



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ανάπτυξη αλγορίθμου για τον καθορισμό παραμέτρων κατάστασης της «υγείας» εργαλειομηχανής

Κοτσανίδης Κωνσταντίνος

Επιβλέπων Καθηγητής: Μπενάρδος Πανώριος

ΑΘΗΝΑ 2020

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	5
Περίληψη	6
Abstract	7
1 Εισαγωγή	8
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	8
1.2 Μέθοδοι συντήρησης μηχανών.....	8
1.3 Εισαγωγή στην προβλεπτική συντήρηση	9
1.4 Κλάδοι στους οποίους εφαρμόζεται η προβλεπτική συντήρηση.....	12
1.5 Προκλήσεις που δημιουργούνται χρησιμοποιώντας στρατηγική συντηρήσεων βάση της λειτουργικής κατάστασης.....	13
1.6 Πλεονεκτήματα	14
1.7 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	15
2 Εργαλειομηχανές και προβλεπτική συντήρηση	17
2.1 Γενική περιγραφή	17
2.2 Είδη εργαλειομηχανών	17
2.3 Αρχή λειτουργίας κέντρου κατεργασιών.....	20
2.4 Μονάδες ατράκτου	20
2.5 Έδρανα κύλισης.....	22
2.6 Άξονας περιστροφής και προστατευτικό περίβλημα.....	25
2.7 Μετάδοση κίνησης	26
2.8 Αστοχίες ατράκτων	26
2.9 Μηχανισμοί βλάβης εδράνων κύλισης	27
2.10 Αξιολόγηση της λειτουργικής κατάστασης ατράκτου εργαλειομηχανής και σχετικά πρότυπα.....	31
3 Προβλεπτική συντήρηση και μετρήσεις κραδασμών σε εργαλειομηχανές.....	34
3.1 Αισθητήρες : Επιλογή και τοποθέτηση.....	35
3.2 Επεξεργασία σήματος.....	37
3.3 Επιλογή και δημιουργία χαρακτηριστικών.....	43
3.4 Λογισμικό αυτοματοποιημένης διάγνωσης βλαβών	44
3.5 Περιγραφή συστημάτων συλλογής δεδομένων (DAQs).....	48
4 Ανάπτυξη αλγορίθμου εντοπισμού και πρόβλεψης βλάβης σε έδρανα κύλισης	53
4.1 Επιλογή των μετρήσεων εκπαίδευσης του αλγορίθμου μηχανικής μάθησης.....	56
4.2 Αποθορυβοποίηση του σήματος.....	59
4.3 Ανάλυση του σήματος στο φάσμα της συχνότητας	63
4.4 Δημιουργία χαρακτηριστικών.....	65

4.5 Μηχανική μάθηση – Ταξινόμηση λειτουργικής κατάστασης.....	72
4.6 Πρόβλεψη εκτιμώμενου χρόνου ζωής του εδράνου	77
6. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις	80
7. Βιβλιογραφία	81

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1 Βιομηχανίες εφαρμογής της προβλεπτικής συντήρησης [3]	13
Εικόνα 2 Εικόνες συμβατικών εργαλειομηχανών [12]	18
Εικόνα 3 Κύρια μέρη ελέγχου εργαλειομηχανής [12]	19
Εικόνα 4 Κέντρο κατεργασίας [12]	20
Εικόνα 5 Λειτουργικά μέρη ατράκτου [6].....	21
Εικόνα 6 Τομή ατράκτου [12]	22
Εικόνα 7 Διάφορες διατάξεις ατράκτων [6]	23
Εικόνα 8 Λειτουργικά μέρη εδράνων κύλισης [6]	24
Εικόνα 9 Χαρακτηριστικά των εδράνων κύλισης [6]	25
Εικόνα 10 Φθορά εσωτερικού δακτυλίου [2].....	28
Εικόνα 11 Φθορά εξωτερικού δακτυλίου [2]	29
Εικόνα 12 Φθορά στοιχείου κυλίσεως [2].....	30
Εικόνα 13 Γενική μεθοδολογία ανάπτυξης συστήματος παρακολούθησης της κατάστασης μιας μηχανουργικής κατεργασίας [16].....	35
Εικόνα 14 Απεικόνιση του μετασχηματισμού Fourier [17]	38
Εικόνα 15 Κυρτόγραμμα [2].....	40
Εικόνα 16 Διαγραμματική απεικόνιση κυματιδιακού μετασχηματισμού [2]	42
Εικόνα 17 Νευρωνικό δίκτυο [8]	45
Εικόνα 18 Μηχανές Διανυσμάτων Υποστήριξης [8].....	46
Εικόνα 19 Μικροελεγκτής με επιταχυνσιόμετρο MEMS [35].....	51
Εικόνα 20 Καταγραφική συσκευή πολλών καναλιών.....	52
Εικόνα 21 Κάρτα συλλογής δεδομένων.....	52
Εικόνα 22 Διάταξη πειραματικών μετρήσεων του IMS [1]	53
Εικόνα 23 Φωτογραφία διάταξης πειραματικών μετρήσεων του IMS [1].....	54

Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Διάγραμμα πορείας της κατάστασης μια μηχανής [2].....	11
Διάγραμμα 2 Διάγραμμα βέλτιστου προγραμματισμού συντήρησης [5].....	15
Διάγραμμα 3 Κυματομορφή επιταχύνσεων (φθορά εσωτερικού δακτυλίου) [2]	28
Διάγραμμα 4 Κυματομορφή επιταχύνσεων (φθορά εξωτερικού δακτυλίου) [2].....	30

