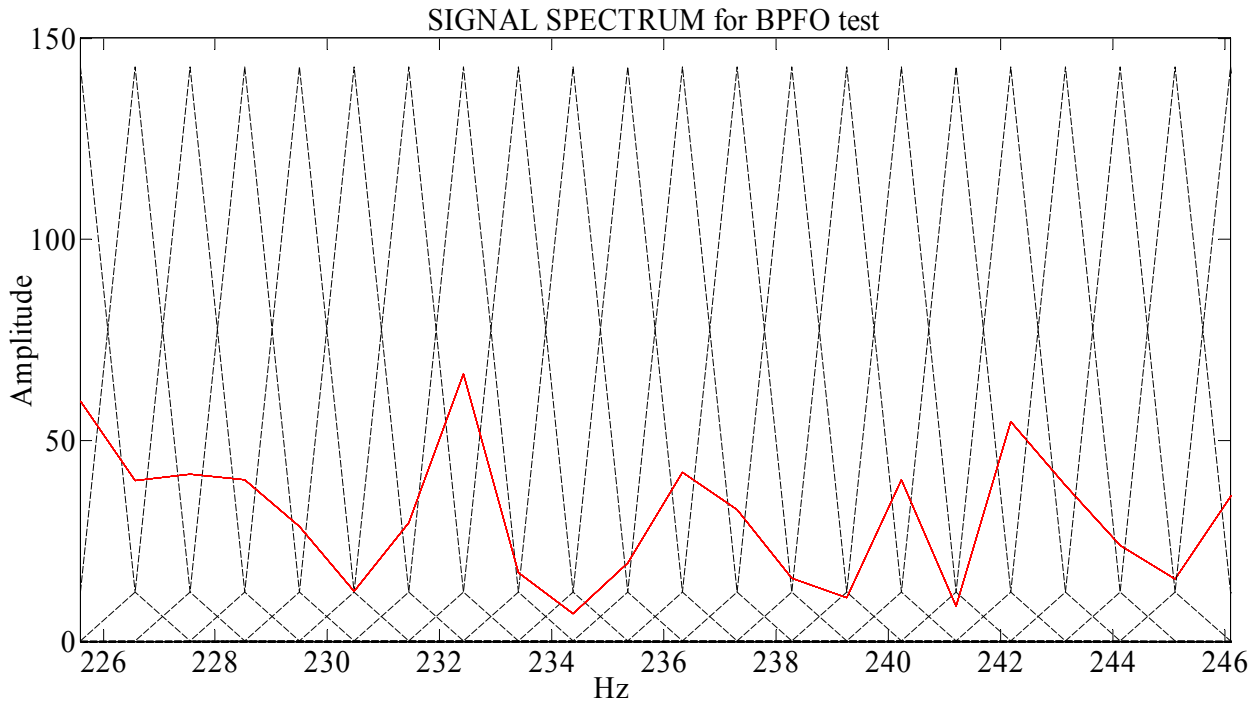


Σχ. 4.35: Το μορφολογικό φάσμα του 2004.02.18.00.12.39

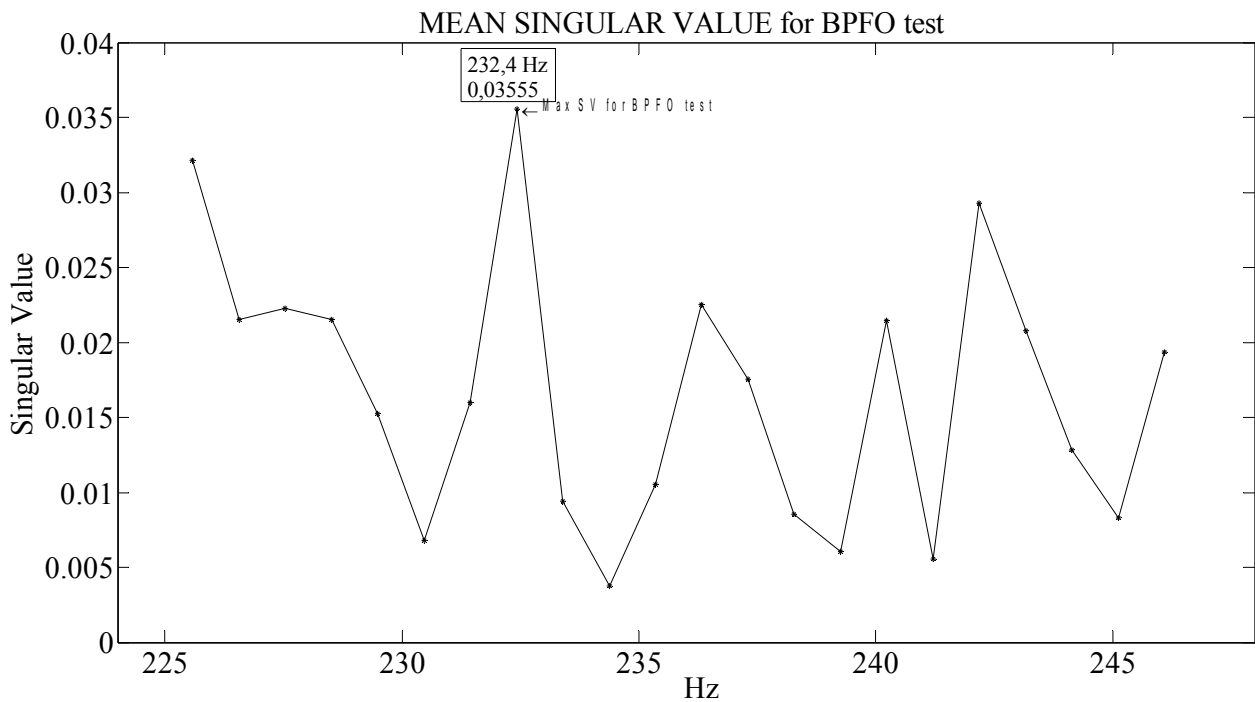
Σε κάθε μορφολογικό, πλέον, σήμα σαρώνεται η περιοχή γύρω από τη θεωρητική συχνότητα βλάβης εξωτερικού δακτυλίου των ρουλεμάν BPFOTH, 236,4 Hz.

Για το 10^ο σήμα, η περιοχή γύρω από τη συχνότητα 236,4 Hz φαίνεται στο Σχ. 4.36 όπου με κόκκινο διαγράφεται το φάσμα και με μαύρο το βήμα της σάρωσης.

Τελικά, προκύπτει το Σχ. 4.37 όπου φαίνεται πως μεταβάλλεται βηματικά η τιμή του μέσου όρου του Singular Value (της περιοχής) .



Σχ. 4.36: Η περιοχή γύρω από τη θεωρητική συχνότητα βλάβης εξωτερικού δακτυλίου ρουλεμάν

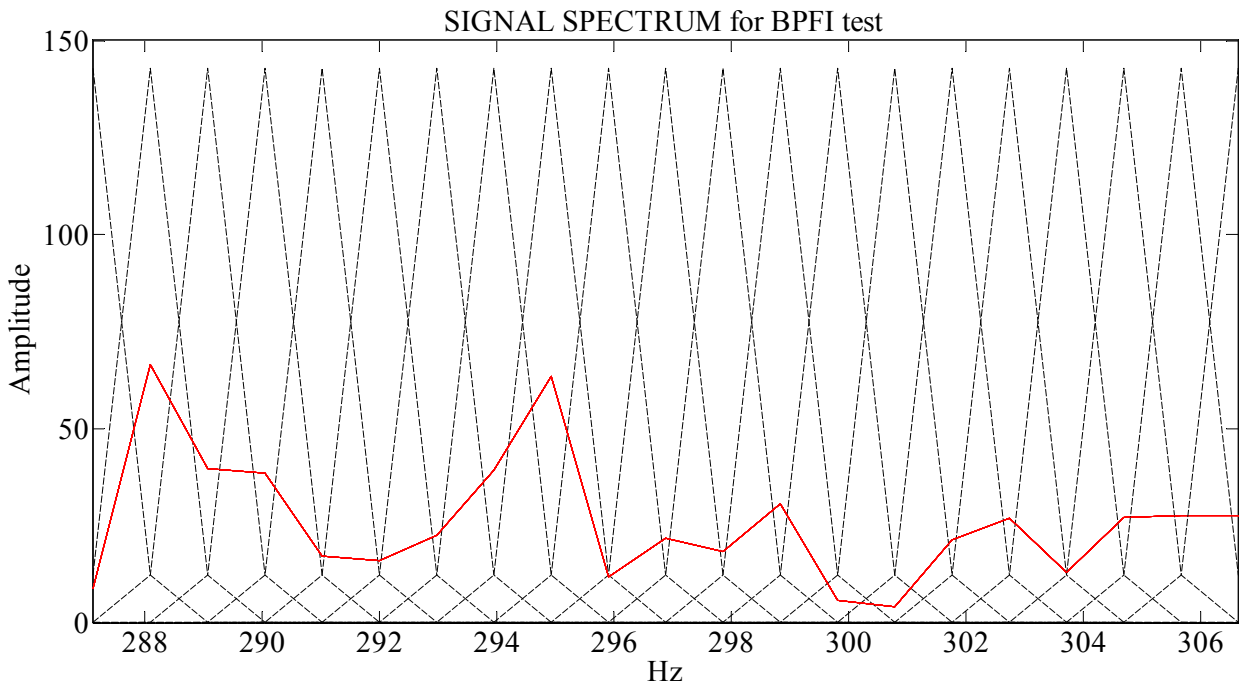


Σχ. 4.37: Ο μέσος όρος της τιμής της Singular Value BPFO

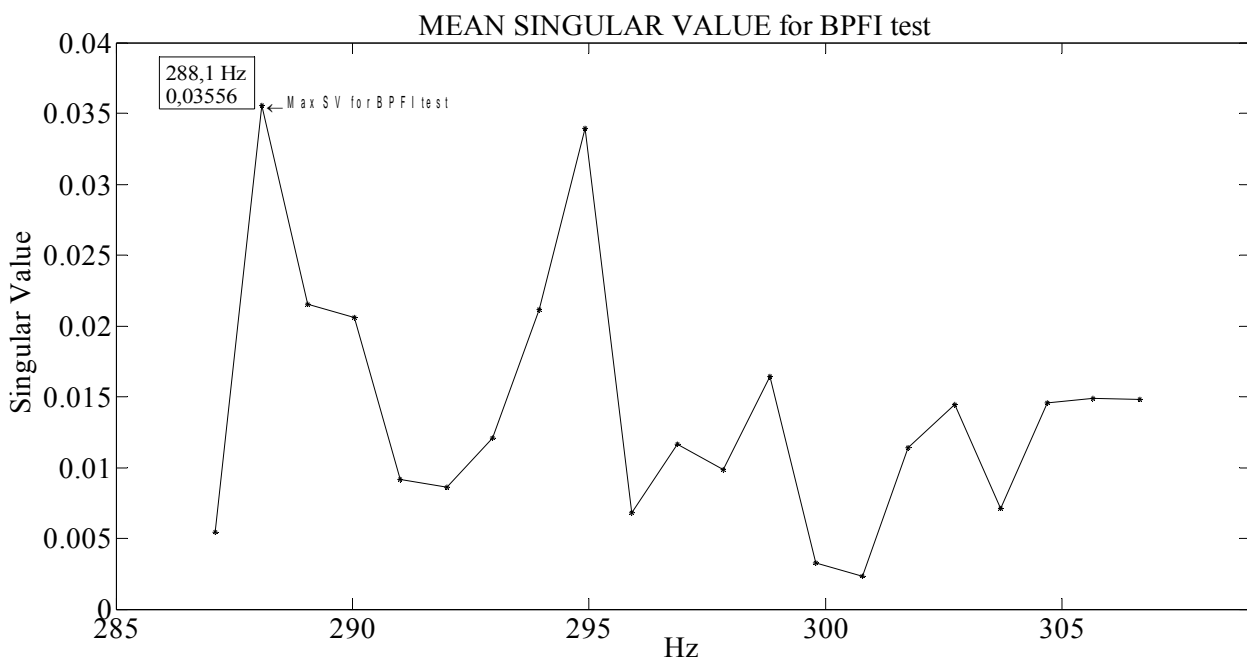
Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο μέγιστος μέσος όρος της τιμής της Singular Value BPFO όλων των βημάτων είναι 0,03555 κι εμφανίζεται στα 232,4 Hz η οποία, θεωρείται προς το παρόν, η πραγματική συχνότητα βλάβης στον εξωτερικό δακτύλιο των ρουλεμάν.

Παράλληλα, η σαρωμένη περιοχή γύρω από τη συχνότητα 296,9 Hz (θεωρητική συχνότητα βλάβης εσωτερικού δακτυλίου των ρουλεμάν, BPFITH) δίνει για το ίδιο σήμα, το Σχ. 4.38 όπου, και πάλι, με κόκκινο διαγράφεται το φάσμα του μορφολογικού σήματος στην περιοχή και με μαύρο το βήμα.

Αντίστοιχα, αφού για κάθε βήμα ξεχωριστά, υπολογίσουμε τη μέση τιμή της Singular Value BPFI προκύπτει το Σχ. 4.39.



Σχ. 4.38: Η περιοχή γύρω από τη θεωρητική συχνότητα βλάβης εσωτερικού δακτυλίου ρουλεμάν

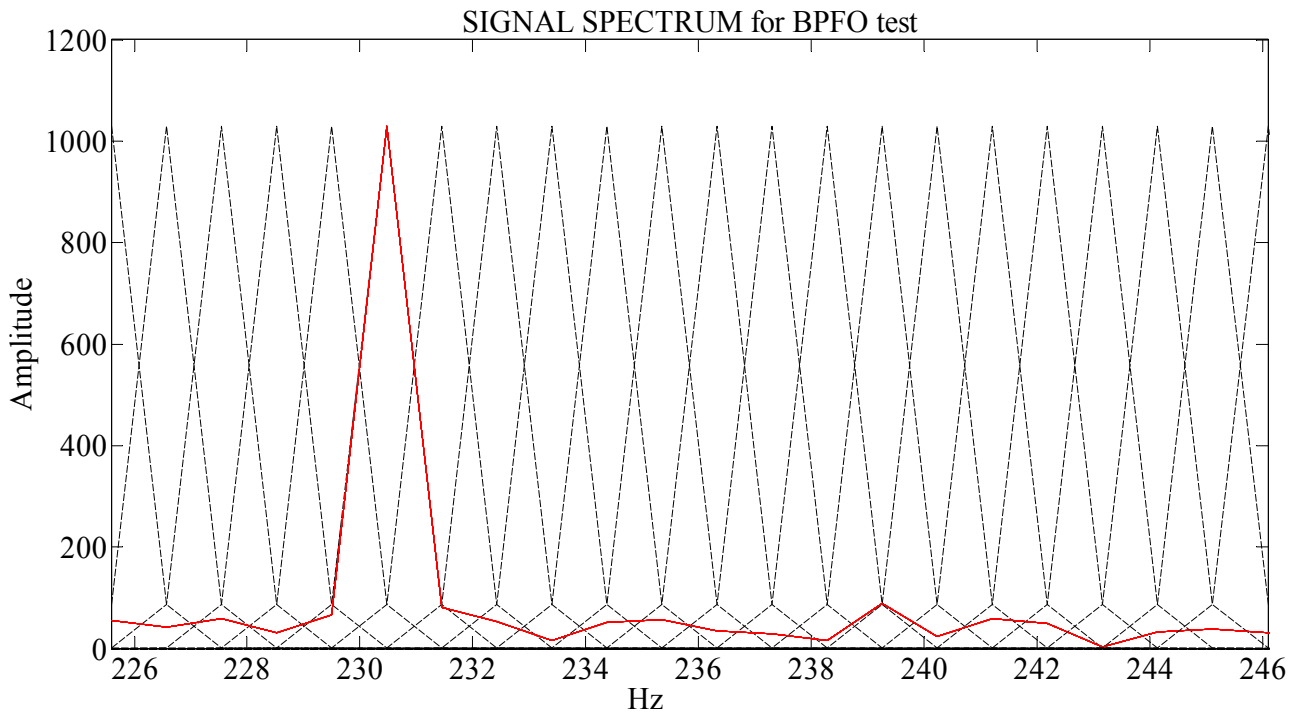


Σχ. 4.39: Ο μέσος όρος της τιμής της Singular Value BPFI

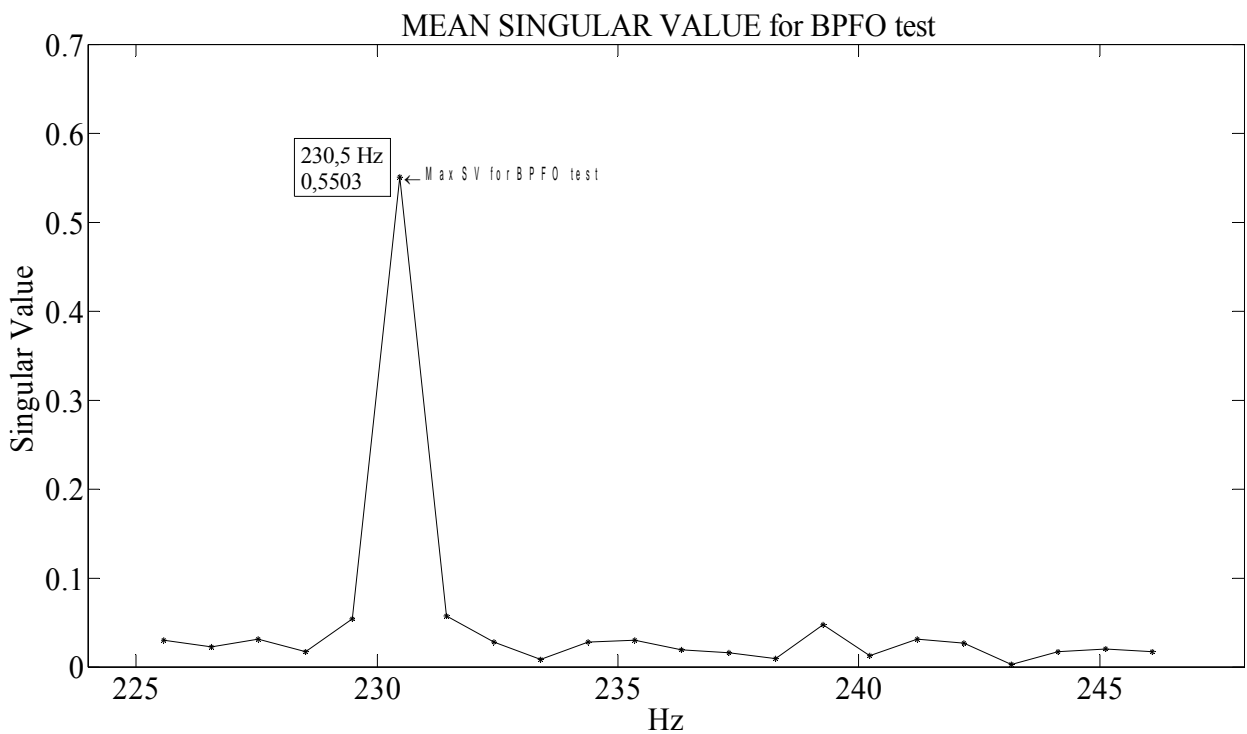
Ο μέγιστος μέσος όρος της τιμής της Singular Value BPFI όλων των βημάτων είναι 0,03556 και καταγράφεται στην συχνότητα 288,1 Hz.

Αντίστοιχα, το 37^ο σήμα του σετ 2, αφού η περιοχή της θεωρητικής συχνότητας της BPFO σαρωθεί, δίνει το Σχ. 4.40 όπου και πάλι, με κόκκινο διαγράφεται το φάσμα και με μαύρο το βήμα σάρωσης.

Αφού υπολογιστούν η μέση τιμή των Singular Value για κάθε βήμα προκύπτει το Σχ. 4.41.



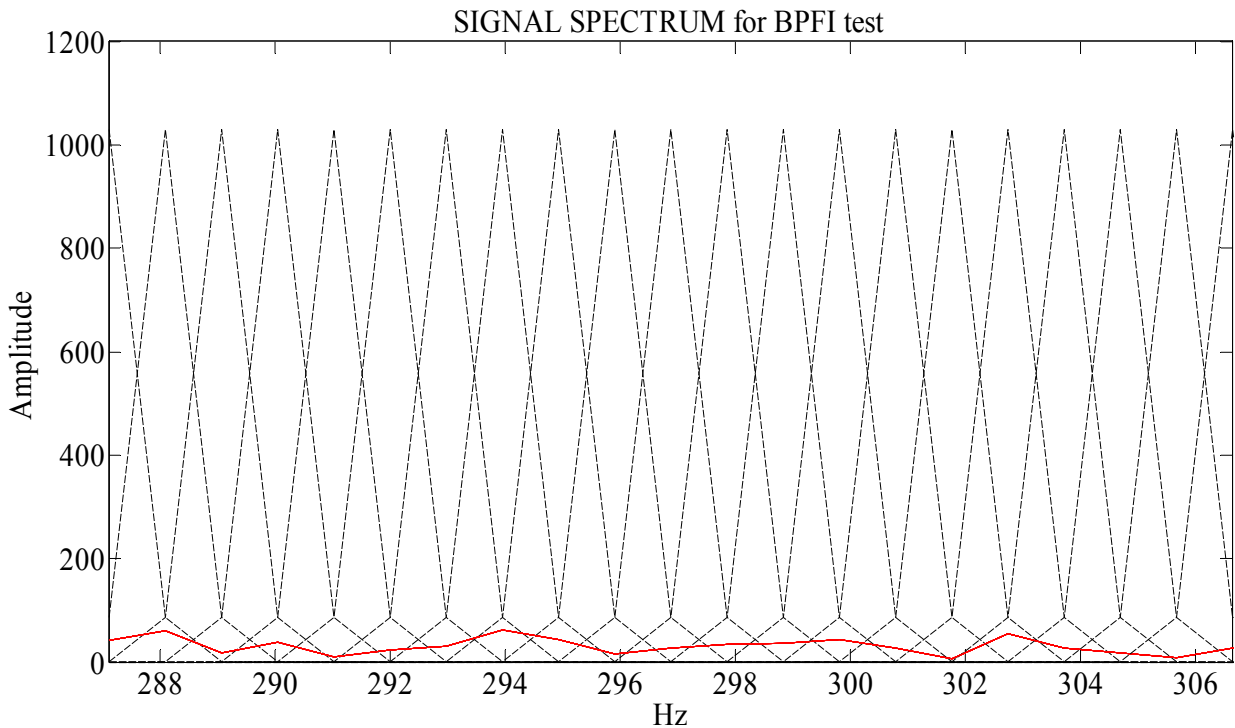
Σχ. 4.40: Η περιοχή γύρω από τη θεωρητική συχνότητα βλάβης εξωτερικού δακτυλίου ρουλεμάν



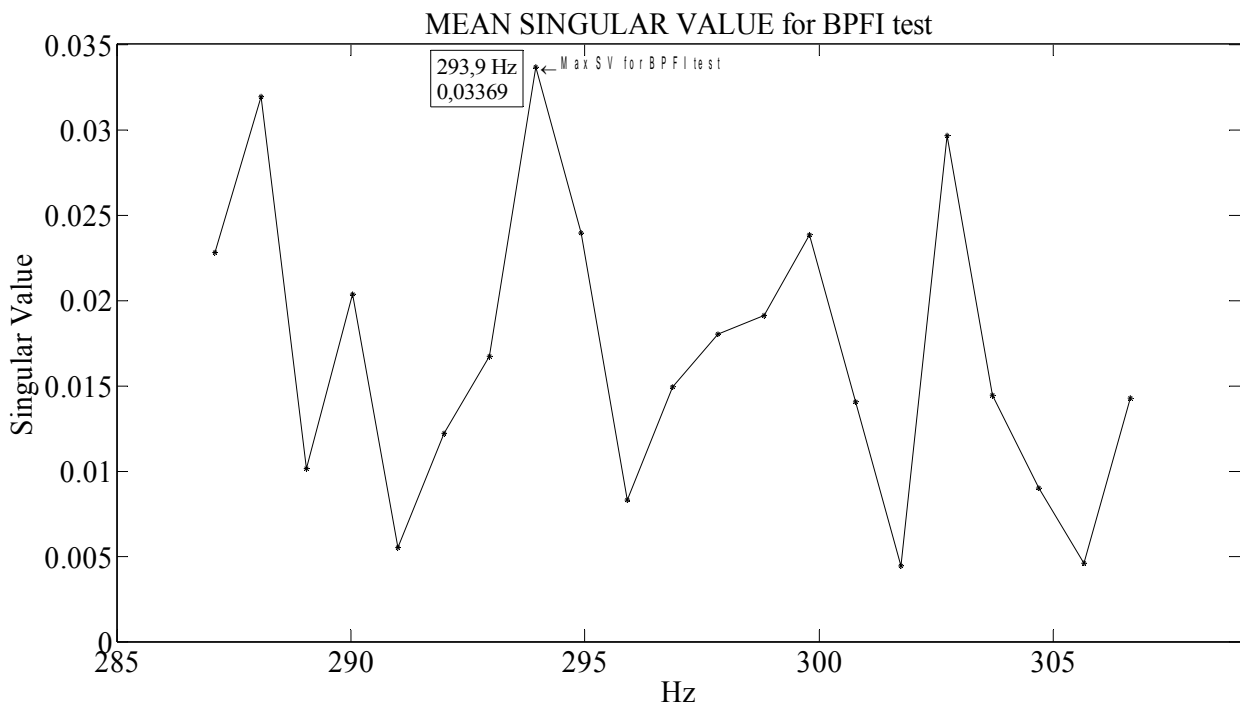
Σχ. 4.41: Ο μέσος όρος της τιμής της Singular Value BPFO

Εδώ, η μέγιστη τιμή των μέσων τιμών όλων των βημάτων είναι 0,5503 και καταγράφεται στην συχνότητα 230,5 Hz που αντιστοιχεί στην πραγματική τιμή της BPF0.

Ενώ, το ίδιο σήμα, για την θεωρητική συχνότητα της BPF1 αφού σαρωθεί δίνει το Σχ. 4.42. Αφού υπολογιστούν η μέση τιμή των Singular Value για κάθε βήμα προκύπτει το Σχ.4.43.



Σχ. 4.42: Η περιοχή γύρω από τη θεωρητική συχνότητα βλάβης εσωτερικού δακτυλίου ρουλεμάν



Σχ. 4.43: Ο μέσος όρος της τιμής της Singular Value BPF1

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, ο μέγιστος μέσος όρος της τιμής της Singular Value BPFI όλων των βημάτων είναι 0,03369 κι εμφανίζεται στη συχνότητα 293,9 Hz.

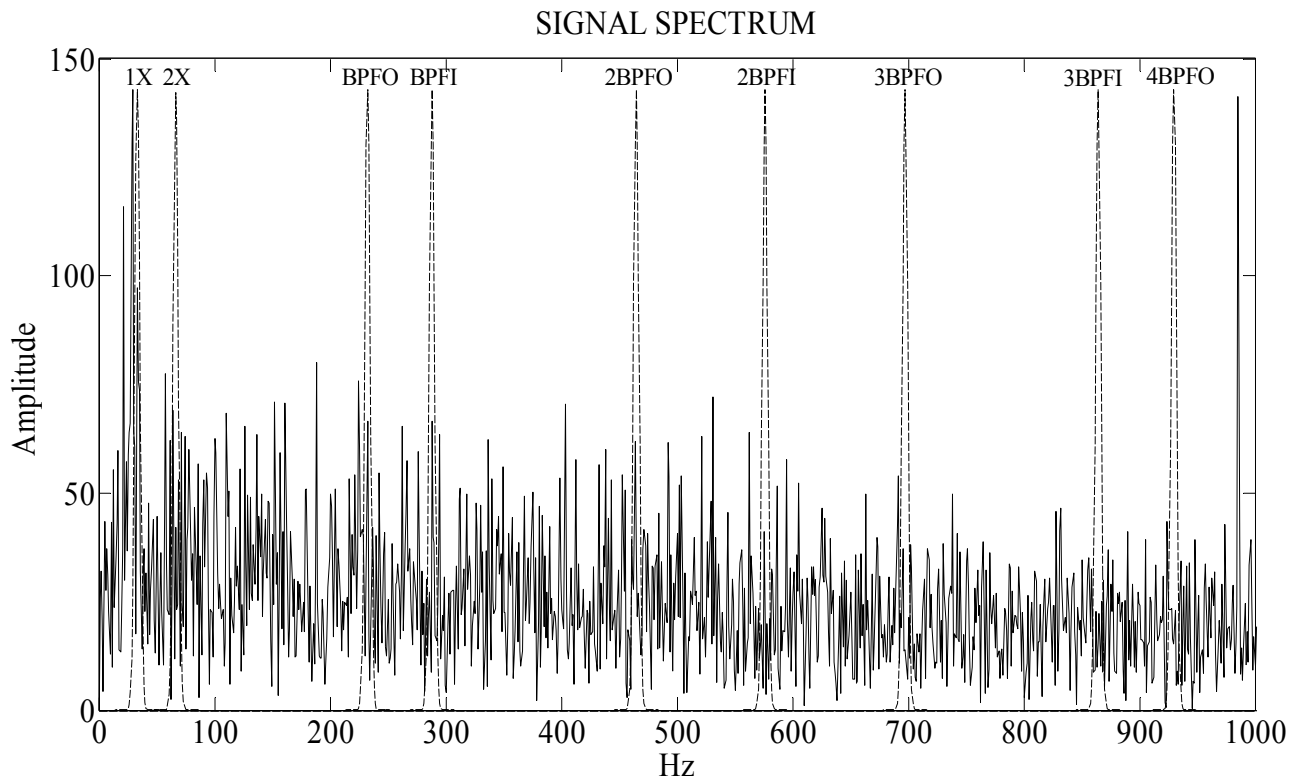
4.4 Υπολογισμός παραμέτρων

Τελικά, αφού υπολογιστεί η (εκάστοτε) τιμή της BPFO και της BPFI, εφαρμόζονται πάνω στο μορφολογικό φάσμα τα παράθυρα Morlet με πλάτος $2df$. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, και για τα δύο σετ, επιλέγεται $N=2$ και το πλάτος f_b των παραθύρων Morlet γίνεται:

$$f_b = Ndf = 2df = 2 \frac{20000 \text{ Hz}}{20480} = 1,953 \text{ Hz} \quad (4.4.1)$$

Τα παράθυρα Morlet έχουν κέντρο τις, γνωστές πλέον, πραγματικές συχνότητες BPFO και BPFI, καθώς και τις πολλαπλάσιες τους 2BPFO, 3BPFO, 4BPFO και 2BPFI και 3BPFI, δηλαδή, όλες τις πολλαπλάσιες που δεν ξεπερνούν τα 1000 Hz. Ακόμα δύο παράθυρα Morlet πέφτουν στο φάσμα με κέντρο αυτήν τη φορά την ήδη γνωστή συχνότητα RPM και την διπλάσιά της 2RPM.

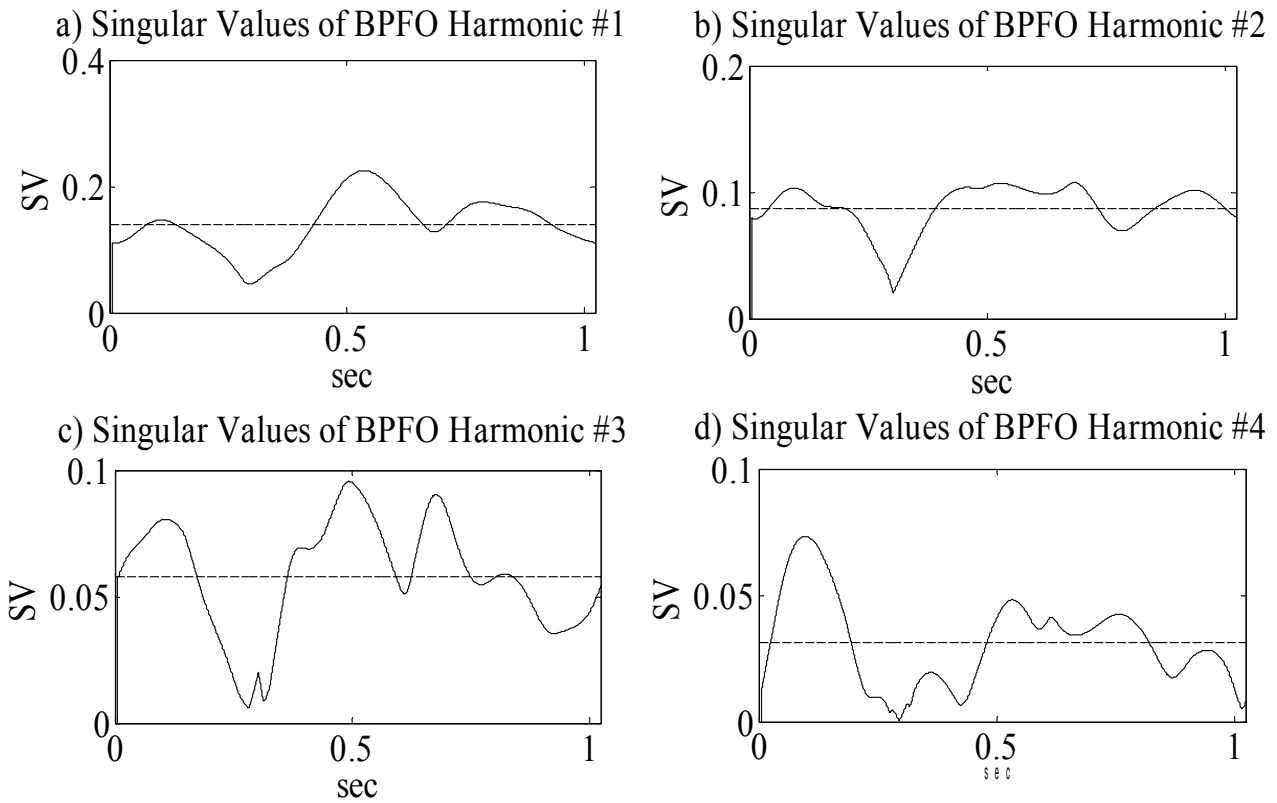
Στο Σχ. 4.44 που ακολουθεί, παρουσιάζεται το μορφολογικό φάσμα του 10^{ου} σήματος μαζί με τα παράθυρα Morlet.



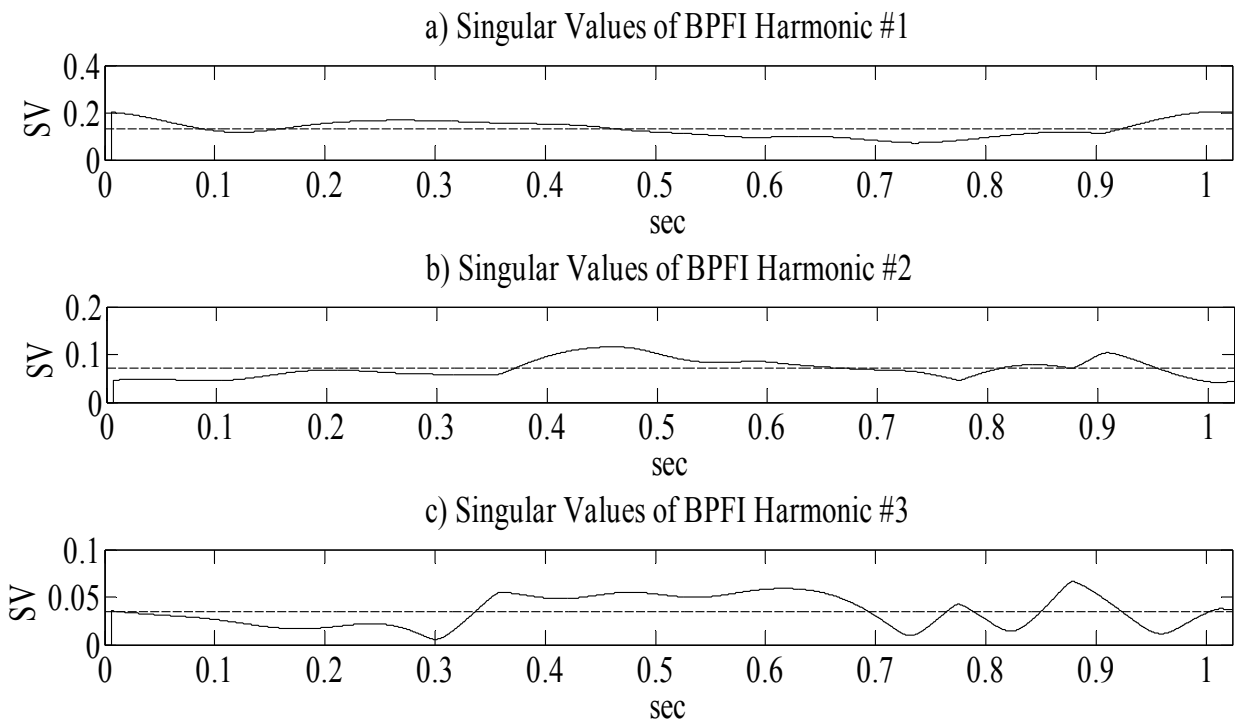
Σχ. 4.44: Το μορφολογικό φάσμα του σήματος 2004.02.13.14.02.39 με τα παράθυρα Morlet

Για τη συχνότητα BPFO και τις πολλαπλάσιές της, η τιμή Singular Value BPFO μεταβάλλεται συναρτησί του χρόνου όπως φαίνεται στο Σχ. 4.45.

Αντίστοιχα, για τις συχνότητες BPFI, 2BPFI και 3BPFI, η τιμή της Singular Value BPFI φαίνεται στο Σχ. 4.46.