Διάγραμμα 5 Κυματομορφή επιταχύνσεων (φθορά στοιχείου κυλίσεως) [2]	31
Διάγραμμα 6 Χρονικά παράθυρα [2].....	39
Διάγραμμα 7 Αποθρομβοποίηση σήματος [20]	42
Διάγραμμα 8 Αλλοίωση σήματος λόγω μικρής συχνότητας δειγματοληψίας [6]	49
Διάγραμμα 9 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου.....	56
Διάγραμμα 10 Σήμα Επιτάχυνσης Σήμα 1-Set 1	58
Διάγραμμα 11 Σήμα επιτάχυνσης Σήμα 60-Set1	58
Διάγραμμα 12 Αποθρομβοποίηση με μετασχηματισμό κυματιδίων [1]	60
Διάγραμμα 13 Σήμα 1 - Set1- Αποθρομβοποίηση μέσω μετασχηματισμού κυματιδίων και (rig)SURE	62
Διάγραμμα 14 Σήμα 1 - Set1- Αποθρομβοποίηση μέσω μετασχηματισμού κυματιδίων και "Minimax"	62
Διάγραμμα 15 Σήμα 1 - Set1- Αποθρομβοποίηση μέσω μετασχηματισμού κυματιδίων και "Donoho Johstone"	63
Διάγραμμα 16 Σήμα1-Σετ1 επιταχύνσεων μετά από μετασχηματισμό Fourier.....	64
Διάγραμμα 17 Σήμα 45-Σετ1 επιταχύνσεων μετά από μετασχηματισμό Fourier.....	64
Διάγραμμα 18 Σήμα 62-Σετ1 επιταχύνσεων μετά από μετασχηματισμό Fourier.....	65
Διάγραμμα 19 Εξέλιξη RMS επιτάχυνσης σε κάθε δείγμα που χρησιμοποιήθηκε	67
Διάγραμμα 20 Εξέλιξη RMS επιτάχυνσης του σήματος στο φάσμα συχνότητας	67
Διάγραμμα 21 Κυρτόγραμμα 62 ^{ου} σήματος – Σετ 1 (φθορά εσωτ. δακτυλίου σε εξέλιξη)	68
Διάγραμμα 22 RMS επιτάχυνσης στο φάσμα συχνότητας περιοχή 4kHz-6kHz(1 ^ο δείγμα).....	69
Διάγραμμα 23 RMS επιτάχυνσης στο φάσμα συχνότητας περιοχή 4kHz-6kHz(62 ^ο δείγμα).....	70
Διάγραμμα 24 Δείκτης κορυφής για κάθε δείγμα (1 ^η Καταγραφή)	71
Διάγραμμα 25 Εξέλιξη ολικού πλάτους σήματος για κάθε δείγμα (1 ^η Καταγραφή)	71
Διάγραμμα 26 Εξέλιξη ισχύος του σήματος (1 ^η Καταγραφή).....	72
Διάγραμμα 27 Διάγραμμα απόδοσης νευρωνικού δικτύου	74
Διάγραμμα 28 Διαγράμματα ROC για τα υποσύνολα εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου.	76
Διάγραμμα 29 RMS επιτάχυνσης στο φάσμα συχνότητας περιοχή 4kHz-6kHz για RUL	79

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας, κ. Πανώριο Μπενάρδο για την εποικοδομητική συνεργασία μας κατά την διάρκεια της εκπόνησής της εργασίας και τις χρήσιμες πληροφορίες που μου μετέφερε σχετικά με το αντικείμενο.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους προϊσταμένους μου στην επαγγελματική μου δραστηριότητα που με βοήθησαν να πραγματοποιήσω το μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών παράλληλα με την εργασία μου.

Τέλος, θερμές ευχαριστίες οφείλω στην οικογένεια μου για την συμπαράσταση που μου προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια έως σήμερα και την προτροπή για συνέχιση της εκπαίδευσής μου.

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου ο οποίος θα μπορεί, χωρίς μεγάλο υπολογιστικό κόστος, να καθορίσει την λειτουργική κατάσταση της ατράκτου μιας εργαλειομηχανής και κατ' επέκταση την οργάνωση της προβλεπτικής συντήρησής της. Αρχικά, γίνεται μια θεωρητική αναδρομή στις εργαλειομηχανές και στα έδρανα κύλισης που αποτελούν το κύριο κομμάτι ενδιαφέροντος της εργασίας και αναφέρονται οι μεθοδολογίες και τα αποτελέσματα παρόμοιων ερευνητικών έργων τα οποία έχουν ασχοληθεί με το αντικείμενο.

Όσον αφορά το κομμάτι της προβλεπτικής συντήρησης η εργασία αυτή εκτός από την ανάπτυξη του απαραίτητου λογισμικού, αναλύει και προδιαγράφει τα τμήματα της διάταξης που απαιτεί η προβλεπτική συντήρηση όπως η επιλογή αισθητήρων και το σύστημα συλλογής μετρήσεων .

Για την ανάπτυξη του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις απο το ελεύθερα διαθέσιμο σύνολο δεδομένων του NSF I/UCR Center for Intelligent Maintenance Systems (IMS) [1], που περιλαμβάνει τιμές επιταχύνσεων από πειράματα λειτουργίας μέχρι αστοχίας για τέσσερα έδρανα.

Το κύριο τμήμα της εργασίας πραγματεύεται τα στάδια που πρέπει να ακολουθηθούν για την σωστή ανάπτυξη του αλγορίθμου. Τα τμήματα αυτά είναι η διαλογή των μετρήσεων, η επεξεργασία των σημάτων, η εξαγωγή των χαρακτηριστικών, η μηχανική μάθηση προκειμένου να γίνει η ταξινόμηση των λειτουργικών καταστάσεων και τέλος η πρόβλεψη του υπολειπόμενου χρόνου ζωής του εδράνου κύλισης.

Τέλος, αναφέρονται τα σχετικά συμπεράσματα, η επιτυχία της εργασίας όσον αφορά την γενικότητα και το εύρος εφαρμογής της, ακολουθούμενα από κάποιες ιδέες για μελλοντική επέκταση.

Abstract

The purpose of the thesis is to design and develop an algorithm that can be executed on a simple device to determine the operating status of a machine tool and thus the organization of predictive maintenance. Initially, a theoretical overview of the machine tools and the rolling bearings that are the main focus of the work is presented, and the methodologies and results of similar research projects that have been dealt with the subject are mentioned.

Referring to the Predictive Maintenance section, this work, in addition to developing the necessary software, analyzes and specifies the components of the Predictive Maintenance device such as sensor selection and metering system.

To develop the algorithm, measurements were used from the free dataset of the NSF I/UCR Center for Intelligent Maintenance Systems (IMS), [1], which contains the acceleration values of operational experiments until failure for four bearings.

The main part of the paper deals with the steps that must be followed for the proper development of the algorithm. These sections are the selection of the proper measurements, the signal processing part, the feature collection, machine learning to classify the operating conditions and finally the prediction of the remaining useful life of the rolling bearing.

Finally, the conclusions are mentioned, the success of our work on the generality and scope of its operation, followed by some ideas for future expansion.

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη του απαραίτητου λογισμικού που απαιτείται για τον καθορισμό της λειτουργικής κατάστασης του συναρμολογήματος της ατράκτου μιας εργαλειομηχανής και συγκεκριμένα των εδράνων κύλισης που το απαρτίζουν, καθώς έχει αποδειχθεί ότι αυτά αποτελούν έναν από τους κύριους λόγους βλάβης του. Στα γενικότερα πλαίσια της προβλεπτικής συντήρησης, προδιαγράφεται ο εξοπλισμός που χρειάζεται για τον εντοπισμό της φθοράς των εδράνων καθώς και η μεθοδολογία. Γενικότερος στόχος της εργασίας αυτής είναι ο αλγόριθμος που θα αναπτυχθεί να έχει μικρές απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μικροελεγκτές και μικροϋπολογιστές και να διευκολύνει την ανάπτυξη μιας απλής και φορητής διάταξης μικρού κόστους. Σε αντίθεση με τις περισσότερες έρευνες γύρω από αυτό το αντικείμενο, σε αυτή την εργασία δεν υπάρχει σκοπός να γίνει εμβάθυνση σε μία συγκεκριμένη υπολογιστική μέθοδο επεξεργασίας σήματος ή μηχανικής μάθησης αλλά σκοπός είναι να συνδυαστούν οι γνώσεις και οι μεθοδολογίες προηγούμενων ερευνητικών έργων, ώστε να επιτευχθούν καλά αποτελέσματα ταξινόμησης και πρόβλεψης υπολειπόμενης ζωής του εδράνου με μικρό υπολογιστικό κόστος και προσέγγιση της γενικής περίπτωσης. Τέλος, στόχος είναι η εργασία αυτή να αποτελέσει έναν οδηγό βάση του οποίου μπορεί να δημιουργηθεί μια ολοκληρωμένη διάταξη για τον καθορισμό της «υγείας» μιας εργαλειομηχανής και συγκεκριμένα του συναρμολογήματος της ατράκτου ενός κέντρου κατεργασιών.

1.2 Μέθοδοι συντήρησης μηχανών

Η άφιξη και η εξέλιξη της 4^{ης} Βιομηχανικής επανάστασης ή Industry 4.0 έχει φέρει στο προσκήνιο την όλο και μεγαλύτερη ανάγκη για εξελιγμένες στρατηγικές συντήρησης. Ειδικότερα στο χώρο της βιομηχανίας οι τεχνικές και πολιτικές εξελίσσονται ραγδαία με σκοπό την αδιάκοπη λειτουργία και το μειωμένο κόστος για συντήρηση. Με βάση αυτό το στόχο, στα πλαίσια του γενικότερου σχεδιασμού τους, οι βιομηχανίες επισημαίνουν τον τομέα της συντήρησης σαν μία από τις κεντρικές δραστηριότητες τους, η αναβάθμιση του οποίου μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω πρόοδο του συνόλου των επιχειρήσεων. Οι σύγχρονες μέθοδοι συντήρησης περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα τεχνικών και δραστηριοτήτων.

Οι θεωρούμενες παραδοσιακές μέθοδοι συντήρησης κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, [2]:

- τη διορθωτική συντήρηση (corrective maintenance)
- την προληπτική συντήρηση (preventive maintenance)

Η λογική της διορθωτικής συντήρησης είναι ιδιαίτερα απλή. Ο εξοπλισμός λειτουργεί συνέχεια και συντηρείται μόνο όταν παρουσιαστεί βλάβη. Σε πρώτο επίπεδο, η πρακτική αυτή εμφανίζεται λογική και δύναται να είναι αποτελεσματική, εάν ο εξοπλισμός είναι καινούργιος ή η διακοπή της λειτουργίας του δεν είναι σημαντική για την παραγωγική διαδικασία. Σε αντίθετη περίπτωση, αποτελεί την πιο ακριβή μορφή συντήρησης. Τα κύρια κόστη που συνεπάγεται είναι η διατήρηση μεγάλου αποθέματος ανταλλακτικών, το υψηλό εργατικό κόστος αποκατάστασης (συνήθως υπερωρίες ή μετάκληση εξωτερικών ειδικών), οι μεγάλοι νεκροί χρόνοι και η μικρή διαθεσιμότητα της παραγωγικής εγκατάστασης [2].

Η βασική ιδέα της προληπτικής συντήρησης είναι η ένταξη των διαδικασιών συντήρησης σε ένα χρονικά προγραμματιζόμενο πλαίσιο. Οι δραστηριότητες συντήρησης προγραμματίζονται είτε με βάση τις ώρες λειτουργίας ενός μηχανολογικού στοιχείου είτε με βάση το συνολικό χρονικό διάστημα από την προμήθεια του. Η λογική της προληπτικής συντήρησης βασίζεται στο γεγονός ότι οι ρυθμοί φθοράς του εξοπλισμού ακολουθούν μία πορεία στην οποία ο μόνος παράγοντας που ουσιαστικά επιδρά είναι ο χρόνος. Τα διαστήματα της συντήρησης προκαθορίζονται είτε, κυρίως, από εμπειρία του κατασκευαστή του συγκεκριμένου εξοπλισμού είτε, σε μικρότερο βαθμό, από τη συστηματική τήρηση αρχείων στην εγκατάσταση. Με αυτόν τον τρόπο, θεωρητικά, οι διαδικασίες συντήρησης μπορούν να προγραμματισθούν σε νεκρούς χρόνους λειτουργίας και τα απαραίτητα ανταλλακτικά να παραγγελθούν σε κατάλληλο χρονικό διάστημα.