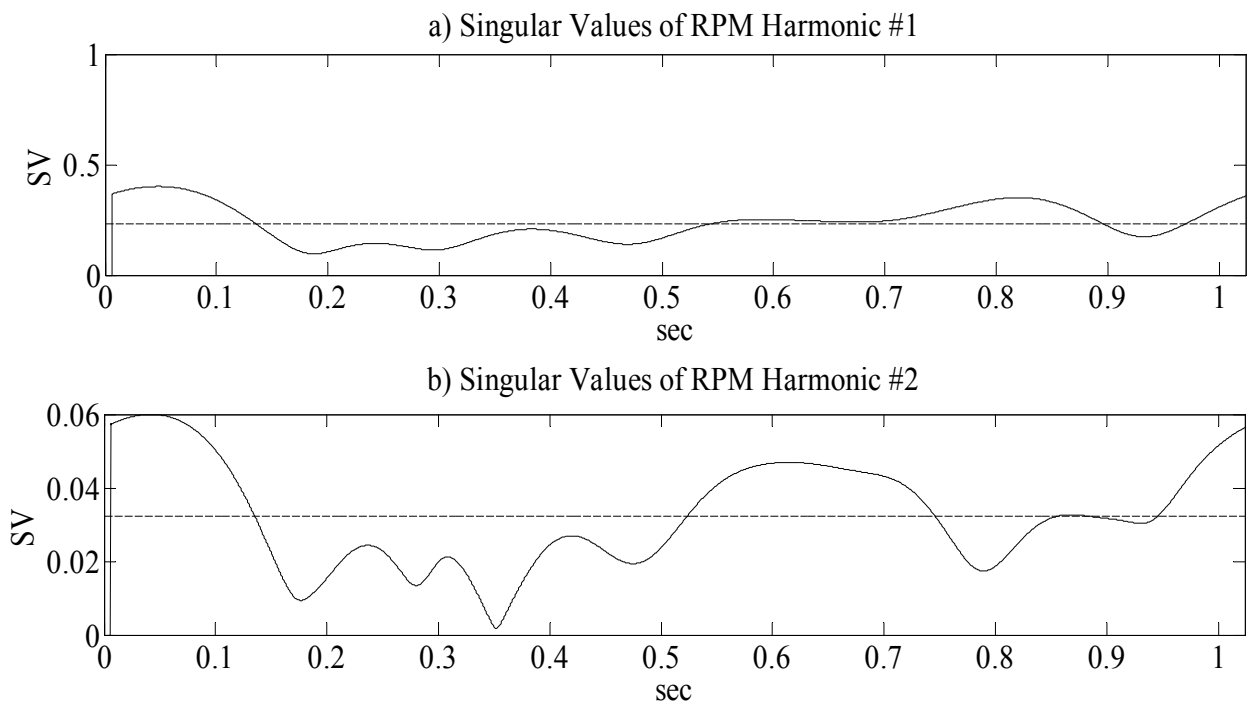


Σχ. 4.45: Η μεταβολή του Singular Value για τις συχνότητες: a)BPFO b)2BPFO c)3BPFO και d)4BPFO



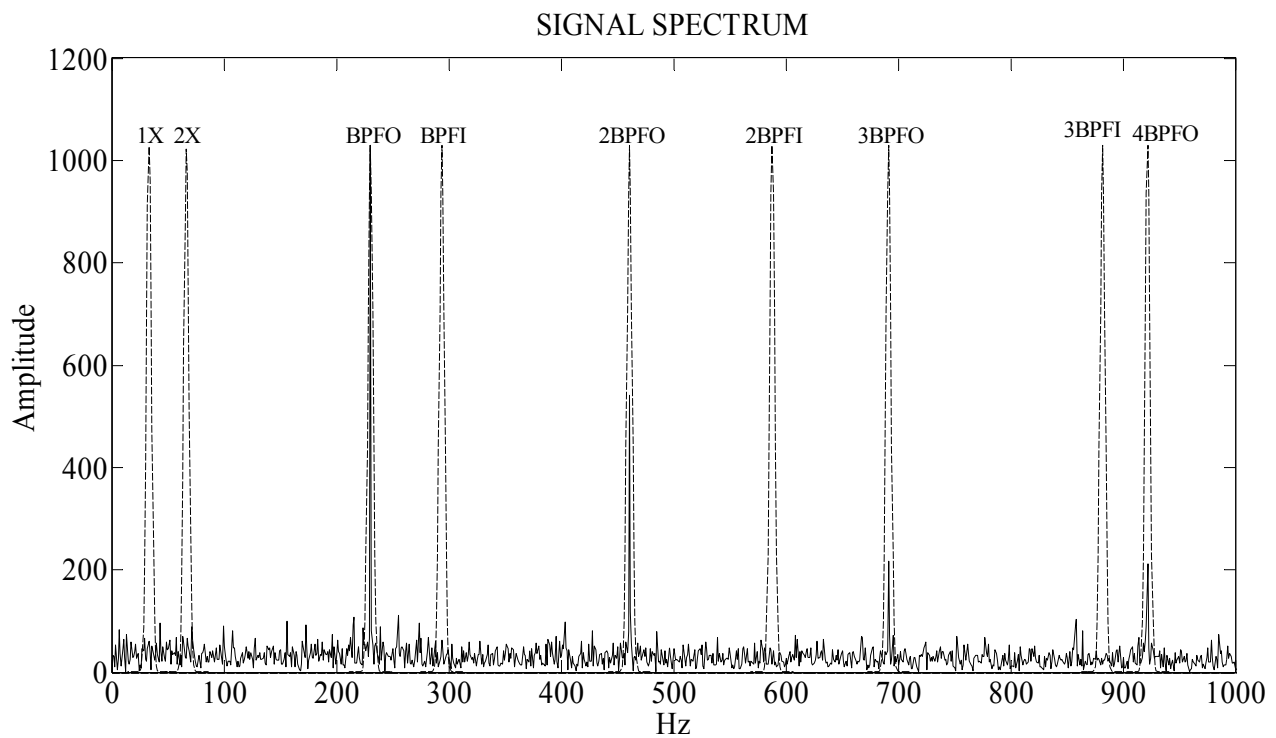
Σχ. 4.46: Η μεταβολή του Singular Value για τις συχνότητες: a)BPFI b)2BPFI και c)3BPFI

Τέλος, για την συχνότητα περιστροφής του άξονα, RPM και την διπλάσιά της, η μεταβολή συναρτήσει του χρόνου της τιμής Singular Value RPM φαίνεται στο Σχ. 4.47.



Σχ. 4.47: Η μεταβολή του Singular Value για τις συχνότητες: a) της RPM και b) της 2RPM

Στο Σχ. 4.48 που ακολουθεί παρατίθεται το μορφολογικό φάσμα του 37^{ου} σήματος μαζί με τα παράθυρα Morlet.

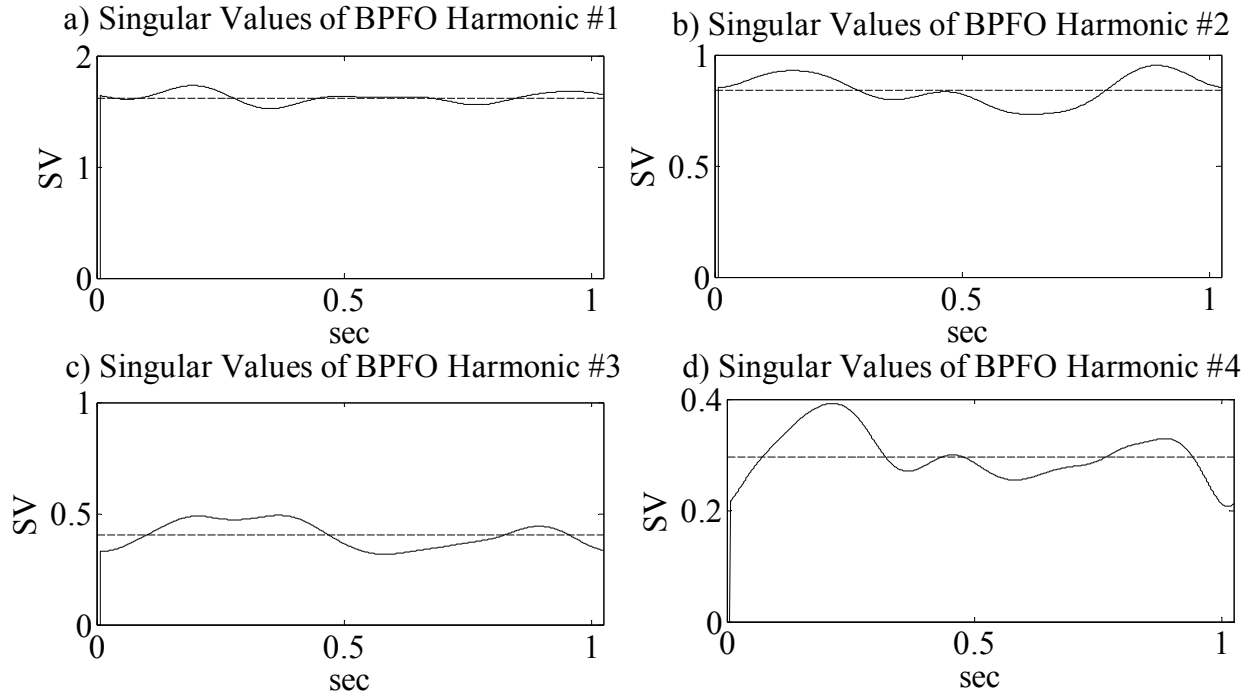


Σχ. 4.48: Το μορφολογικό φάσμα του σήματος 2004.02.18.00.12.39 με τα παράθυρα Morlet

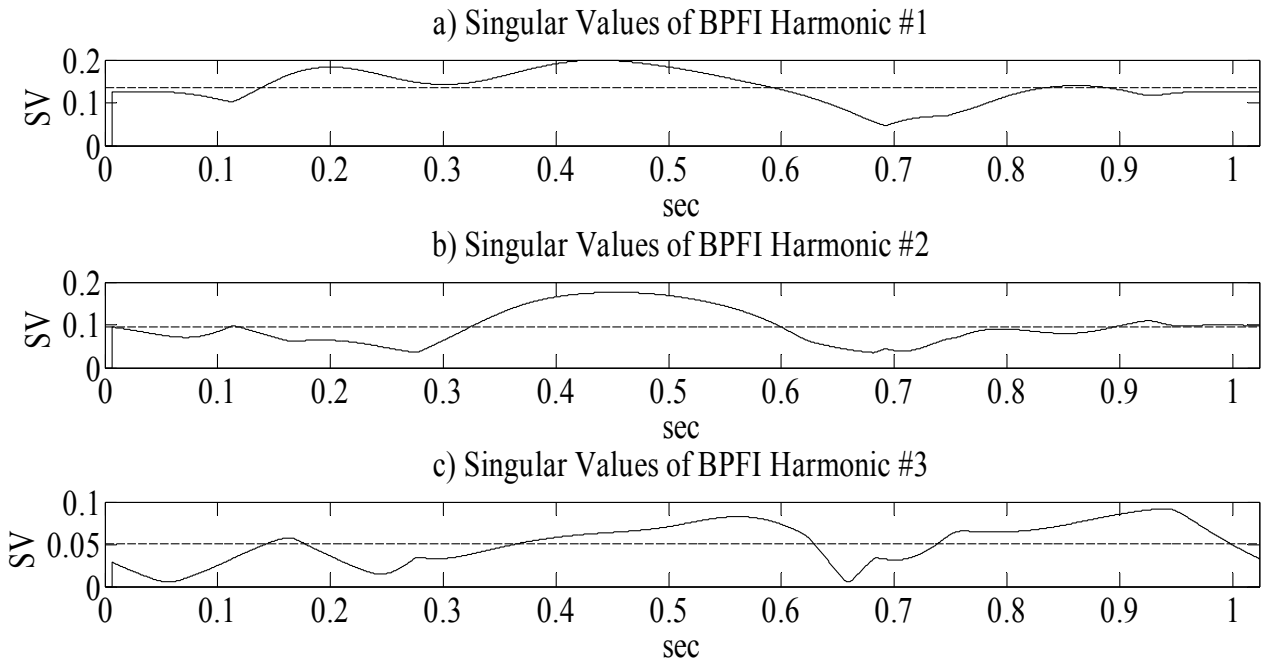
Για τη συχνότητα BPFO και τις πολλαπλάσιές της, η τιμή των ξεχωριστών Singular Value BPFO μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου όπως φαίνεται στο Σχ. 4.49.

Αντίστοιχα, για τις συχνότητες BPFI, 2BPFI και 3BPFI, η τιμή της Singular Value BPFI φαίνεται στο Σχ. 4.50.

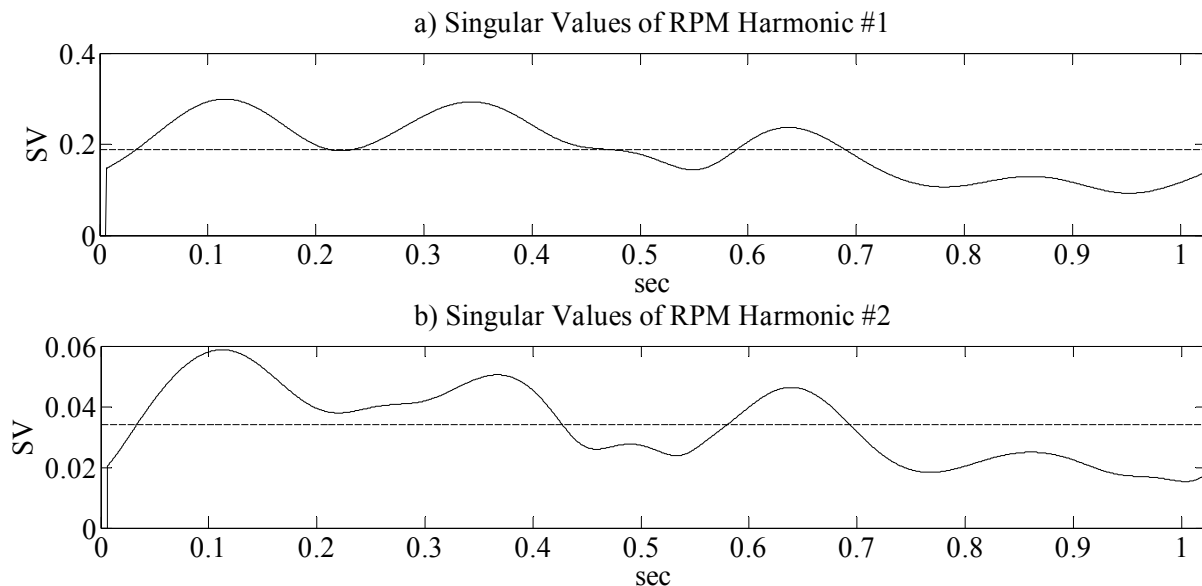
Τέλος, για την συχνότητα περιστροφής του άξονα, RPM και την διπλάσιά της, η μεταβολή συναρτήσει του χρόνου της τιμής Singular Value RPM φαίνεται στο Σχ. 4.51.



Σχ. 4.49: Η μεταβολή του Singular Value για τις συχνότητες: a)BPFO b)2BPFO c)3BPFO και d)4BPFO



Σχ. 4.50: Η μεταβολή του Singular Value για την περιοχή με κέντρο: a)την BPFI b)την 2BPFI και c)την 3BPFI



Σχ. 4.51: Η μεταβολή του Singular Value για την περιοχή: a) της RPM και b) της 2RPM

Αναλύοντας το Σχ. 4.44 προκύπτει ότι τα παράθυρα Morlet φαίνεται έχουν εφαρμόσει καλά στην περίπτωση των συχνοτήτων βλάβης BPFO, BRFI και 2BRFV χωρίς ωστόσο αυτό να είναι σίγουρο γιατί ακόμα οι ακμές αυτών των συχνοτήτων δεν ξεχωρίζουν από τον θόρυβο. Αντίθετα, το παράθυρο Morlet δεν εφαρμόζεται καλά στην συχνότητα περιστροφής του άξονα RPM η ακμή της οποίας βρίσκεται εκτός των ορίων του παραθύρου.

Γενικά, το μέγιστο πλάτος είναι χαμηλό κι αυτό εύκολα εξηγείται από το γεγονός ότι σε αυτό το σήμα δεν υπάρχει βλάβη.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η τιμή των Singular Value να κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα όπως φαίνεται στα Σχ. 4.45 έως 4.47. Συγκεκριμένα, στο Σχ. 4.45(a) το Singular Value BPFO της πρώτης αρμονικής κινείται γύρω από την τιμή 0,1390 συναρτήσει του χρόνου κι όσο περισσότερο αυξάνουν οι αρμονικές τόσο το Singular Value μειώνεται μέχρι που φτάνει να κυμαίνεται γύρω από την τιμή 0,0313 για την τέταρτη αρμονική στο Σχ. 4.45 (d). Το ίδιο συμβαίνει και για τις τιμές των Singular Value BRFI και RPM όπως φαίνεται στα Σχ. 4.46 και 4.47 όπου και πάλι, οι τιμές κινούνται σε χαμηλά επίπεδα με τον μεγαλύτερο μέσο όρο, 0,2332, να εμφανίζεται στην πρώτη αρμονική της RPM. Ομοίως, όσο προχωρούν οι αρμονικές, τόσο μειώνεται η τιμή Singular Value.

Πρέπει να σημειωθεί ότι γενικά, οι τιμές των Singular Value RPM κινούνται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι ακόμα δεν έχει παρουσιαστεί καμία βλάβη.

Αναλύοντας το Σχ. 4.48 είναι σαφές ότι πλάτος είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με το αντίστοιχο διάγραμμα του 10^{ου} σήματος (σχεδόν 8πλάσιες τιμές) πράγμα που ήταν αναμενόμενο. Τα παράθυρα Morlet φαίνεται να έχουν εφαρμόσει εξαιρετικά καλά σε όλες τις αρμονικές της συχνότητας βλάβης εξωτερικού δακτυλίου ρουλεμάν. Το πιο μεγάλο πλάτος δίνει η πρώτη αρμονική, το αμέσως επόμενο είναι της δεύτερης αρμονικής και τα πιο μικρά πλάτη -αν και πάλι σημαντικά αυξημένα- δίνουν οι τρίτη και τέταρτη αρμονική. Για τα υπόλοιπα παράθυρα Morlet δύσκολα φαίνεται αν έχουν εφαρμοστεί σωστά καθώς οι ακμές των αρμονικών της συχνότητας βλάβης εσωτερικού δακτυλίου ρουλεμάν και της συχνότητας περιστροφής δεν ξεχωρίζουν από τον θόρυβο. Πράγμα λογικό, καθώς η μοναδική βλάβη που έχει καταγραφεί είναι σε εξωτερικό δακτύλιο ρουλεμάν.

Όπως ήταν αναμενόμενο, στο Σχ. 4.49 οι τιμές των Singular Value BPFO για όλες τις αρμονικές εμφανίζονται ιδιαίτερα αυξημένες. Συγκεκριμένα, για την πρώτη αρμονική το Singular Value κυμαίνεται γύρω από την τιμή 1,6160 σχεδόν 12πλάσιο από το αντίστοιχο 0,1390 του 10^{ου} σήματος. Η δεύτερη αρμονική κινείται γύρω από την τιμή 0,8397 (σχεδόν 10πλάσια από την αντίστοιχη τιμή, 0,0871), η τρίτη

αρμονική έχει ως μέσο όρο την τιμή 0,4024 (σχεδόν 7πλάσια από την αντίστοιχη τιμή, 0,0580) και τέλος, η τέταρτη αρμονική της συχνότητας βλάβης εξωτερικού δακτυλίου ρουλεμάν κυμαίνεται γύρω από την τιμή 0,2972, σημαντικά μεγαλύτερη (σχεδόν 10πλάσια) από την αντίστοιχη 0,0313 του 10^{ου} σήματος. Και πάλι, δηλαδή, οι τιμές των Singular Value κινούνται πτωτικά, όσο αυξάνει ο αριθμός της αρμονικής.

Αναλύοντας τα Σχ. 4.50 και 4. 51, φαίνεται ότι οι μέσοι όροι των Singular Value BPFI και Singular Value RPM κινούνται όσο χαμηλά κινούνταν στην περίπτωση του 10^{ου} σήματος με τον μέγιστο μέσο όρο να εμφανίζεται στην πρώτη αρμονική της συχνότητας περιστροφής του άξονα, 0,1877 (χαμηλότερο από την αντίστοιχη τιμή, 0,2332).

Για να μπορεί να γίνει πλήρης σύγκριση των δύο σημάτων παρατίθενται τα δεδομένα τους στους παρακάτω πίνακες.