Στην πράξη, η εφαρμογή αυτής της πρακτικής συναντά πολλά προβλήματα. Σε πολλές περιπτώσεις, η διαφοροποίηση των συνθηκών λειτουργίας του εξοπλισμού από τις προδιαγεγραμμένες, οδηγεί σε πρόωρες αποτυχίες του μηχανολογικού εξοπλισμού. Σε πολλές κατηγορίες εξοπλισμού δεν υπάρχουν δεδομένα για τις σχετικές επιτρεπτές ώρες λειτουργίας. Δεδομένου του συντηρητικού υπολογισμού των επιτρεπτών ωρών λειτουργίας του εξοπλισμού από τους κατασκευαστές, το κόστος συντήρησης αυξάνεται αναίτια. Τα επιβαλλόμενα διαστήματα επισκευής δεν συμπίπτουν ή καθυστερούν αδικαιολόγητα το συνολικό προγραμματισμό της παραγωγής. Σαν αποτέλεσμα των προβλημάτων των παραδοσιακών μορφών συντήρησης, τουλάχιστον το 33% του συνολικού κόστους συντήρησης οφείλεται σε μη απαραίτητες ή αναποτελεσματικές δράσεις συντήρησης [2].

1.3 Εισαγωγή στην προβλεπτική συντήρηση

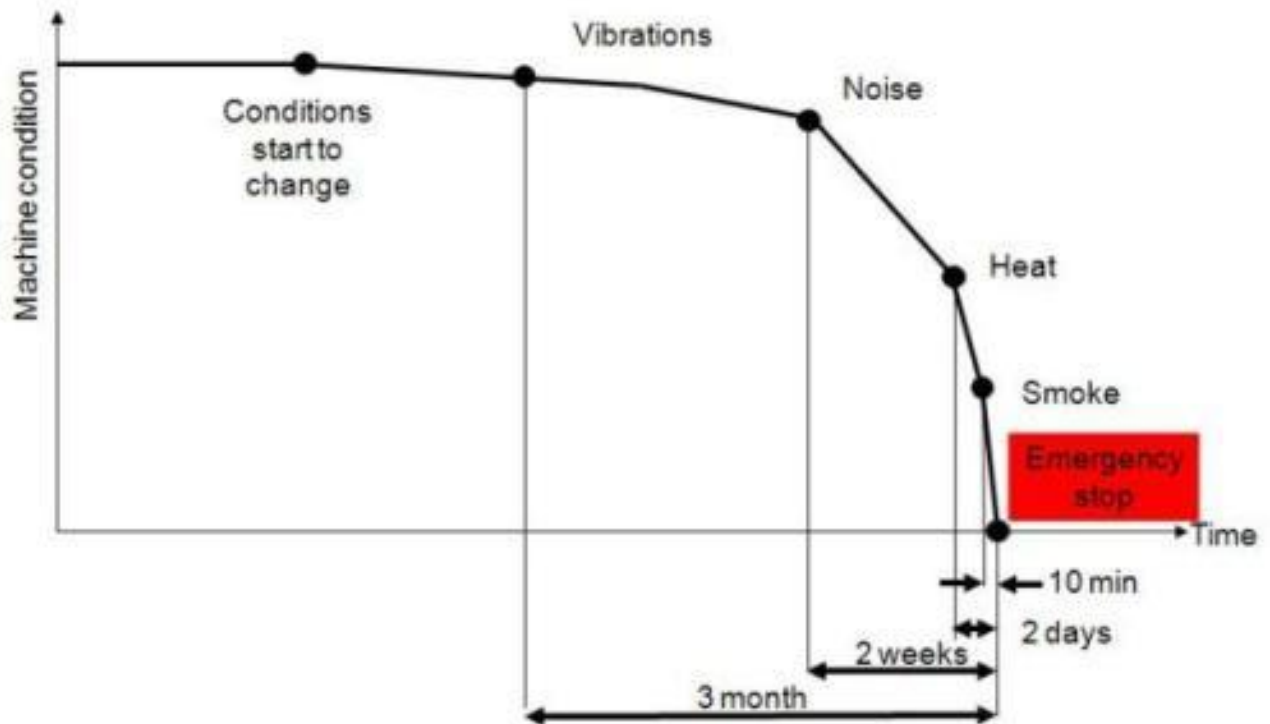
Η προβλεπτική συντήρηση αφορά τη διαδικασία παρακολούθησης μιας παραμέτρου της κατάστασης των μηχανημάτων (δόννηση, θερμοκρασία κ.λπ.), προκειμένου να εντοπιστεί μια σημαντική αλλαγή που είναι ενδεικτική μιας αναπτυσσόμενης βλάβης. Η παρακολούθηση της κατάστασης της μηχανής επιτρέπει την προγραμματισμένη συντήρηση ή άλλες ενέργειες που πρέπει να λαμβάνονται για την αποφυγή επακόλουθων ζημιών και την αποφυγή των συνεπειών τους. Αυτή η μέθοδος συντήρησης έχει ένα μοναδικό όφελος δεδομένου ότι οι συνθήκες που θα μπορούσαν να συντομεύσουν την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής, μπορούν να αντιμετωπιστούν πριν οδηγήσουν σε σημαντικές βλάβες. Οι πληροφορίες που μπορεί να

πάρει ο μηχανικός από την συστηματική παρακολούθηση μιας μηχανής, βοηθούν στον εντοπισμό της βλάβης από τα πρώτα στάδια ανάπτυξής της καθώς δίνει και πληροφορίες για τη σοβαρότητα της και το αν μπορεί να διακόψει την παραγωγική διαδικασία. Οι τεχνικές παρακολούθησης της κατάστασης χρησιμοποιούνται συνήθως σε εξοπλισμό με περιστρεφόμενα μέρη, βοηθητικά συστήματα και άλλα μηχανήματα (συμπιεστές, αντλίες, ηλεκτροκινητήρες, κινητήρες εσωτερικής καύσης, πρέσες κλπ).