Για το σήμα 10^ο σήμα, 2004.02.13.14.02.39 τα στατιστικά του αποτελέσματα πριν και μετά τη μορφολογική του ανάλυση φαίνονται στον Πιν. 4.7

Ενώ, για το 37^ο σήμα 2004.02.18.00.12.39 τα στατιστικά του αποτελέσματα πριν και μετά τη μορφολογική ανάλυση φαίνονται στον Πιν. 4.8

Πιν. 4.7: Δεδομένα 10^{ου} σήματος

	Κύρτωση	RMS	Ενέργεια	Sing. Val. BPFO	Sing. Val. BPFI	Sing. Val. RPM	Sing. Val. TOTAL
Ακατέργ.	3,4409	0,0776	0,0060	-	-	-	-
Μορφολ.	5,8163	0,1967	0,0365	0,3154	0,2366	0,2654	0,8173

Πιν. 4.8: Δεδομένα 37^{ου} σήματος

	Κύρτωση	RMS	Ενέργεια	Sing. Val. BPFO	Sing. Val. BPFI	Sing. Val. RPM	Sing. Val. TOTAL
Ακατέργ.	3,9433	0,1064	0,0112	-	-	-	-
Μορφολ.	4,6308	0,2844	0,0755	3,1548	0,2819	0,2216	3,6583

Συγκρίνοντας τα δεδομένα των δύο πινάκων, γίνεται σαφές ότι η κύρτωση, η μέση τετραγωνική τιμή κι η ενέργεια του σήματος, είτε πριν είτε μετά τη μορφολογική του ανάλυση, δεν διαφέρουν σημαντικά ανάμεσα στα δύο σήματα παρά το γεγονός ότι το 10^ο σήμα προηγείται άνω των 2,5 ημερών από τη στιγμή που εμφανίζεται η βλάβη και το 37^ο σήμα έπεται της εμφάνισης της βλάβης κατά σχεδόν 1,5 ημέρα (σύνολο 4 μέρες). Τα καλύτερα αποτελέσματα, ωστόσο, από αυτά τα έξι δεδομένα, τα δίνουν οι τιμές της ενέργειας του ακατέργαστου και του μορφολογικά αναλυμένου σήματος, με την πρώτη, από το 10^ο στο 37^ο σήμα, να σημειώνει αύξηση της τάξης του 86,67% και την δεύτερη αύξηση κατά 106,85%.

Αντίθετα με όλες τις προηγούμενες τιμές που είναι αρκετά ασαφές αν είναι ουσιαστικά αποτελέσματα ή τυχαία, τα αποτελέσματα των Singular Values δίνουν πολύ ενδιαφέροντα και σημαντικά αποτελέσματα:

Κατ' αρχάς, η τιμή της ολικής Singular Value πριν και μετά τη βλάβη μεταβάλλεται από 0,8173 σε 3,6583, παρουσιάζει δηλαδή, αύξηση της τάξης του 347,61% που σίγουρα, υποδεικνύει πολύ περισσότερο την ύπαρξη οποιασδήποτε βλάβης.

Η τιμή της ολικής singular value προκύπτει από το άθροισμα των τιμών Singular Value BPFO, Singular Value BPFI και Singular Value RPM, όπως έχει προαναφερθεί. Κοιτώντας τώρα, τις επιμέρους τιμές των Singular Values (BPFO, BPFI και RPM), είναι σαφές ότι οι τιμές Singular Value BPFI και Singular Value RPM έχουν παραμείνει σχεδόν σταθερές, ενώ αντίθετα, η τιμή Singular Value BPFO αυξήθηκε από 0,3154 σε 3,1548, δηλαδή κατά 900,25%. Τα επιμέρους αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι δεν υπάρχει καμία αστοχία στον εσωτερικό δακτύλιο οποιουδήποτε ρουλεμάν και ταυτόχρονα, ότι υπάρχει αστοχία στον

εξωτερικό δακτύλιο τουλάχιστον ενός ρουλεμάν.

Επομένως, με την μέθοδο της μορφολογικής ανάλυσης και χρησιμοποιώντας τις τιμές των Singular Values -και την ολική και τις επιμέρους- μπορεί όχι μόνο να εντοπιστεί εγκαίρως η οποιαδήποτε βλάβη, αλλά και να διαγνωσθεί.

4.5 Εκπαίδευση του συστήματος κι ανίχνευση μη ομαλής λειτουργίας μηχανής

4.5.1 Εκπαίδευση

Η εκπαίδευση του συστήματος λαμβάνει χώρα για δύο διαφορετικές στατιστικές μεθόδους, την $X_{\bar{}}$ και την X_{EWMA} , και ξεχωριστά για κάθε ένα από τα αποτελέσματα της κύρτωσης, της μέσης τετραγωνικής τιμής και του Singular Value. Με αυτόν τον τρόπο θα είναι δυνατή η σύγκριση των συμβατικών δεικτών (κύρτωσης και μέσης τετραγωνικής τιμής) με το Singular Value.

Για να γίνει η εκπαίδευση του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τα πρώτα 20 σήματα του κάθε σετ, δηλαδή 40 σήματα συνολικά, ως γνωστόν όλα καταγεγραμμένα όταν η μηχανή δεν είχε παρουσιάσει ακόμα καμία βλάβη. Οι αντίστοιχοι δείκτες των σημάτων των σετ συνδυάστηκαν μεταξύ τους, σύμφωνα με τις δύο στατιστικές μεθόδους που ακολουθούνται. Ο συνδυασμός αυτός είχε ως αποτέλεσμα 20 “νέα σήματα” με νέες τιμές δεικτών κύρτωσης, μέσης τετραγωνικής τιμής και Singular Value για κάθε στατιστική μέθοδο.

Έγιναν συνολικά πέντε εκπαιδεύσεις, οι οποίες αφορούν την κύρτωση πριν και μετά τη μορφολογική ανάλυση των σημάτων, την μέση τετραγωνική τιμή πριν και μετά τη μορφολογική ανάλυση και το Singular Value. Για όλες τις εκπαιδεύσεις που έγιναν με την στατιστική μέθοδο X_{EWMA} επιλέχθηκε το όριο εμπιστοσύνης να είναι 95% κι ο συντελεστής βαρύτητας $w=0,6$.

Για κάθε εκπαίδευση, δηλαδή για κάθε συνδυασμό περιπτώσεων από αυτές, προέκυψαν 2 οριακές τιμές, η ανώτατη αποδεκτή, UCL κι η κατώτατη αποδεκτή, LCL. Το αν κάποιο μετέπειτα σήμα θεωρηθεί ότι δείχνει αν η μηχανή έχει βλάβη ή όχι, θα εξαρτηθεί από το αν η αντίστοιχη τιμή βρίσκεται εντός των ορίων ή εκτός.

Στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζονται οι διάφορες τιμές UCL και LCL που προέκυψαν για κάθε εκπαίδευση.

Πίν 4.9: Αποδεκτά όρια των δεικτών

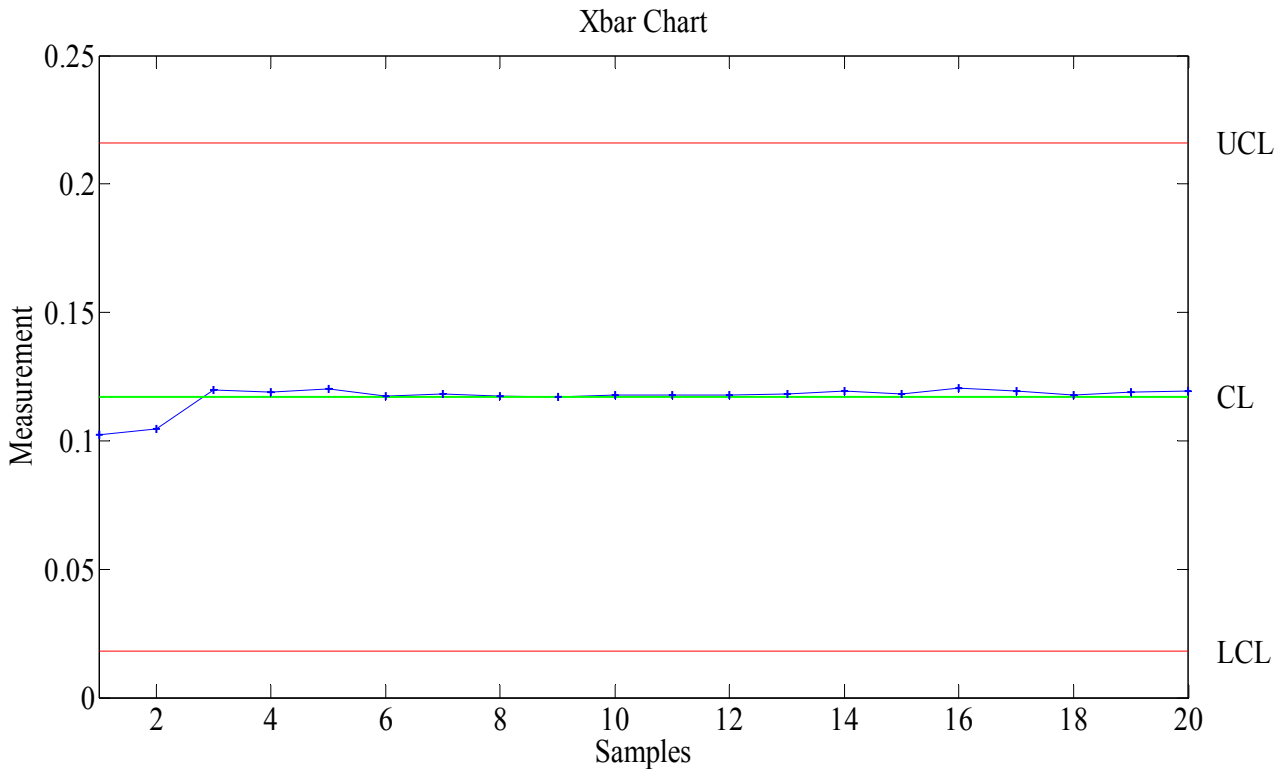
	$X_{\bar{}}$		X_{EWMA}	
	UCL	LCL	UCL	LCL
RMS Ακατέργασ.	0,2161	0,0180	0,1819	0,0522
RMS Μορφολ.	0,5795	0,0338	0,4853	0,1281
Κύρτωση Ακατέργασ.	3,8310	3,2360	3,7280	3,3390
Κύρτωση Μορφολ.	12,6600	2,1650	10,8500	3,9770
Singular Value	1,3040	0,6502	1,1910	0,7631

Για να είναι περισσότερο σαφές πως προέκυψαν αυτές οι οριακές τιμές συναρτήσει του αύξοντα αριθμού σήματος, παρατίθενται τα Σχ. 4.52 έως 4.61.

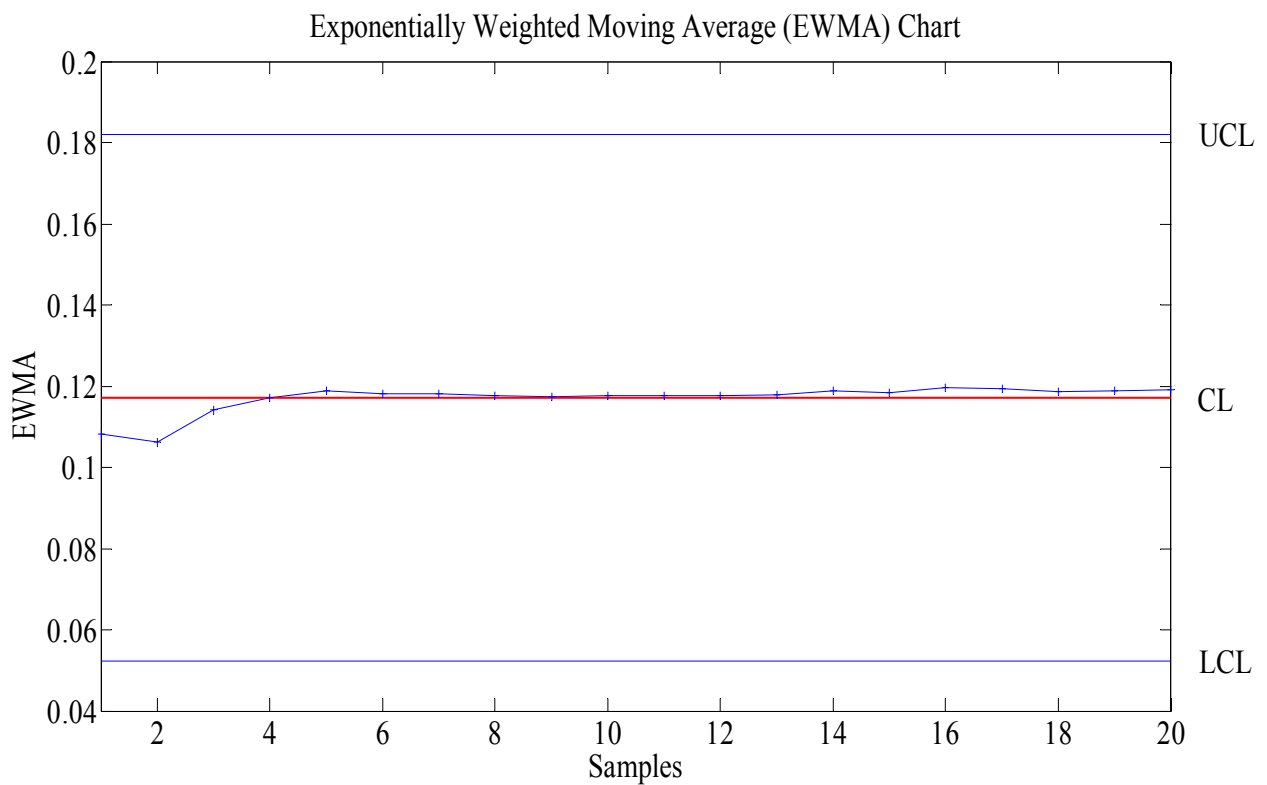
Για τα ακατέργαστα σήματα οι οριακές τιμές της μέσης τετραγωνικής τιμής για τη μέθοδο $X_{\bar{}}$ και X_{EWMA} φαίνονται στα Σχ. 4.52 και 4.53.

Αντίστοιχα, για επεξεργασμένα σήματα οι οριακές τιμές που προκύπτουν για την κύρτωση με τις

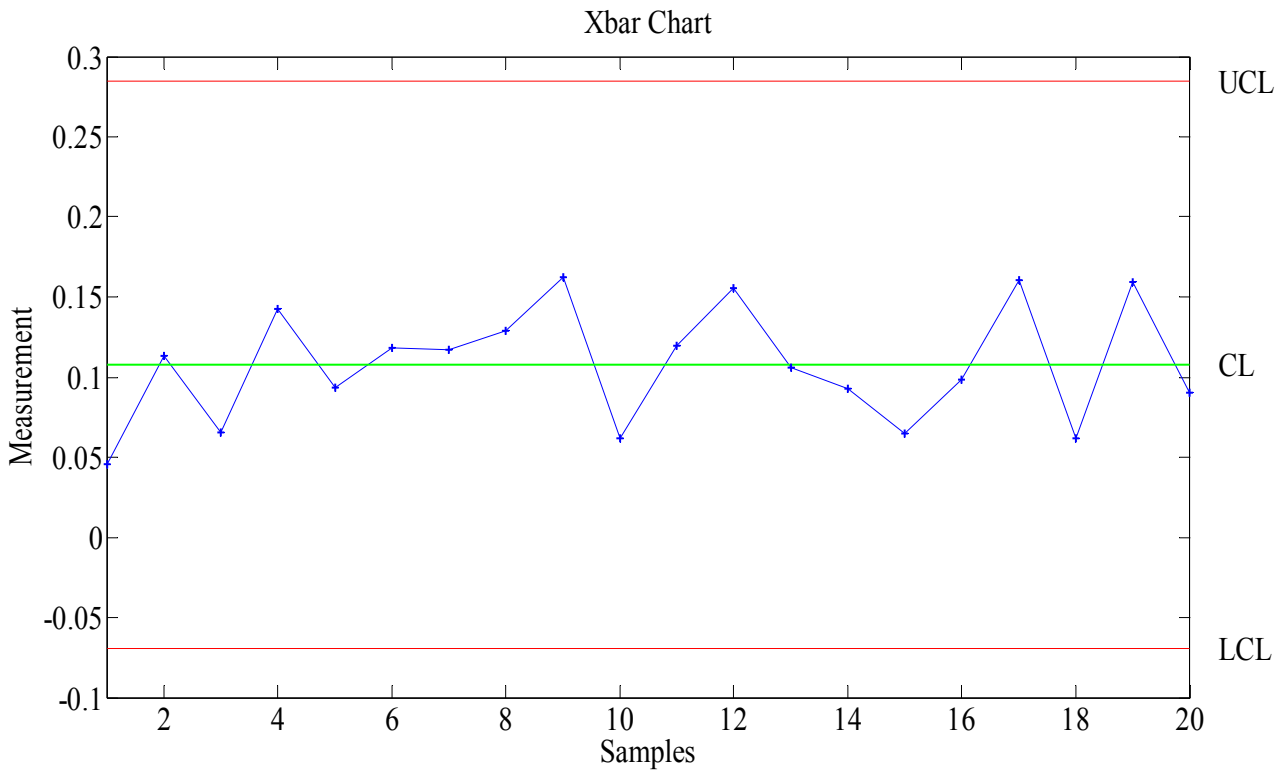
μεθόδους \bar{X} και X_{EWMA} φαίνονται στα Σχ. 4.54 και 4.55.



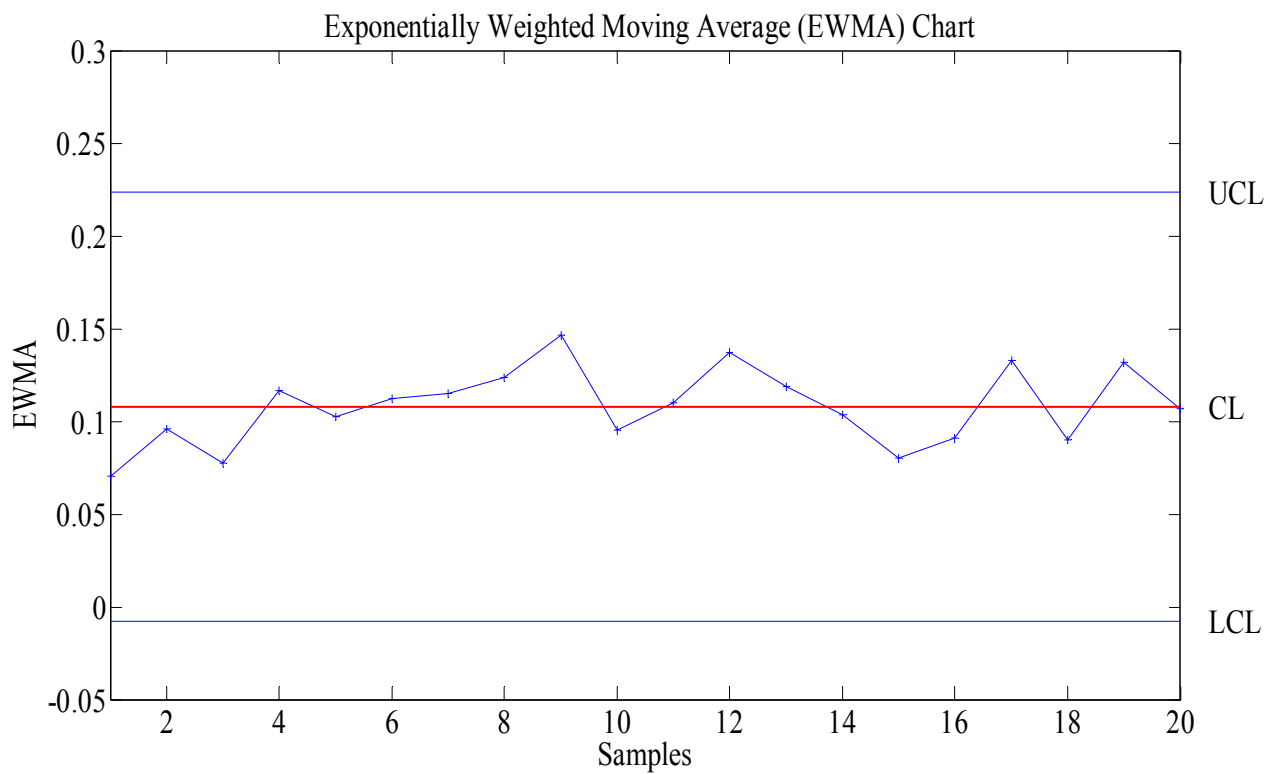
Σχ. 4.52: Αποτελέσματα εκπαίδευσης με τη μέθοδο \bar{X} για την μέση τετραγωνική τιμή των μη επεξεργασμένων σημάτων



Σχ. 4.53: Αποτελέσματα εκπαίδευσης με τη μέθοδο X_{EWMA} για την μέση τετραγωνική τιμή των μη επεξεργασμένων σημάτων

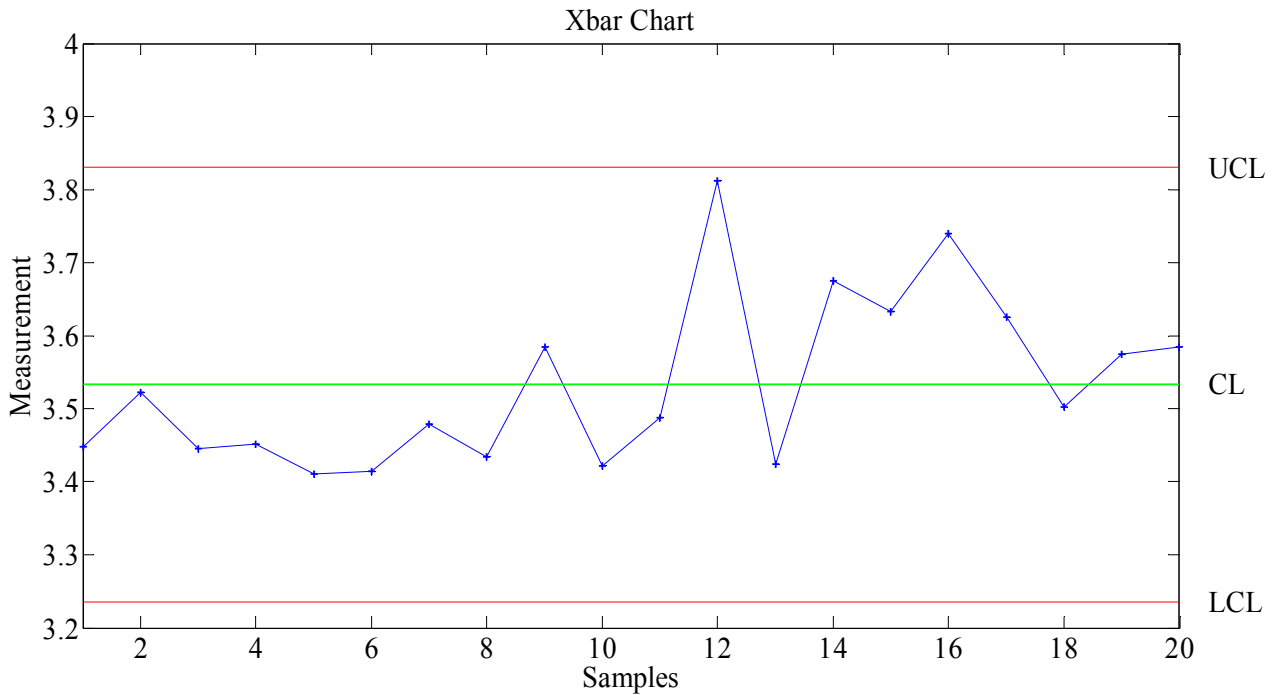


Σχ. 4.54: Αποτελέσματα εκπαίδευσης με τη μέθοδο \bar{X} για την μέση τετραγωνική τιμή των αναλυμένων μορφολογικά σημάτων

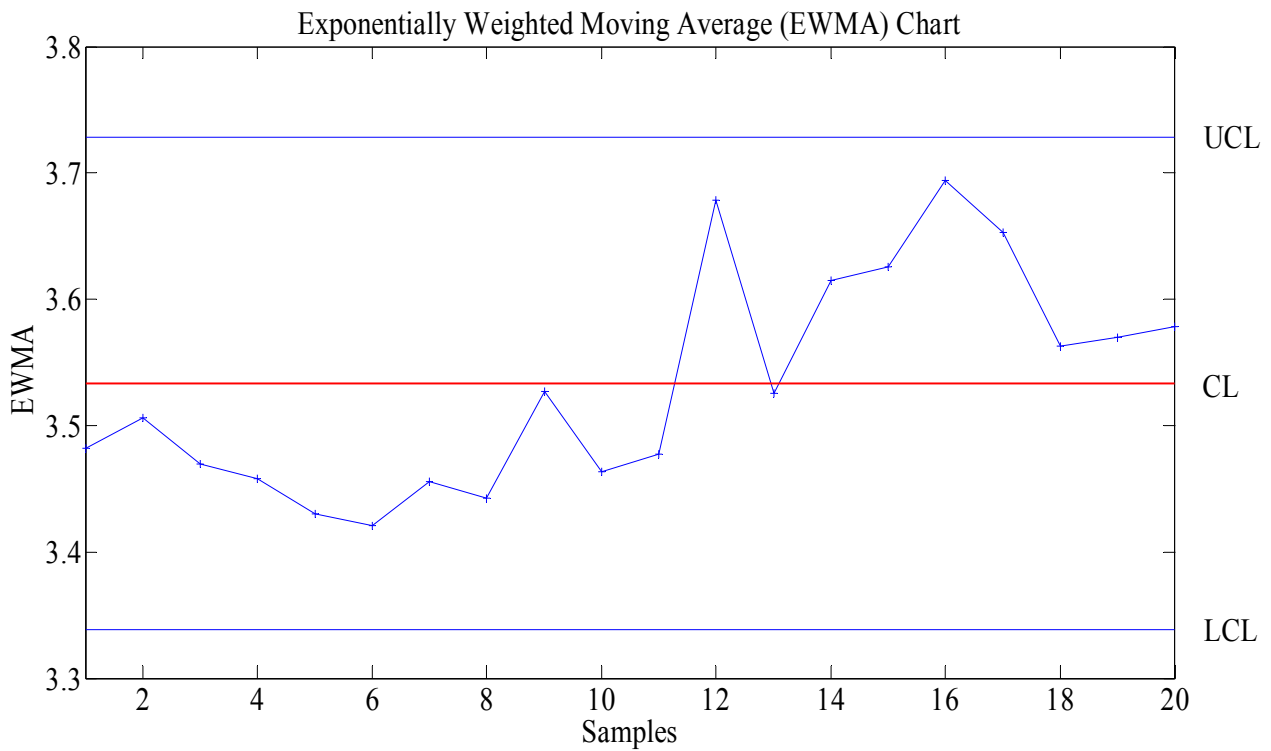


Σχ. 4.55: Αποτελέσματα εκπαίδευσης με τη μέθοδο X_{EWMA} για την μέση τετραγωνική τιμή των αναλυμένων μορφολογικά σημάτων

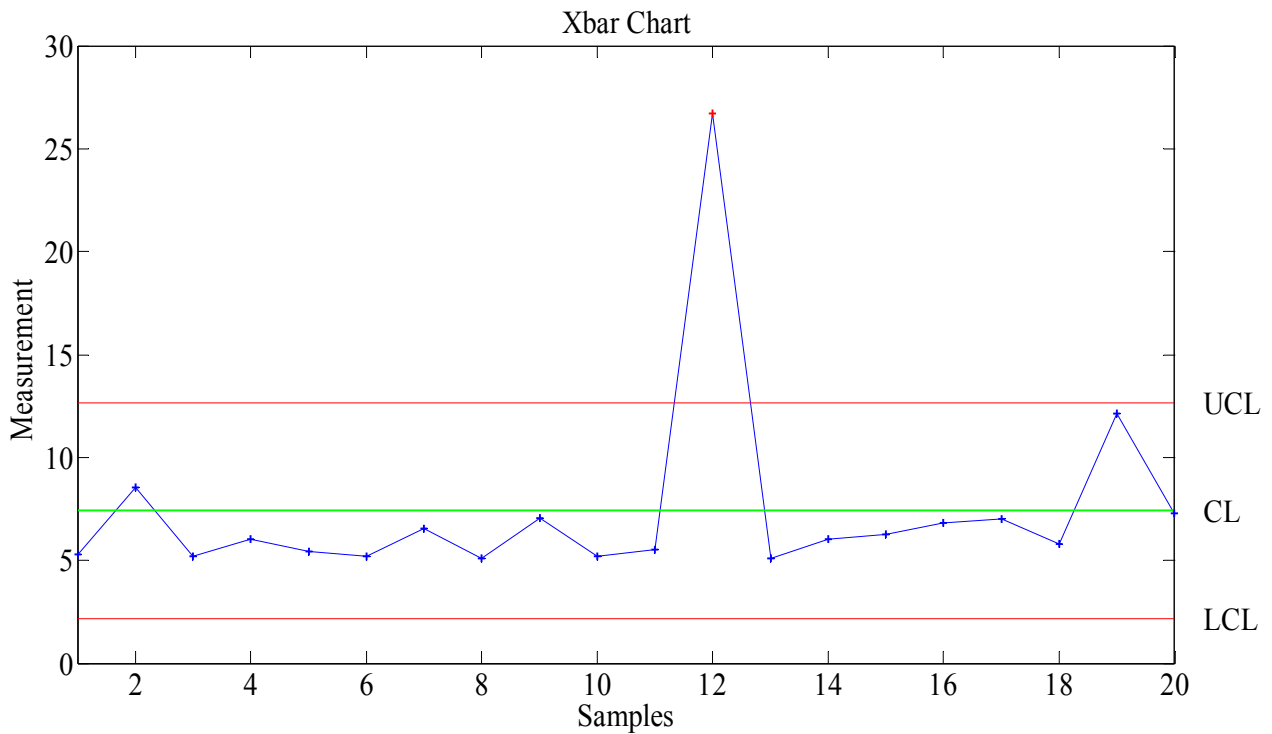
Για τα ακατέργαστα σήματα οι οριακές τιμές της κύρτωσης για τη μέθοδο $X_{\bar{x}}$ και X_{EWMA} φαίνονται στα Σχ. 4.56 και 4.57 ενώ, για τα αναλυμένα μορφολογικά σήματα, οι αντίστοιχες τιμές για τη μέθοδο $X_{\bar{x}}$ και X_{EWMA} φαίνονται στα Σχ. 4.58 και 4.59.



Σχ. 4.56: Αποτελέσματα εκπαίδευσης με τη μέθοδο $X_{\bar{x}}$ για την κύρτωση των μη αναλυμένων μορφολογικά σημάτων

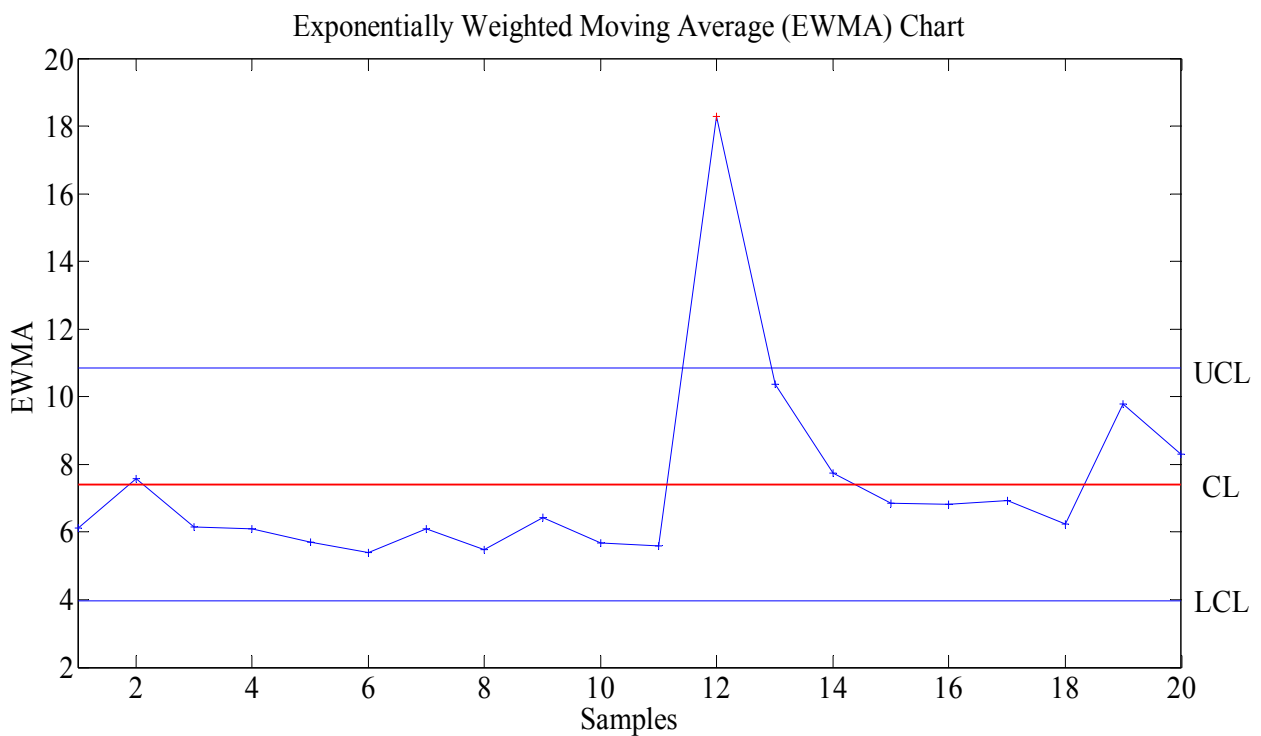


Σχ. 4.57: Αποτελέσματα εκπαίδευσης με τη μέθοδο X_{EWMA} για την κύρτωση των μη επεξεργασμένων σημάτων



Σχ. 4.58: Αποτελέσματα εκπαίδευσης με τη μέθοδο $X_{\bar{a}}$ για την κύρτωση των αναλυμένων μορφολογικά σημάτων

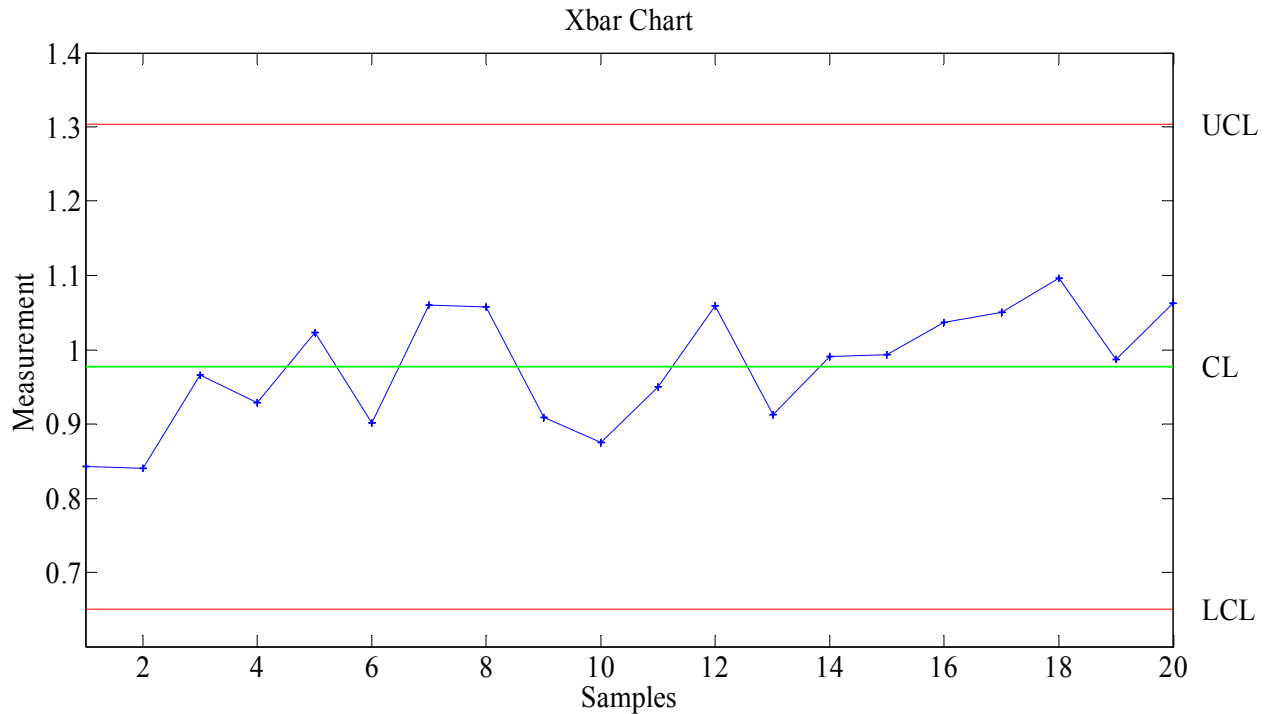
Στο Σχ. 4.58 φαίνεται ότι η τιμή του αποτελέσματος με τη μέθοδο $X_{\bar{a}}$ του 12^{ου} σήματος βρίσκεται εκτός των αποδεκτών ορίων UCL και LCL. Παρά το γεγονός αυτό, η συγκεκριμένη τιμή -όπως όλες- συμμετείχε στην διαμόρφωσή τους.



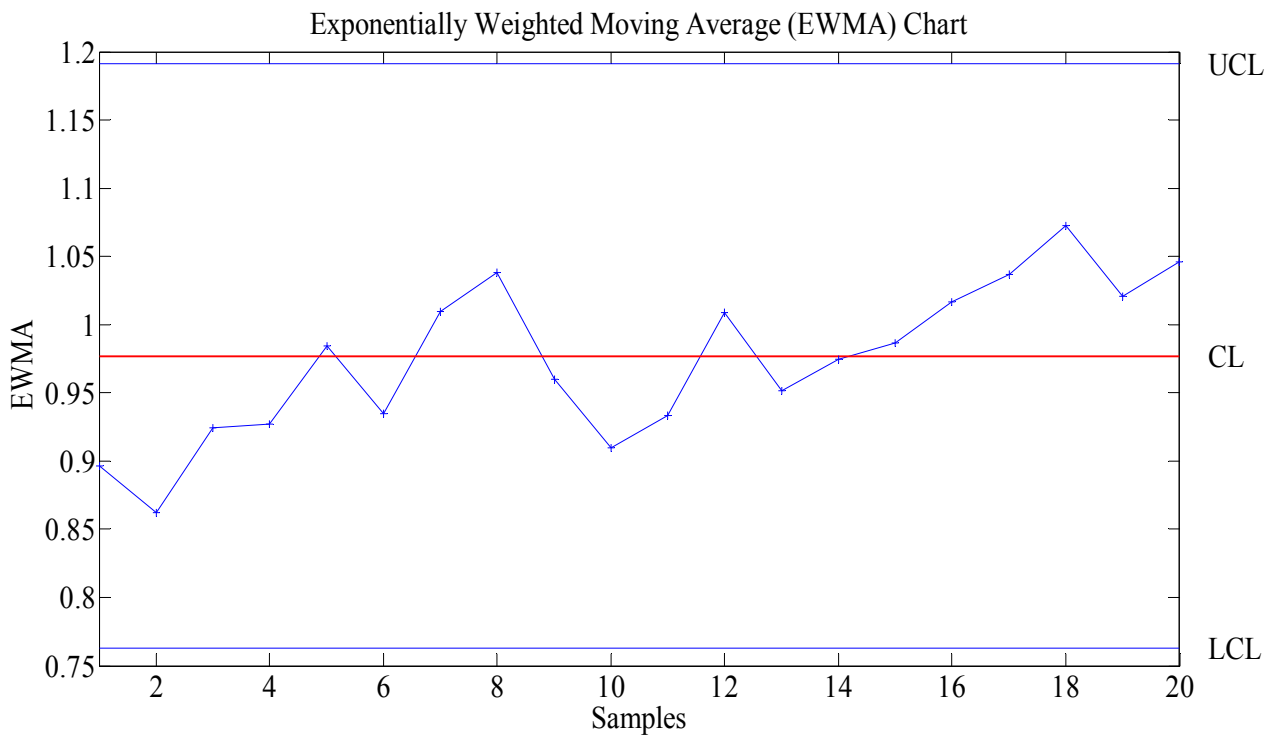
Σχ. 4.59: Αποτελέσματα εκπαίδευσης με τη μέθοδο X_{EWMA} για την κύρτωση των αναλυμένων μορφολογικά σημάτων

Ομοίως, στο Σχ. 4.59 φαίνεται ότι και για την μέθοδο X_{EWMA} , η τιμή του αποτελέσματος του 12^{ου} σήματος βρίσκεται εκτός των αποδεκτών ορίων. Και πάλι, η συγκεκριμένη τιμή συμμετείχε στην διαμόρφωσή τους.