Με αυτόν το στόχο, έχει αναπτυχθεί διεθνώς ένα σύγχρονο πλαίσιο μεθόδων και τεχνολογιών για τη σταδιακή μετατόπιση του ρόλου της συντήρησης από τις παραδοσιακές διαδικασίες επισκευής-αποκατάστασης σε διαδικασίες πρόληψης-πρόβλεψης, σκοπεύοντας τελικά στην αύξηση της διαθεσιμότητας της εγκατάστασης. Οι μέθοδοι αυτές εντάσσονται σε μία κύρια κατηγορία: την προβλεπτική συντήρηση (predictive maintenance). Η προβλεπτική συντήρηση θεωρείται σήμερα μία φιλοσοφία συντήρησης, που στηρίζεται σε μία ουσιαστική εκτίμηση της πραγματικής λειτουργικής κατάστασης του εξοπλισμού. Από την υλοποίηση προγραμμάτων προβλεπτικής συντήρησης σε βιομηχανίες, προέκυψαν σημαντικά οφέλη, που συνοψίζονται στα ακόλουθα αποτελέσματα [2]:

- Μείωση του κόστους συντήρησης κατά 50-80%
- Μείωση των καταστροφών μηχανών κατά 50-60%
- Μείωση των αποθεμάτων ανταλλακτικών κατά 20-30%
- Μείωση του νεκρού χρόνου των μηχανών κατά 50-80%
- Μείωση του κόστους υπερωριών κατά 20-50%
- Αύξηση της διάρκειας ζωής των μηχανών κατά 20-40%
- Αύξηση της παραγωγικότητας κατά 20-30%
- Αύξηση κερδών κατά 25-60%

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει στο χρόνο τις ενδείξεις που δίνει μια μηχανή πριν το τελικό στάδιο βλάβης.



Διάγραμμα 1 Διάγραμμα πορείας της κατάστασης μια μηχανής [2]

Μερικοί από τους τύπους της παρακολούθησης της κατάστασης μια μηχανής αναλύονται παρακάτω. Καθένας από τους παρακάτω τύπους εξυπηρετεί με διαφορετικό τρόπο τον σκοπό του.

- **Κινητά διαγνωστικά συστήματα (Mobile Diagnostic Devices)**
Τέτοιου είδους κινητά συστήματα βοηθούν στη λήψη μετρήσεων στο πεδίο για την παρακολούθηση της υγείας μιας μηχανής. Τα δεδομένα που συλλέγονται αναλύονται προς εξαγωγή χαρακτηριστικών μεγεθών ή/και δεικτών που προσδιορίζουν το κατά πόσο η μηχανή χρειάζεται συντήρηση ή όχι.
- **Τεστ διασφάλισης ποιότητας**
Τέτοιου είδους τεστ διασφάλισης ποιότητας μπορούν να φανερώσουν μέσω τυπικών μετρήσεων στο κατεργασμένο τεμάχιο εάν η μηχανή από την οποία προήλθε έχει βλάβη σε κάποιο εξάρτημά της.
- **Online παρακολούθηση μηχανής**
Η μεθοδολογία αυτή περιλαμβάνει την συνεχή και ταυτόχρονη παρακολούθηση μιας μηχανής από εξοπλισμό (αισθητήρες και καταγραφικά) που είναι μόνιμα τοποθετημένα στη μηχανή. Τα δεδομένα που συλλέγονται καταλήγουν σε έναν κεντρικό server από όπου διαμορφώνεται ένας συνολικός προγραμματισμός συντηρήσεων. Σήμερα, αποτελεί μια από τις πιο εξελιγμένες μορφές προγραμματισμού συντηρήσεων και εφαρμόζεται σε αρκετές βιομηχανίες για πολλές μηχανές ταυτόχρονα.
- **Online προστασία μηχανής**
Online προστασία της μηχανής είναι η μέθοδος κατά την οποία οι αποφάσεις που παίρνονται από τα δεδομένα της online παρακολούθησης της μηχανής λαμβάνουν χώρα την ίδια στιγμή στη μηχανή επιτρέποντας, ή όχι, τη λειτουργία της.

1.4 Κλάδοι στους οποίους εφαρμόζεται η προβλεπτική συντήρηση

Ανεμογεννήτριες

Ως κρίσιμος τομέας της αγοράς ενέργειας οι ανεμογεννήτριες για να είναι αποδοτικές θα πρέπει να λειτουργούν αδιάκοπα με όσο το δυνατόν λιγότερες συντηρήσεις. Μέθοδοι όπως αυτές που αναλύονται παρακάτω στην προβλεπτική συντήρηση, με τα κινητά συστήματα καταγραφής δεδομένων συναντώνται πολύ συχνά στη βιομηχανία αυτή λόγω των δύσκολων συνθηκών που επικρατούν (ύψος , εξωτερικό περιβάλλον λειτουργίας). Αυτές οι συνθήκες περιορίζουν και τις συντηρήσεις στις περιπτώσεις μόνο που είναι απαραίτητες .

Βιομηχανίες ορυκτών και πετρελαιοειδών

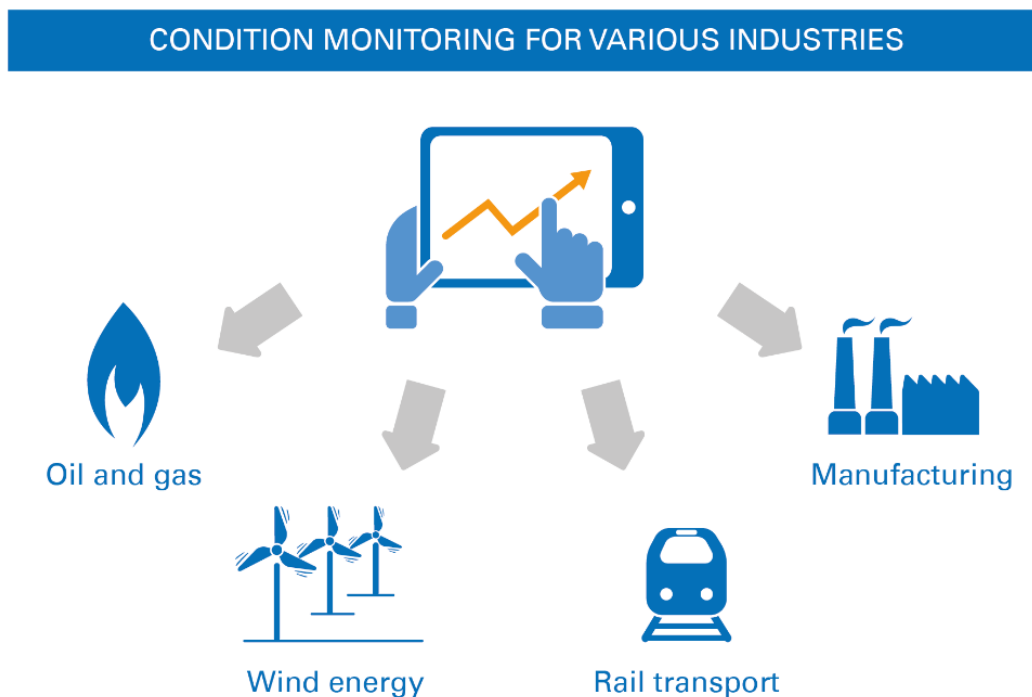
Καθώς το κόστος των πετρελαιοειδών αυξάνεται και η χρήση φυσικού αερίου διευρύνεται, το κόστος συντήρησης και λειτουργίας του εξοπλισμού διανομής και εξόρυξης αυξάνεται σημαντικά. Οι αντλίες και τα γεωτρύπανα συχνά βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές με συνέπεια τα έξοδα των τεχνικών συνεργείων να είναι με τη σειρά τους υψηλότερα. Σε αυτή την περίπτωση διαγνωστικά συστήματα ταυτόχρονης online παρακολούθησης του κρίσιμου εξοπλισμού είναι ιδιαίτερα χρήσιμα διότι οδηγούν σε οργάνωση των τακτικών συντηρήσεων και των αντικαταστάσεων μόνο όταν αυτό απαιτείται, ρίχνοντας σημαντικά το κόστος. Ένας ακόμα παράγοντας που αναγκάζει τέτοιου είδους βιομηχανίες να χρησιμοποιούν διαγνωστικά συστήματα είναι η συνεχώς αυξανόμενη πίεση που δέχονται οι εταιρείες για διασφάλιση της ποιότητας και παρακολούθηση της καταλληλότητας του εξοπλισμού για αποφυγή τυχόν ατυχημάτων που θα οδηγούσαν σε σοβαρές περιβαλλοντικές καταστροφές . Η διαγνωστική παρακολούθηση επιτρέπει στους τεχνικούς να αντιλαμβάνονται αστοχίες υλικών , καιρό πριν την εκδήλωσή τους.

Βιομηχανίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ίσως η σημαντικότερη βιομηχανική δραστηριότητα καθώς όλες οι υπόλοιπες στηρίζονται στην ύπαρξή της και την αδιάκοπη λειτουργία της. Η διαθεσιμότητα του εξοπλισμού, η αποδοτικότητα και η αξιοπιστία παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στη συνολική βιομηχανική δραστηριότητα της περιοχής. Επίσης είτε πρόκειται για μονάδες αμμοστροβίλων είτε υδροηλεκτρικών μονάδων το μεγαλύτερο μέρος του εξοπλισμού αποτελείται κυρίως από περιστρεφόμενα στοιχεία μηχανών, των οποίων η εξέταση της λειτουργικής κατάστασης μπορεί να διασφαλίσει της απρόσκοπτη λειτουργία τους.

Βιομηχανική παραγωγή διακριτών προϊόντων

Σε αυτό τον κλάδο ,που συμπεριλαμβάνει από μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες και μηχανουργεία μέχρι χαλυβουργίες, συναντά κανείς μια μεγάλη ομάδα εργαλειομηχανών υψηλής ακρίβειας και μεγάλου κόστους που η συντήρησή τους δεν είναι μια εύκολη υπόθεση τόσο σε θέμα χρόνου όσο και κόστους. Ακριβώς για τους παραπάνω λόγους σε αυτού του είδους τις βιομηχανίες είναι σημαντικό να υπάρχει ένα κεντρικό σύστημα αυτοματοποιημένης παρακολούθησης της λειτουργικής κατάστασης των μηχανών, προβλεπτικής συντήρησης και σύγχρονων διαγνωστικών συστημάτων.



Εικόνα 1 Βιομηχανίες εφαρμογής της προβλεπτικής συντήρησης [3]

1.5 Προκλήσεις που δημιουργούνται χρησιμοποιώντας στρατηγική συντηρήσεων βάση της λειτουργικής κατάστασης

- Μια τέτοια τεχνική διαδικασία προϋποθέτει την επένδυση σημαντικού κεφαλαίου για την αγορά και εγκατάσταση του εξοπλισμού καθώς και για την κατάλληλη εκπαίδευση του τεχνικού προσωπικού σχετικά με τη σωστή λειτουργία τους,[4].
- Η ακρίβεια και η απόδοση του συστήματος προβλεπτικής συντήρησης βάση της λειτουργικής κατάστασης και πιο συγκεκριμένα των αισθητήρων που χρησιμοποιούν, εξαρτάται από το περιβάλλον λειτουργίας. Σε περιβάλλον με δύσκολες συνθήκες

(υγρασία, υψηλές θερμοκρασίες, λιπαντικά έλαια, κραδασμοί, έκθεση σε κακές καιρικές συνθήκες) οι αισθητήρες χάνουν την ακρίβειά τους με αποτέλεσμα να μην τροφοδοτούν το σύστημα με σωστά δεδομένα. Έτσι, η επιλογή των αισθητήρων πρέπει να γίνεται βάση διεξοδικής ανάλυσης του περιβάλλοντος εγκατάστασης.

- Σε αντίθεση με την προγραμματισμένη προληπτική συντήρηση, οι εργασίες συντήρησης πραγματοποιούνται όταν το υποδεικνύουν τα δεδομένα που έρχονται από τους αισθητήρες. Αυτό μπορεί να προκαλέσει την ταυτόχρονη συντήρηση πολλών εξοπλισμών σε μικρό χρονικό διάστημα, [4].