Τέλος, στα Σχ. 4.60 και 4.61 παρατίθενται τα αποτελέσματα των μεθόδων $X_{\bar{x}}$ και X_{EWMA} για το Singular Value.



Σχ. 4.60: Αποτελέσματα εκπαίδευσης με τη μέθοδο $X_{\bar{x}}$ για την τιμή Singular Value



Σχ. 4.61: Αποτελέσματα εκπαίδευσης με τη μέθοδο X_{EWMA} για την τιμή Singular Value

Αναλύοντας το σύνολο των παραπάνω διαγραμμάτων, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι τα αποδεκτά όρια UCL και LCL είναι πιο στενά για την μέθοδο X_{EWMA} σε σχέση με την μέθοδο $X_{\bar{x}}$, όπως κι ήταν αναμενόμενο.

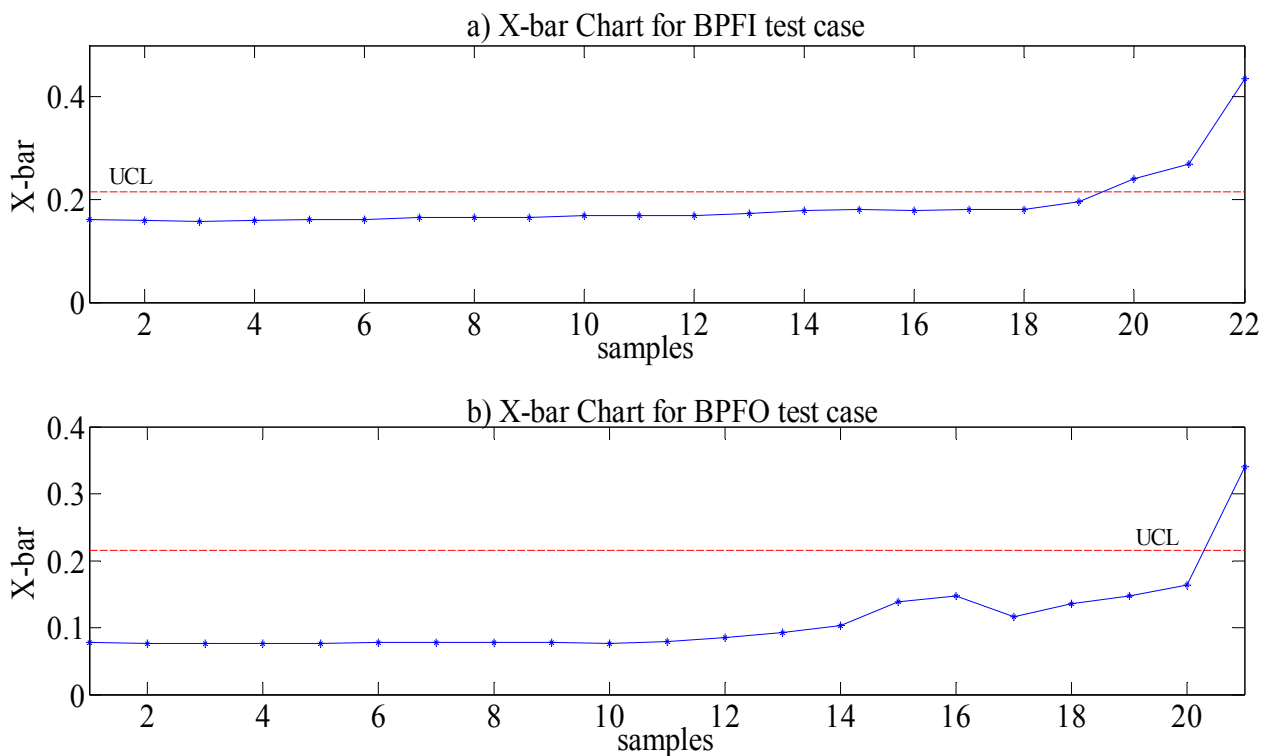
4.5.2 Εντοπισμός σφάλματος

Για να φανεί αν τα αποτελέσματα της εκάστοτε εκπαίδευσης του συστήματος είναι αξιόπιστα, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από όλα τα υπόλοιπα 21 και 22 σήματα του κάθε σετ, δηλαδή 43 σήματα συνολικά (προφανώς άλλα καταγεγραμμένα πριν την εμφάνιση της εκάστοτε βλάβης κι άλλα αργότερα). Με αυτά τα σήματα θα γίνουν δοκιμές ώστε να επιβεβαιωθεί αν τελικά, μπορούν να εξαχθούν αξιόλογα συμπεράσματα από οποιαδήποτε από τις παραπάνω εκπαιδεύσεις.

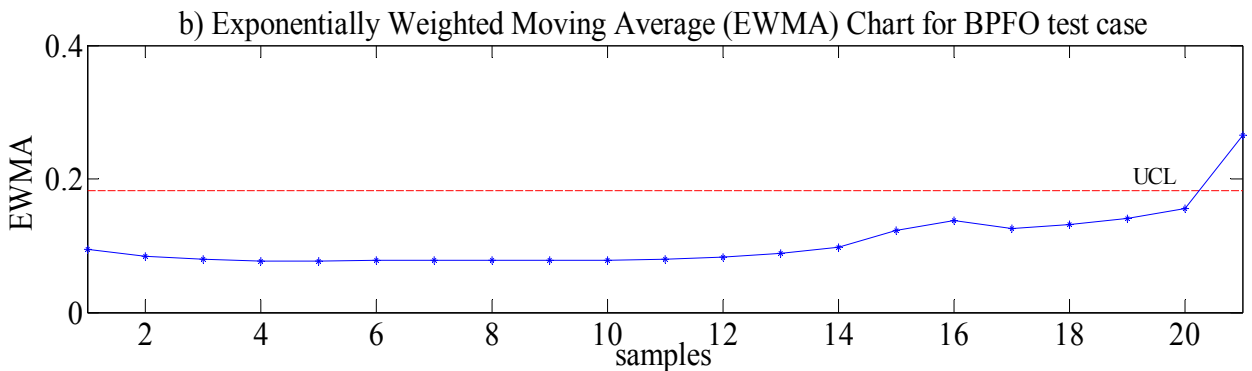
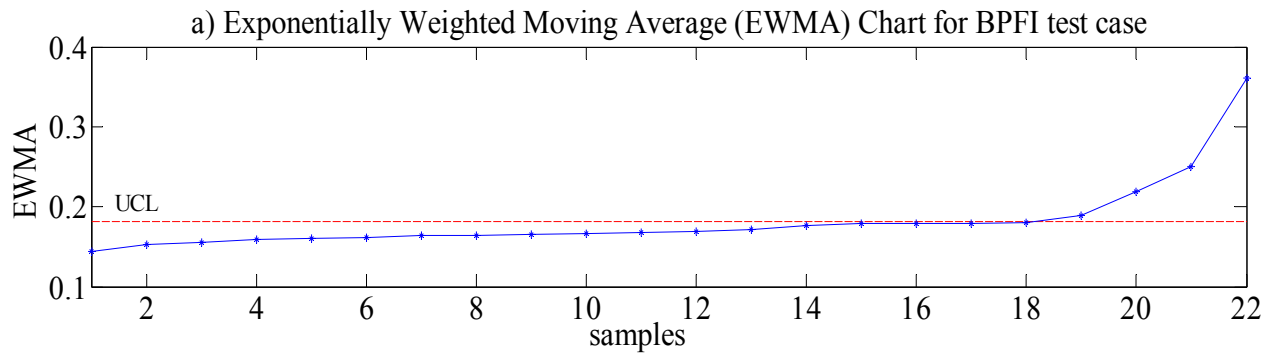
Αφού το σύστημα είναι πλέον εκπαιδευμένο, είναι θεωρητικά δυνατό να γίνει ο εντοπισμός της βλάβης. Για κάθε ακόμα σήμα ξεχωριστά, το σύστημα υπολογίζει τις νέες τιμές $X_{\bar{x}}$ και X_{EWMA} για κάθε μία από τις πέντε εκπαιδεύσεις. Αν μια τιμή, δεν βρίσκεται εντός των ορίων UCL και LCL, τότε το σύστημα θεωρεί ότι η μηχανή παρουσιάζει βλάβη. Αντίθετα, αν είναι εντός των ορίων, τότε το σύστημα θεωρεί ότι δεν υπάρχει βλάβη κι η νέα τιμή χρησιμοποιείται στην επανεκπαίδευση του συστήματος και στον επανυπολογισμό των οριακών τιμών UCL και LCL, όπως έχει ήδη αναφερθεί.

Στην περίπτωση του δείκτη μέσης τετραγωνικής τιμής όλων των ακατέργαστων σημάτων (και του σετ 1 και του σετ 2) η στατιστική μέθοδος $X_{\bar{x}}$ δίνει τα αποτελέσματα του Σχ. 4.62.

Για τον ίδιο δείκτη και τα ίδια σήματα η στατιστική μέθοδος X_{EWMA} δίνει τα αποτελέσματα του Σχ. 4.63.



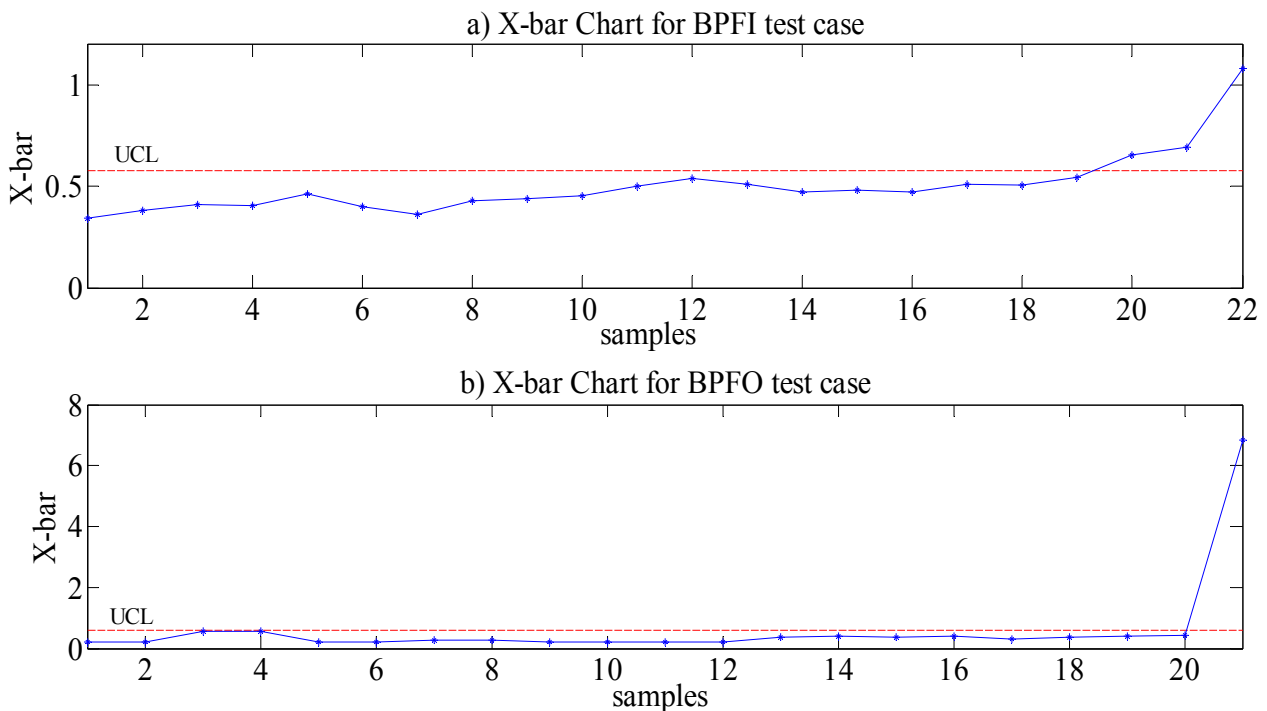
Σχ. 4.62: Αποτελέσματα της στατιστικής μέθοδου $X_{\bar{x}}$ του δείκτη RMS για τα μη επεξεργασμένα σήματα με βλάβη a)στον εσωτερικό και b)στον εξωτερικό δακτύλιο ρουλεμάν



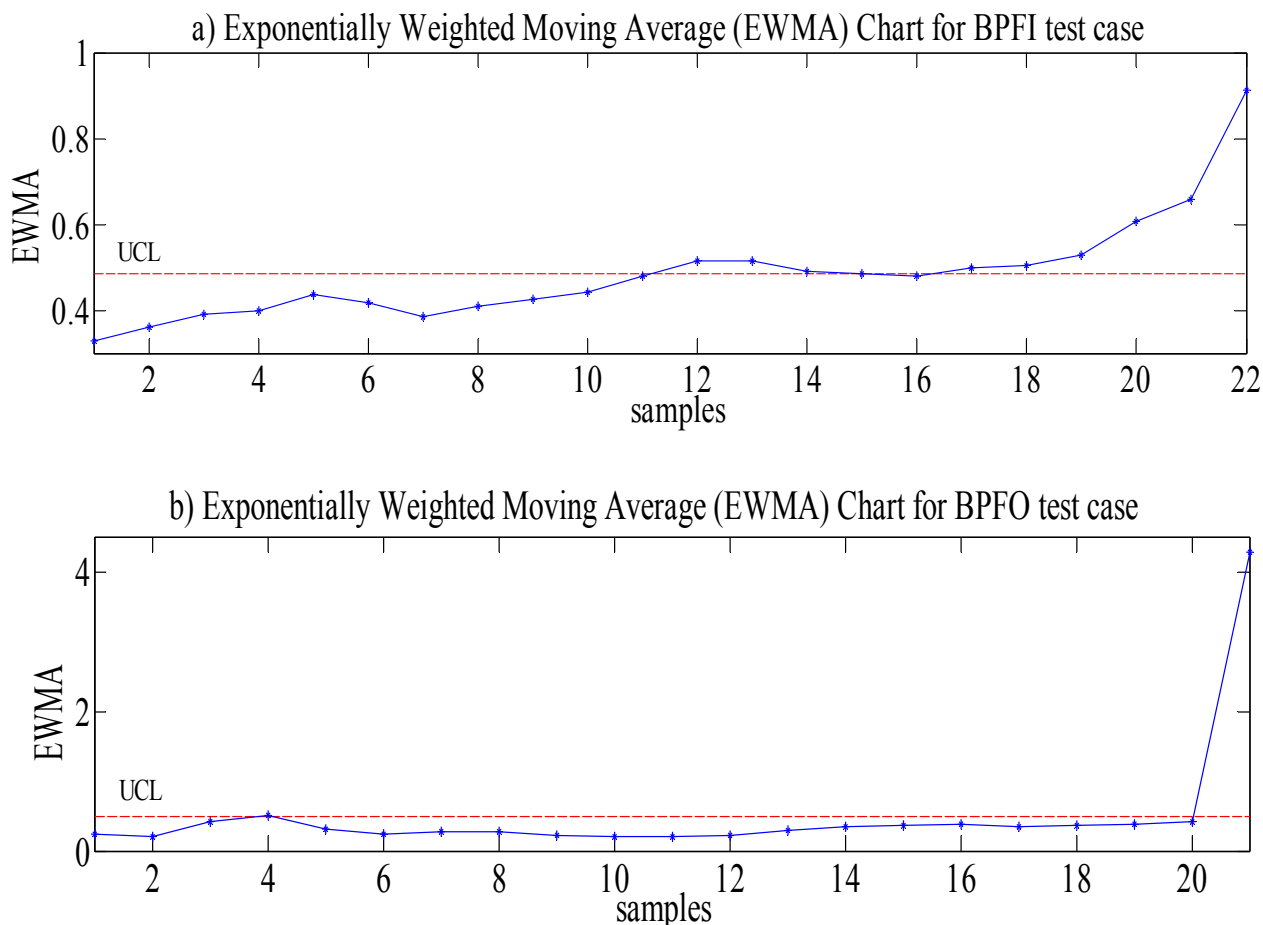
Σχ. 4.63: Αποτελέσματα της στατιστικής μέθοδου X_{EWMA} του δείκτη RMS για τα μη επεξεργασμένα σήματα με βλάβη α)στον εσωτερικό και β)στον εξωτερικό δακτύλιο ρουλεμάν

Στην περίπτωση του δείκτη μέσης τετραγωνικής τιμής όλων των αναλυμένων μορφολογικά σημάτων (και του σετ 1 και του σετ 2) η στατιστική μέθοδος $X_{\bar{x}}$ δίνει τα αποτελέσματα του Σχ. 4.64.

Για τον ίδιο δείκτη και τα ίδια σήματα η στατιστική μέθοδος X_{EWMA} δίνει τα αποτελέσματα του Σχ. 4.65.



Σχ. 4.64: Αποτελέσματα της στατιστικής μέθοδου $X_{\bar{x}}$ του δείκτη RMS για τα μορφολογικά αναλυμένα σήματα με βλάβη α)στον εσωτερικό και β)στον εξωτερικό δακτύλιο ρουλεμάν



Σχ. 4.65: Αποτελέσματα της στατιστικής μέθοδου X_{EWMA} του δείκτη RMS για τα αναλυμένα μορφολογικά σήματα με βλάβη α) στον εσωτερικό και β) στον εξωτερικό δακτύλιο ρουλεμάν

Τα αποτελέσματα του δείκτη της μέσης τετραγωνικής τιμής φαίνονται εξαιρετικά αναξιόπιστα, ανεξάρτητα από την στατιστική μέθοδο που ακολουθείται, τη βλάβη που έχει εμφανιστεί και το αν τα σήματα είναι επεξεργασμένα ή όχι, καθώς, σε κάθε περίπτωση, ο εντοπισμός της βλάβης γίνεται πολύ αργότερα από την εμφάνισή της (η εμφάνιση της βλάβης στο σετ 1 γίνεται στο 8° από τα 22 σήματα, ενώ στο σετ 2 γίνεται στο 10° από τα 21 σήματα).

Τα -με διαφορά- καλύτερα αποτελέσματα εμφανίζονται με την μέθοδο X_{EWMA} για τα αναλυμένα μορφολογικά σήματα του σετ 1 τα οποία όμως και πάλι, δεν είναι αξιόλογα. Συγκεκριμένα, η βλάβη εντοπίζεται μόλις στο 12° σήμα (με 4 σήματα καθυστέρηση) ενώ, το 15° και 16° σήμα δίνουν αποτελέσματα εντός του αποδεκτού ορίου UCL.