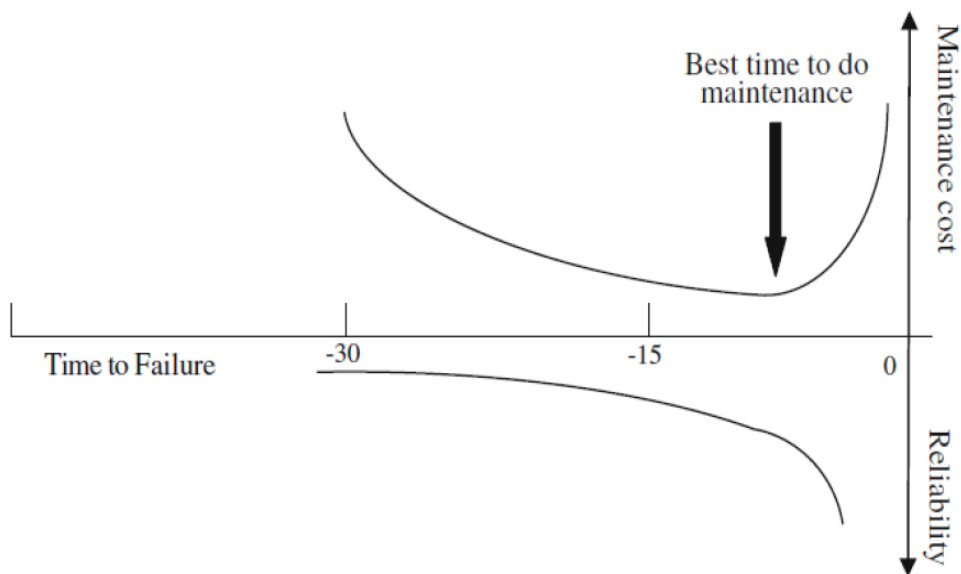
1.6 Πλεονεκτήματα

Ένα διαγνωστικό σύστημα βασισμένο στην παρακολούθηση της λειτουργικής κατάστασης προωθεί τις προληπτικές και τις διορθωτικές ενέργειες και οργανώνει τον προγραμματισμό την στιγμή που πρέπει μειώνοντας το κόστος ιδιοκτησίας των παραγωγικών μέσων. Σήμερα, η εξέλιξη της τεχνολογίας καθιστά πολύ ευκολότερη από ότι παλαιότερα την συλλογή, διαχείριση και ανάλυση των δεδομένων διάγνωσης. Αποτελεί συνεπώς μια διαδικασία με υψηλή αποτελεσματικότητα όπου η ασφάλεια και η αξιοπιστία των μηχανημάτων είναι κύριο μέλημα όπως την αεροπορική βιομηχανία, τη βιομηχανία διαχείρισης ενέργειας, τις εξορύξεις και τις εταιρείες κατασκευής και κατεργασίας μετάλλου και πλαστικών.

Όταν λειτουργεί με συνέπεια ένα τέτοιο σύστημα, ελαχιστοποιεί τις διακοπές της παραγωγής, μειώνει το ρίσκο και την επικινδυνότητα για τους εργαζομένους και τις ανώφελες συντηρήσεις όπου δεν χρειάζονται και αποτελεί έναν καλό συμβιβασμό αν σκεφτεί κανείς την εξειδίκευση και τον τεχνικό εξοπλισμό που απαιτείται.

Παρακάτω παρατίθενται μερικά από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση ενός τέτοιου συστήματος [4]:

- Μικρότερος αριθμός μη-αναμενόμενων βλαβών
- Μεγαλύτερη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού, αξιοπιστία και ασφάλεια
- Ελαχιστοποίηση του χρόνου συντήρησης
- Δυνατότητα προγραμματισμού της συντήρησης σε χρόνο που δεν υπάρχει μεγάλος φόρτος εργασίας για τον εξοπλισμό
- Αύξηση του χρόνου ζωής του μηχανήματος
- Μείωση του δεσμευμένου κεφαλαίου για αγορά και αποθήκευση ανταλλακτικών



Διάγραμμα 2 Διάγραμμα βέλτιστου προγραμματισμού συντήρησης [5]

1.7 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η βιβλιογραφία στην οποία στηρίχτηκε η παρούσα εργασία ποικίλει ανάμεσα σε πολλά ερευνητικά έργα που βοήθησαν στην εκπόνηση της αλλά και διάφορες πηγές από ιστότοπους εταιρειών όπως η TEConnectivity, η SKF, η Analog Devices κι άλλες αλλά και ιστότοποι κοινοτήτων (π.χ. Mathworks - Matlab) που συνέβαλαν στην ανάπτυξη του αλγορίθμου. Αρχικά, από τις πληροφορίες του μεταπτυχιακού μαθήματος «Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις», οι οποίες στηρίζονται στο [2], χρησιμοποιήθηκε η μελέτη γύρω από την ανάπτυξη βλαβών σε έδρανα ολίσθησης. Την ίδια ανάλυση συναντά κανείς και στην [6], η οποία είναι πιο στοχευμένη γύρω από τις βλάβες των εδράνων ολίσθησης των ατράκτων εργαλειομηχανών αλλά και των αιτιών που τις προκαλούν. Γνωρίζοντας πλέον τον τρόπο εξέλιξης του φαινομένου που αναλύεται στην παρούσα εργασία, προσδιορίζεται ο τρόπος προσέγγισης, οι μέθοδοι ανάλυσης (ανάλυση κραδασμών στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας), οι συχνοτικές περιοχές στις οποίες πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία και τα χαρακτηριστικά εκείνα που υποδεικνύουν την ύπαρξη της βλάβης. Χαρακτηριστικά τα συγγράμματα τα οποία συνέβαλαν στο θεωρητικό υπόβαθρο που χρειάστηκε η ενασχόληση με την προβλεπτική συντήρηση ήταν το [7] και το [1], το οποίο είναι και η δημοσίευση αναφοράς της πειραματικής διάταξης της οποίας χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις για την ανάπτυξη της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, στο [7] παρουσιάζεται σαν συμπέρασμα ότι για εργαλειομηχανές όπως τα κέντρα κατεργασιών, η σύγκριση του επιπέδου δονήσεων που παράγονται από τα έδρανα είναι ένας αποτελεσματικός και ακριβής τρόπος για εφαρμογή προβλεπτικής συντήρησης. Χρησιμοποιώντας τα συμπεράσματα από το [1], που υποδεικνύει τη σημασία της αποθρομβοποίησης των