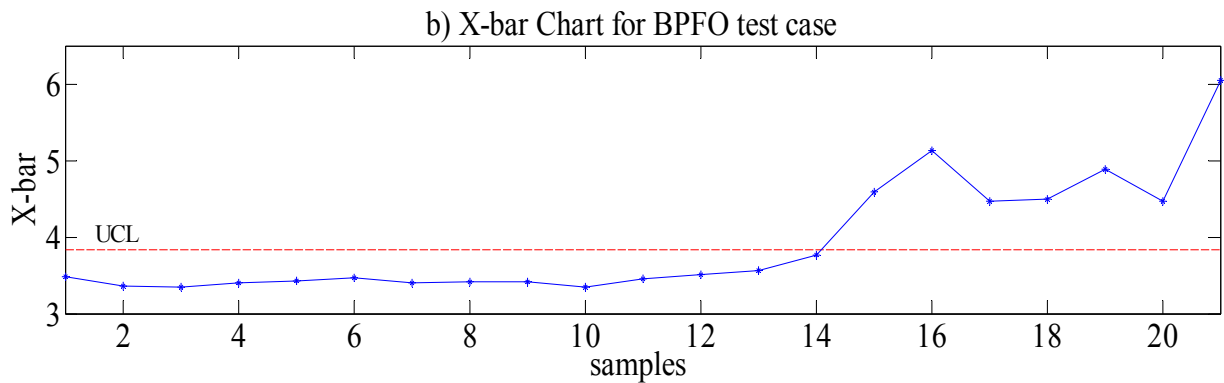
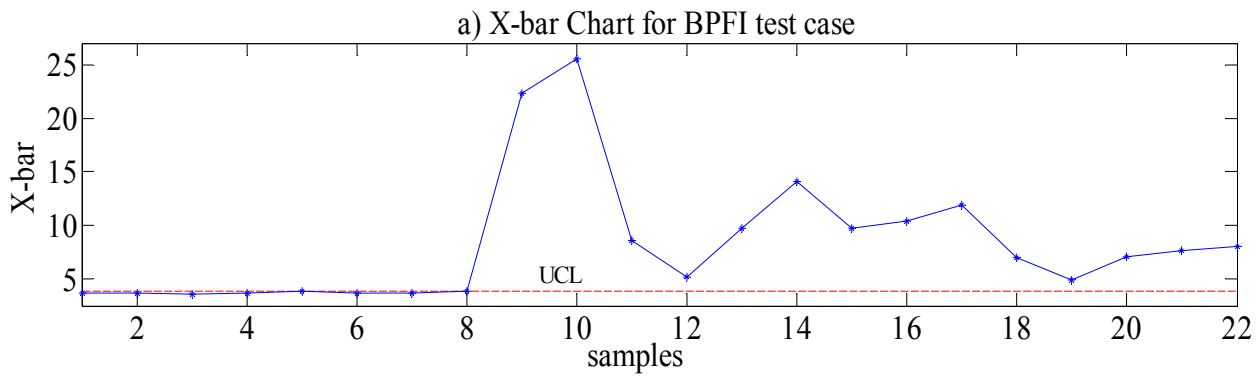
Σημειώνεται ότι για κάθε υποπερίπτωση, όλα τα αποτελέσματα βρίσκονταν εντός των αποδεκτών ορίων LCL.

Στην περίπτωση του δείκτη κύρτωσης όλων των ακατέργαστων σημάτων (και του σετ 1 και του σετ 2) η στατιστική μέθοδος $X_{\bar{bar}}$ δίνει τα αποτελέσματα του Σχ. 4.66.

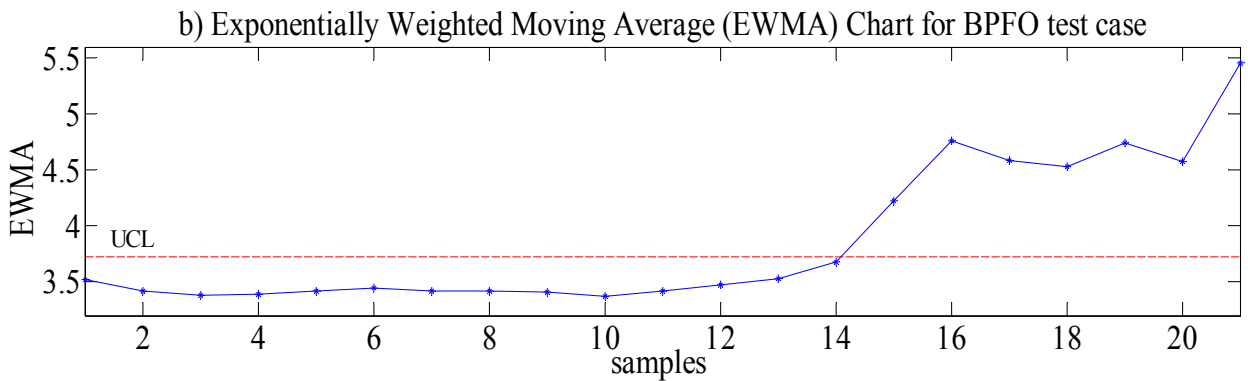
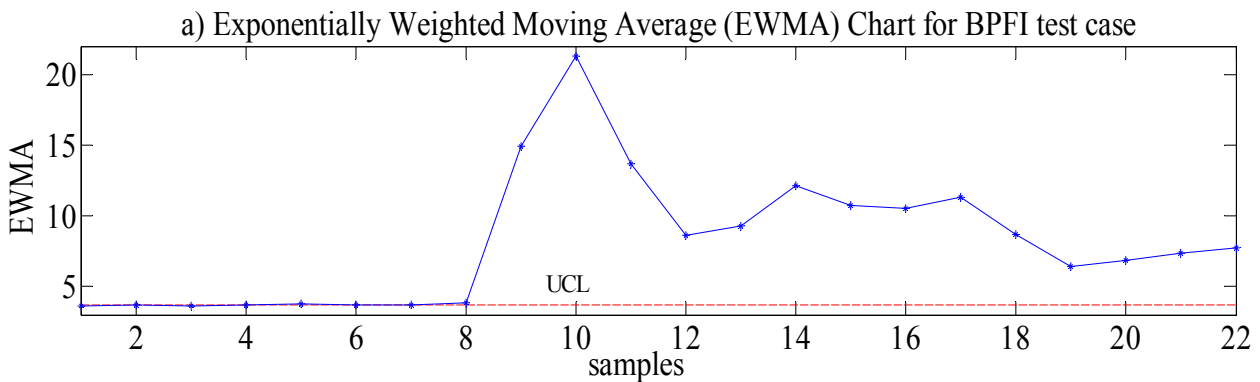
Ενώ, για τον ίδιο δείκτη και τα ίδια σήματα η μέθοδος X_{EWMA} δίνει τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχ. 4.67.

Παράλληλα, για τον δείκτη κύρτωσης όλων των επεξεργασμένων σημάτων (και του σετ 1 και του σετ 2) η στατιστική μέθοδος $X_{\bar{bar}}$ δίνει τα αποτελέσματα του Σχ. 4.68.

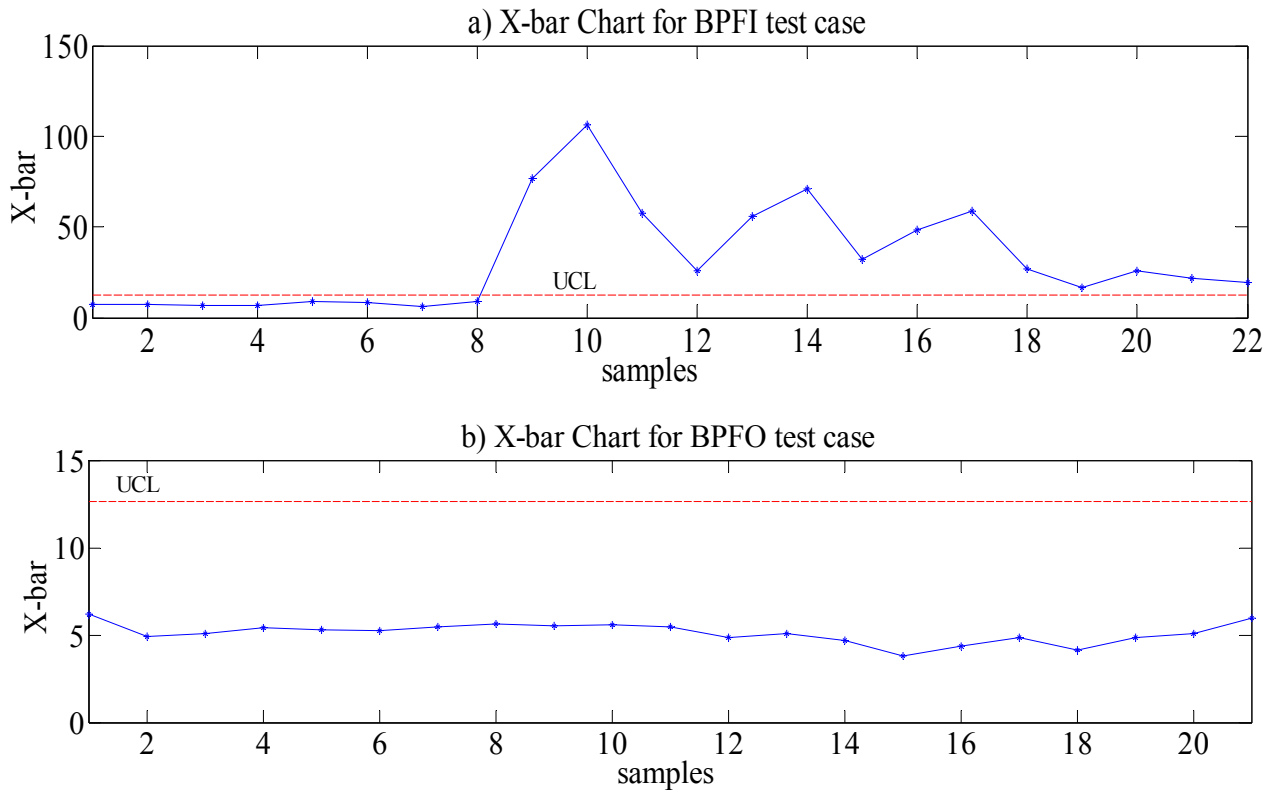
Ενώ, για τον δείκτη κύρτωσης και τα επεξεργασμένα σήματα η στατιστική μέθοδος X_{EWMA} δίνει τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχ. 4.69.



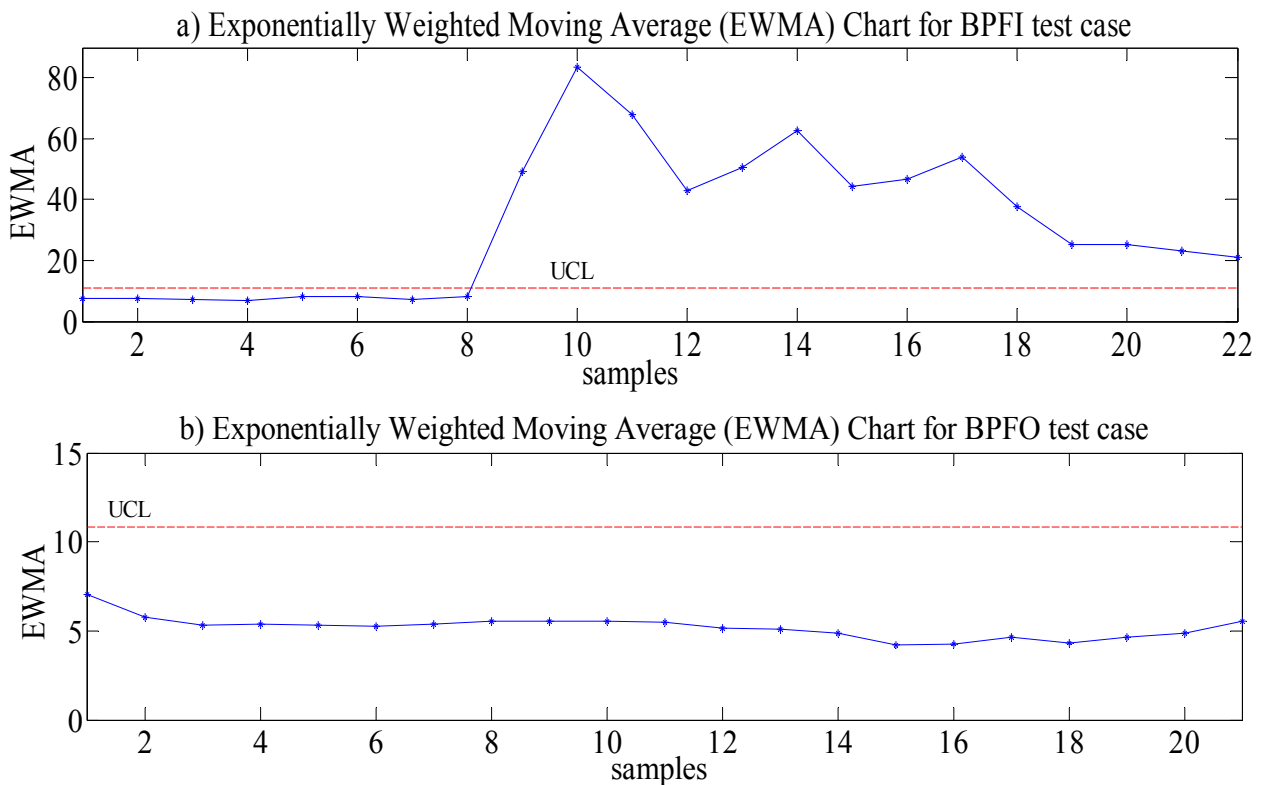
Σχ. 4.66: Αποτελέσματα της στατιστικής μέθοδου \bar{X}_{bar} του δείκτη κύρτωσης για τα μη επεξεργασμένα σήματα με βλάβη α) στον εσωτερικό και β) στον εξωτερικό δακτύλιο ρουλεμάν



Σχ. 4.67: Αποτελέσματα της στατιστικής μέθοδου X_{EWMA} του δείκτη κύρτωσης για τα μη επεξεργασμένα σήματα με βλάβη α) στον εσωτερικό και β) στον εξωτερικό δακτύλιο ρουλεμάν



Σχ. 4.68: Αποτελέσματα της στατιστικής μέθοδου $X_{\bar{}}$ του δείκτη κύρτωσης για τα επεξεργασμένα σήματα με βλάβη α)στον εσωτερικό και β)στον εξωτερικό δακτύλιο ρουλεμάν



Σχ. 4.69: Αποτελέσματα της στατιστικής μέθοδου X_{EWMA} του δείκτη κύρτωσης για τα επεξεργασμένα σήματα με βλάβη α)στον εσωτερικό και β)στον εξωτερικό δακτύλιο ρουλεμάν

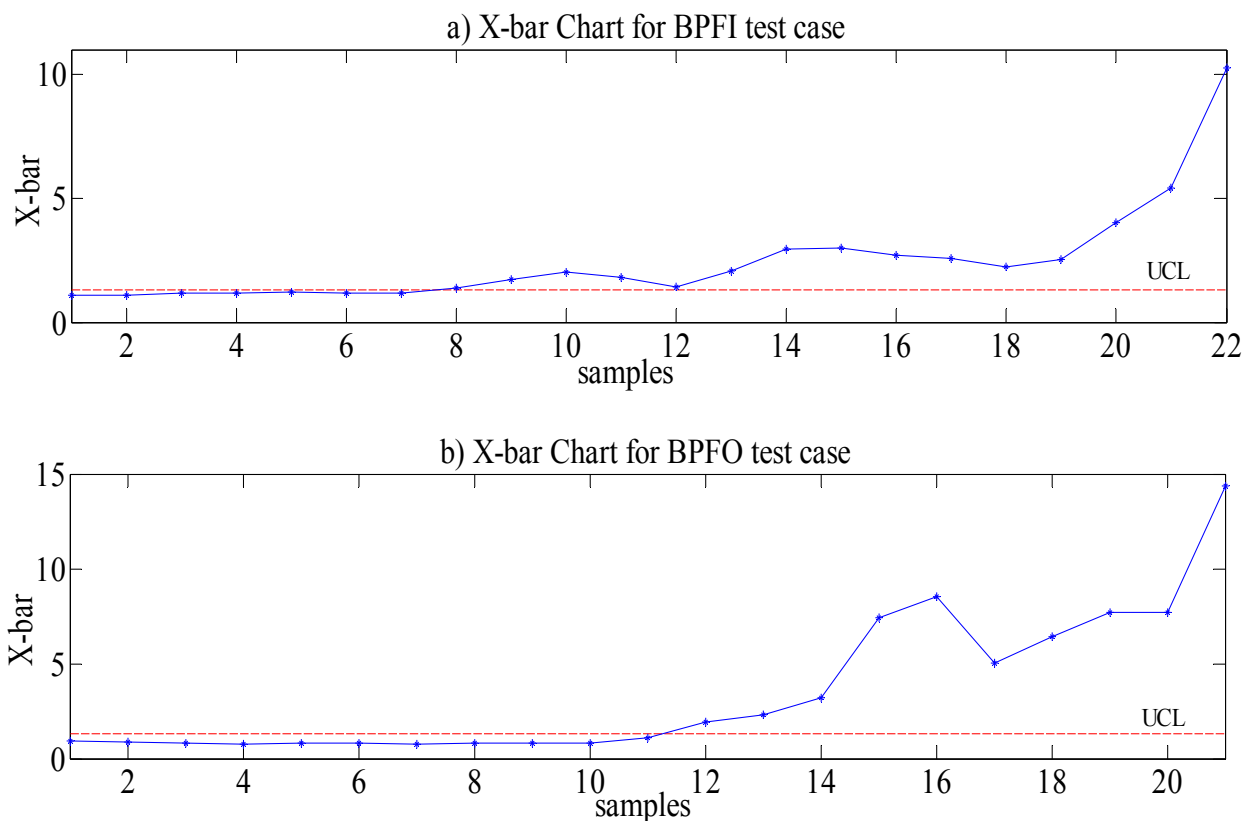
Για τις δύο στατιστικές μεθόδους, $X_{\bar{}}$ και X_{EWMA} του δείκτη κύρτωσης των μη επεξεργασμένων σημάτων (Σχ. 4.66 και Σχ. 4.67) τα αποτελέσματα είναι αρκετά ίδια μεταξύ τους και γενικά, φαίνονται σχετικά αξιόπιστα, όχι όμως ιδανικά.

Συγκεκριμένα, ναι μεν, στην περίπτωση του σετ 1, ήδη από το 8^ο σήμα έχει εντοπιστεί η βλάβη κι η αντίστοιχη στατιστική τιμή δεν επιστρέφει αργότερα εντός των ορίων, αλλά, στην περίπτωση του σετ 2, ο εντοπισμός της βλάβης γίνεται με καθυστέρηση 4 σημάτων. Επίσης, η μέθοδος $X_{\bar{}}$ θεωρεί εκτός ορίων το χωρίς βλάβη 6^ο σήμα ενώ αντίστοιχα, η μέθοδος X_{EWMA} θεωρεί εκτός ορίων το χωρίς βλάβη 5^ο σήμα.

Αντίθετα, στα μορφολογικά αναλυμένα σήματα τα αποτελέσματα και των δύο στατιστικών μεθόδων για το δείκτη της κύρτωσης (Σχ. 4.68 και Σχ. 4.69) είναι εξαιρετικά αναξιόπιστα καθώς στην περίπτωση του σετ 2 η βλάβη δεν εντοπίζεται ποτέ.

Σημειώνεται ότι για κάθε υποπερίπτωση, όλα τα αποτελέσματα βρίσκονταν εντός των αποδεκτών ορίων LCL.

Τέλος, στην περίπτωση του Singular Value όλων των -μορφολογικά αναλυμένων- σημάτων (και του σετ 1 και του σετ 2) η στατιστική μέθοδος $X_{\bar{}}$ δίνει τα αποτελέσματα του Σχ. 4.70.



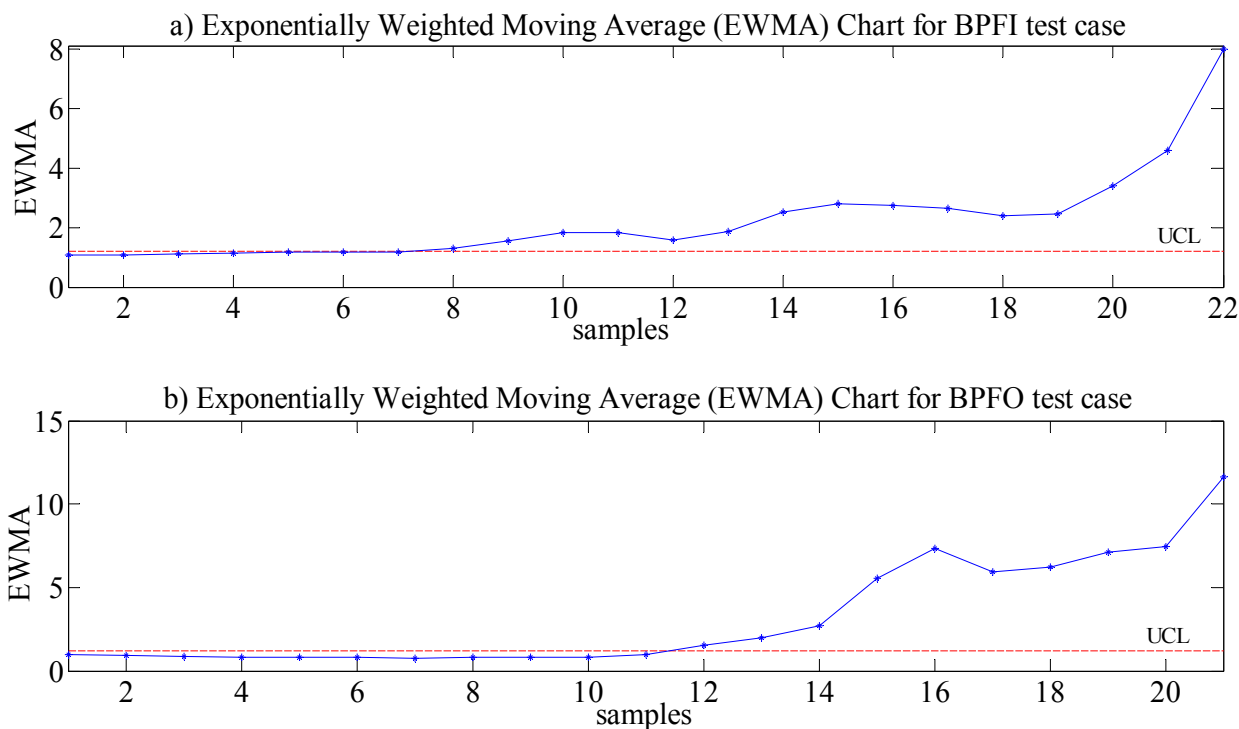
Σχ. 4.70: Αποτελέσματα της στατιστικής μέθοδος $X_{\bar{}}$ του Singular Value για τα σήματα με βλάβη a)στον εσωτερικό και b)στον εξωτερικό δακτύλιο ρουλεμάν

Τα αποτελέσματα του Singular Value εμφανίζονται ιδανικά στην περίπτωση του σετ 1 για την στατιστική μέθοδο $X_{\bar{}}$ καθώς, η βλάβη εντοπίζεται ήδη από το πρώτο σήμα το οποίο -όπως έχει προαναφερθεί- απέχει από το αμέσως προηγούμενο μόνο 10 λεπτά.

Με την ίδια στατιστική μέθοδο, το Singular Value δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα και για την περίπτωση του σετ 2, αφού η βλάβη εντοπίζεται με μόνο 1 σήμα καθυστέρησης, μόλις 7 ώρες και 20 λεπτά μετά την εμφάνισή της.

Για το Singular Value και τα ίδια σήματα η στατιστική μέθοδος X_{EWMA} δίνει τα αποτελέσματα που

φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα (Σχ. 4.71).



Σχ. 4.71: Αποτελέσματα της στατιστικής μέθοδου X_{EWMA} του Singular Value για τα σήματα με βλάβη α)στον εσωτερικό και β)στον εξωτερικό δακτύλιο ρουλεμάν

Αντίστοιχα, για την μέθοδο X_{EWMA} τα αποτελέσματα του Singular Value εμφανίζονται και πάλι ιδανικά στην περίπτωση του σετ 1 καθώς, και πάλι, η βλάβη εντοπίζεται ήδη από το πρώτο σήμα, ενώ, στην περίπτωση του σετ 2, τα αποτελέσματα που προκύπτουν, είναι και πάλι πολύ αξιόλογα, αφού η βλάβη εντοπίζεται με μόνο 1 σήμα καθυστέρηση.

Πρέπει, βέβαια, να σημειωθεί ότι για κάθε υποπερίπτωση, όλα τα αποτελέσματα βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων LCL.

Ακόμα, και για τις δύο στατιστικές μεθόδους, οι τιμές των αποτελεσμάτων συνεχίζουν να αυξάνουν όσο η βλάβη εξελίσσεται. Αυτό υποδεικνύει ακόμη περισσότερο ότι ο Singular Value είναι πολύ αξιόπιστος κι άνετος στη χρήση.

Παράλληλα, αναλύοντας τις δύο στατιστικές μεθόδους, X_{bar} και X_{EWMA} μεταξύ τους για κάθε μία από τις υποπεριπτώσεις όλων των δεικτών, η μέθοδος X_{EWMA} φαίνεται γενικά προτιμητέα, καθώς η μετάβαση από ένα αποτέλεσμα στο αμέσως επόμενο γίνεται πιο ομαλά, με αποτέλεσμα να έχει λιγότερες ακμές κι άρα, να ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα.

4.5.3 Σύγκριση του Singular Value με τις κλασικές μεθόδους

Όπως κι ο δείκτης κύρτωσης των μη επεξεργασμένων σημάτων -ο μοναδικός συμβατός δείκτης που έδωσε αξιόπιστα αποτελέσματα- έτσι το Singular Value, στην περίπτωση της βλάβης σε εσωτερικό δακτύλιο εντόπισε την βλάβη χωρίς καμία καθυστέρηση, ακριβώς στο 8^ο σήμα. Πάλι όμως, ο δείκτης κύρτωσης δεν έχει τον ίδιο βαθμό αξιοπιστίας, αφού βγάζει ορισμένα χωρίς σφάλμα σήματα εκτός αποδεκτών ορίων ανάλογα με την στατιστική μέθοδο που ακολουθείται. Παράλληλα, στην περίπτωση του σετ 2, το Singular

Value δίνει, συγκριτικά, πολύ καλύτερα αποτελέσματα, αφού εντοπίζει την βλάβη με μόνο ένα σήμα καθυστέρηση έναντι των τεσσάρων σημάτων καθυστέρησης της κύρτωσης.

Δηλαδή, το Singular Value δίνει σημαντικά πιο αξιόλογα αποτελέσματα στις διάφορες δοκιμές σε σχέση με τον συμβατό δείκτη κύρτωσης, και κατ' επέκταση, περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα από όλους τους δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν εδώ.

Καθίσταται, σαφές, ότι το Singular Value έχει μεγάλη αξιοπιστία και δύναται να χρησιμοποιηθεί για έγκυρο εντοπισμό σφάλματος μηχανής, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους δείκτες.

4.6 Ταξινόμηση βλάβης με βάση το Singular Value

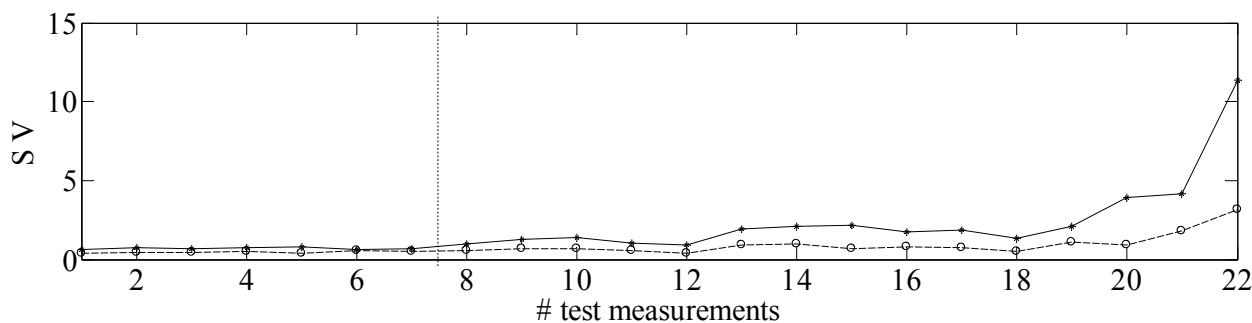
Σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους, το Singular Value μπορεί, εκτός από τον έγκυρο εντοπισμό βλάβης ρουλεμάν (εσωτερικού ή εξωτερικού δακτυλίου), να κάνει και την διάγνωσή της.

Η ταξινόμηση της βλάβης του ρουλεμάν με το Singular Value γίνεται πολύ εύκολα, απλά συγκρίνοντας την επιμέρους τιμή Singular Value BPFO με το άθροισμα των τιμών Singular Value BPF1 και Singular Value RPM.

- Αν η τιμή Singular Value BPFO είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των τιμών Singular Value BPF1 και Singular Value RPM, τότε το σύστημα θεωρεί ότι η βλάβη οφείλεται στον εξωτερικό δακτύλιο των ρουλεμάν, ενώ
- Αν η τιμή Singular Value BPFO είναι μικρότερη από το άθροισμα των τιμών Singular Value BPF1 και Singular Value RPM, τότε το σύστημα θεωρεί ότι η βλάβη οφείλεται στον εσωτερικό δακτύλιο των ρουλεμάν.

4.6.1 Ταξινόμηση της βλάβης του σετ 1

Στο Σχ. 4.72 παρατίθεται η μεταβολή του Singular Value BPFO και του αθροίσματος Singular Value BPF1 συν Singular Value RPM συναρτήσει του αύξοντα αριθμού του σήματος για τα σήματα 21 έως 42 του σετ 1.



Σχ. 4.72: Μεταβολή των Singular Value BPFO και Singular Value BPF1+Singular Value RPM

Όπως φαίνεται στο Σχ. 4.72, ήδη από το πρώτο σήμα με βλάβη (8^ο σήμα) και για όλα τα μετέπειτα σήματα, το άθροισμα των επιμέρους τιμών Singular Value BPF1 και Singular Value RPM είναι σταθερά μεγαλύτερο από την επιμέρους τιμή Singular Value BPFO. Συγκεκριμένα, στο 8^ο σήμα η διαφορά των δύο τιμών είναι 0,4085, συγκριτικά αρκετά μεγαλύτερη με την μέγιστη διαφορά που εμφανίζεται στα σήματα χωρίς σφάλμα, 0,3751 (στο 5^ο σήμα). Δηλαδή, ήδη από το πρώτο σήμα εμφάνισης της βλάβης, είναι δυνατό

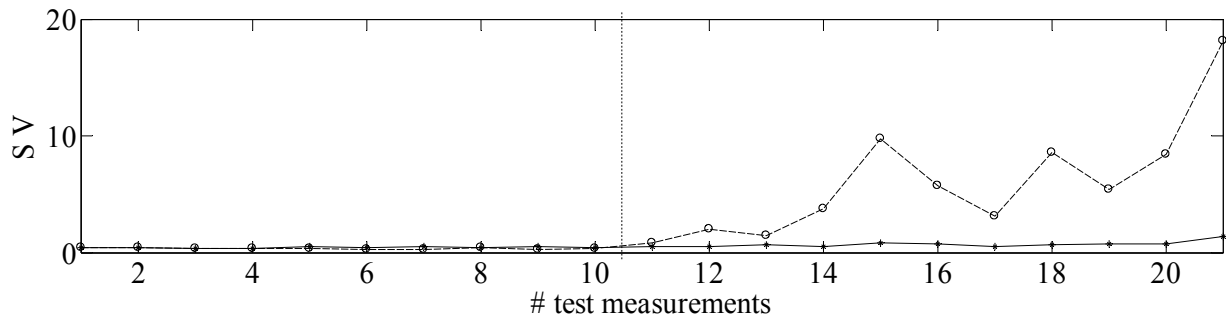
να γίνει κι η διάγνωσή της.

Παράλληλα, φαίνεται ότι για τα πρώτα 13 σήματα με βλάβη η επιμέρους τιμή Singular Value BPFO παραμένει σχετικά σταθερή, που υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει κανένα σφάλμα στους εξωτερικούς δακτύλιους των ρουλεμάν, γεγονός που ισχύει.

Αναλύοντας το Σχ. 4.72 περαιτέρω, φαίνεται ότι για τα πρώτα 7 σήματα -κατά τη διάρκεια των οποίων δεν έχει ξεκινήσει ακόμα η βλάβη- οι τιμές Singular Value BPFO και Singular Value BPFI+Singular Value RPM φαίνεται να κυμαίνονται στα ίδια χαμηλά επίπεδα κι η εκάστοτε μέγιστη τιμή δεν εμφανίζεται σταθερά σε μία από τις δύο τιμές, αλλά εναλλάσσεται μεταξύ των Singular Value BPFO και Singular Value BPFI συν Singular Value RPM.

4.6.2 Ταξινόμηση της βλάβης του σετ 2

Στο Σχ. 4.73 παρατίθεται η μεταβολή του Singular Value BPFO και του αθροίσματος Singular Value BPFI συν Singular Value RPM συναρτήσει του αύξοντα αριθμού του σήματος για τα σήματα 21 έως 41 του σετ 2.



Σχ. 4.73: Μεταβολή των Singular Value BPFO και Singular Value BPFI+Singular Value RPM

Όπως φαίνεται στο Σχ. 4.73, ήδη από το πρώτο σήμα με βλάβη (11°), η επιμέρους τιμή Singular Value BPFO είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των επιμέρους τιμών Singular Value BPFI και Singular Value RPM. Συγκεκριμένα, η διαφορά ισούται με 0,3270 που είναι σημαντικά μεγαλύτερη από όλες τις προηγούμενες εκάστοτε τιμές των διαφορών. Αυτή η διαφορά, από τη βλάβη και μετά, αυξάνει συνεχώς και γρήγορα, με αποτέλεσμα στο 15° σήμα η τιμή Singular Value BPFO να είναι σχεδόν 12πλάσια του αθροίσματος Singular Value BPFI+Singular Value RPM. Και πάλι δηλαδή, και για αυτό το σετ, είναι δυνατό να γίνει η διάγνωση της βλάβης ήδη από το πρώτο σήμα στο οποίο εντοπίζεται.

Παράλληλα, φαίνεται ότι για τα πρώτα 10 σήματα με σφάλμα η επιμέρους τιμή Singular Value BPFI παραμένει σχετικά σταθερή.

Γενικά, αυτό που εύκολα διαπιστώνεται από τα δύο παραπάνω σχήματα (Σχ. 4.72 και Σχ. 4.73) είναι ότι η μέγιστη τιμή του εκάστοτε σετ των παραμέτρων Singular Value BPFO και Singular Value BPFI+Singular Value RPM εμφανίζεται σταθερά σε μόνο μία από τις δύο παραμέτρους από την στιγμή που εμφανίζεται η βλάβη και μετά. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η βλάβη μπορεί να διαγνωσθεί ήδη από το πρώτο σήμα με σημαντικό βαθμό εμπιστοσύνης.

Βιβλιογραφία

- Addison P. S., “The illustrated wavelet transform handbook”, 2002, Taylor & Francis; 1st edition.
- Gryllias K. C. and Antoniadis I. A., “*Estimation of the instantaneous rotation speed using complex shifted Morlet wavelets*”, 2013, Mech. Syst. Signal Process. Vol. 38, pp 78-95
- Kumaresan R., Tufts D.W., “*Estimating the angles of arrival of multiple plane waves*”, 1986, IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. Vol. 34, pp 1340-1342.
- Mallat S. G. and Zhang Z., “*Matching pursuits with time-frequency dictionaries*”, 1993, IEEE Trans. Signal Processing, Special Issue on Wavelets and Signal Processing, Vol. 41, pp 3397-3415.
- Maragos P. and Schafer R., “*Morphological filters – Part I: their set-theoretic analysis and relations to linear shift invariant filters*”, 1987, IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. 35, pp 1153-1169.
- Maragos P. and Schafer R., “*Morphological systems for multidimensional signal processing*”, 1990, Proceedings of IEEE, Vol. 78, No 4, pp 690-710.
- Maragos P., “*Morphological signal and image processing*”, 1998, The Digital Signal Processing Handbook, CRC Press LLC, Florida.
- Nikolaou N. G. and Antoniadis I. A., “*Application of a morphological filter in bearing vibration signal analysis*”, 2002, Comadem International Conference, Birmingham, UK.
- Nikolaou N. G. and Antoniadis I. A., “*Application of morphological operators as envelope extractors for impulsive-type periodic signals*”, 2003, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 17, No 6, pp 1147-1162.
- Nishida S., Nakamura M., Ikeda A. and Shibasaki H., “*Signal separation of background EEG and spike by using morphological filter*”, 1999, Medical engineering physics, Vol. 21, pp 601-608.
- Nishida S., Nakamura M., Miyazaki M., Suwazono S., Honda M., Nagamine T., and Shibasaki H., “*Construction of a morphological filter for detecting an event related potential P300 in single sweep EEG record in children*”, 1995, Medical engineering physics, Vol. 17, No 6, pp 425-430.
- Nishida S., Nakamura M., Shindo K., Kanda M. and Shibasaki H., “*A morphological filter for extracting waveform characteristics of single sweep evoked potentials*”, 1997, Automatica, Vol. 35, pp 937-943.
- Rioul O. and Vetterli M., “*Wavelet and Signal Processing*”, 1991, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 8, No 4, pp 14-38.
- Roy R., Paulraj A., Kailath T., “*ESPRIT – a subspace rotation approach to estimation of parameters of cisoids in noise*”, 1986, IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process, Vol. 34, pp 1340-1342.
- Santhana Raj A. and Murali N., “*Early Classification of Bearing Faults Using Morphological Operators and Fuzzy Inference*”, 2013, IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 60, pp 568-569
- Sedaaghi H., “*ECG wave detection using morphological filters*”, 1998, Applied Signal Processing, Vol. 5, pp 182-194.
- Ροδόπουλος Κ., «Σύγκριση μεθόδων εκτίμησης μεταβαλλόμενης ταχύτητας περιστροφής από μέτρηση κραδασμών», Διπλωματική εργασία στο ΔΠΜΣ “Συστήματα Αυτοματισμού”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2011.
- Τσιλιβής Β., “*Η συμβολή και οι εκτεταμένες χρήσεις του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στον Τομέα της Υγείας*” Διπλωματική εργασία στο ΔΠΜΣ “Μαθηματική προτυποποίηση στις σύγχρονες τεχνολογίες και την οικονομία”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2012.
- <http://digilib.lib.unipi.gr/dspace/bitstream/unipi/942/1/%CE%9A%CE%B5%CE%AF%CE%BC%CE%B5%CE%BD%CE%BF%20%CE%94%CE%B9%CF%80%CE%BB%CF%89%CE%BC>

[%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82.pdf](#)

- http://en.wikipedia.org/wiki/Statistical_model
- http://en.wikipedia.org/wiki/X-bar_chart
- http://users.teiath.gr/petef/Web_CV/Articles/Articles_pdf/EWMA_diagram_Karkalousos.pdf