σημάτων που αναλύονται για διαγνωστικούς σκοπούς αλλά και των αποτελεσμάτων χρήσης του κυματιδιακού μετασχηματισμού στην αποθρομβοποίηση, έγινε η επιλογή της χρήσης αποθρομβοποίησης των σημάτων που αναλύθηκαν μέσω κυματιδιακού μετασχηματισμού στον αλγόριθμο αυτής της εργασίας. Στην [6], γίνεται έρευνα σχετικά με τους πιο συχνούς δείκτες που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση σημάτων που περιέχουν κρουστικούς παλμούς. Τέτοιου είδους σήματα θα χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή χαρακτηριστικών στον αλγόριθμο αυτής της εργασίας, έτσι αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν αυτοί οι δείκτες (RMS τιμή επιτάχυνσης και ταχύτητα κραδασμών, κύρτωση σήματος, δείκτης κορυφής), παρόλο που όπως αναφέρεται στο ίδιο σύγγραμμα οι δείκτες αυτοί εξαρτώνται άμεσα από την ταχύτητα περιστροφής του εδράνου οπότε αυτή η παράμετρος θα πρέπει πάντα να αναφέρεται όταν γίνεται σχετική σύγκριση. Όπως θα δει ο αναγνώστης και παρακάτω οι δείκτες αυτοί αποτελούν τα βασικά εργαλεία για να φτιαχτεί ένας αλγόριθμος που λειτουργεί σαν ταξινομητής λειτουργικής κατάστασης των εδράνων κύλησης. Στο κομμάτι της ταξινόμησης των εδράνων της ατράκτου ανάλογα με τη λειτουργική τους κατάσταση και της μηχανικής μάθησης που αυτό απαιτεί, οι δημοσιεύσεις [8], [9] ήταν ιδιαίτερος χρήσιμες. Στις [8] και [9], αποδεικνύεται ότι συγκεκριμένα για την ταξινόμηση αυτή, οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης των νευρωνικών δικτύων (Neural Network) και μηχανών διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machines) παρουσιάζουν ιδιαίτερος καλά αποτελέσματα ειδικότερα όταν τροφοδοτούνται από δεδομένα που έχουν προκύψει από αποτελεσματική επεξεργασία σήματος. Στο κομμάτι της εύρεσης της υπολειπόμενης ζωής του εδράνου κύλισης από τα σημαντικότερα ερευνητικά έργα ήταν το [10] και το [11]. Συγκεκριμένα στο [11], αποδεικνύεται ότι προκειμένου να προδιοριστεί το υπόλοιπο της διάρκειας ζωής ενός εδράνου ολίσθησης, μαθηματικά μοντέλα εκθετικής υποβάθμισης λειτουργούν με ακρίβεια της τάξης του 11%-15%. Αντίστοιχα, στο [10] όπου για τον προσδιορισμό του υπόλοιπου της διάρκειας ζωής ενός εδράνου ολίσθησης χρησιμοποιούνται νευρωνικά δίκτυα τύπου Feed Forward Neural Networks (FFN), τα αποτελέσματα είναι εξίσου καλά. Στη συνέχεια της εργασίας αυτής ο αναγνώστης θα συναντήσει και πολλές ακόμα βιβλιογραφικές αναφορές στα επιμέρους τμήματα.

Η πρωτοτυπία της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ότι επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός αλγορίθμου ο οποίος προορίζεται για διαγνωστική χρήση σε έδρανα κύλισης χωρίς τα αποτελέσματα του να δεσμεύονται από τις χαρακτηριστικές συχνότητες φθοράς του εκάστοτε εδράνου με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια οικογένεια εδράνων. Αυτό συμβαίνει διότι οι χαρακτηριστικές συχνότητες των εδράνων προκύπτουν από τα είδος τους και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους. Το γεγονός ότι το νευρωνικό δίκτυο που αναπτύσσεται για τον αλγόριθμό χρησιμοποιεί χαρακτηριστικά από συχνοτικές περιοχές και όχι από συγκεκριμένες συχνότητες, όπως οι περισσότερες μέχρι τώρα εργασίες, δίνει μια μεγαλύτερη ευελιξία ως προς το πεδίο εφαρμογής του αλγορίθμου. Τέλος, ο αλγόριθμος που αναπτύσσεται αποτελείται από μία πολύ απλή και εύκολα προσαρμόσιμη δομή ενώ ταυτόχρονα δεν έχει μεγάλες απαιτήσεις όσο αναφορά την υπολογιστική ισχύ.

2 Εργαλειομηχανές και προβλεπτική συντήρηση

2.1 Γενική περιγραφή

Σήμερα, οι εργαλειομηχανές αποτελούν τον πιο σύγχρονο και συνήθη τρόπο κατασκευής πληθώρας εξαρτημάτων. Αποτελούν τη ραχοκοκαλιά της σύγχρονης βιομηχανίας καθώς έχουν ικανότητες επεξεργασίας πολλών υλικών, μεταξύ αυτών, πολλών σκληρών υλικών όπως τιτάνιο, ενισχυμένα μεταλλικά κράματα, ανοξείδοτοι χάλυβες κ.α. Τα περισσότερα από τα εξαρτήματα που προκύπτουν από αυτές τις κατεργασίες χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερα ή μικρότερα συναρμολογήματα και εκτίθενται σε διάφορες μηχανικές καταπονήσεις.

Οι εργαλειομηχανές CNC (Computer Numerical Control) είναι η σύγχρονη μορφή εργαλειομηχανών που συναντούμε σήμερα στις περισσότερες βιομηχανίες καθώς έχουν την δυνατότητα κατεργασιών μεγάλης ακρίβειας μέσω αριθμητικού ελέγχου των κινήσεων των επιμέρους αξόνων. Οι άξονες από τους οποίους αποτελείται μια εργαλειομηχανή κινούνται μέσω σερβοκινητήρων με βάση τα σήματα εισόδου που παίρνουν. Το λειτουργικό σύστημα της μηχανής έχει τη δυνατότητα να διαβάσει, μέσω μίας γλώσσας προγραμματισμού, πρόγραμμα στο οποίο οι απαιτούμενες κινήσεις περιγράφονται με κατάλληλες συντεταγμένες και να υπολογίζει τις όποιες ενδιάμεσες τιμές απαιτούνται, στέλνοντας τα αντίστοιχα σήματα στον εκάστοτε άξονα που πρέπει να κινηθεί. Η ανάγνωση αυτού του προγράμματος γινόταν στο παρελθόν με χρήση διάτρητων καρτών, σήμερα το πρόγραμμα κατεργασίας που μεταφορτώνεται στην εργαλειομηχανή φτιάχνεται με τη βοήθεια Η/Υ μέσω πακέτων λογισμικού CAM (Computer Aided Manufacturing) και η αποστολή τους μπορεί να γίνεται κατευθείαν από τον υπολογιστή μέσω καλωδίου RS232 ή με χρήση USB stick ή και μέσω συστημάτων DNC.

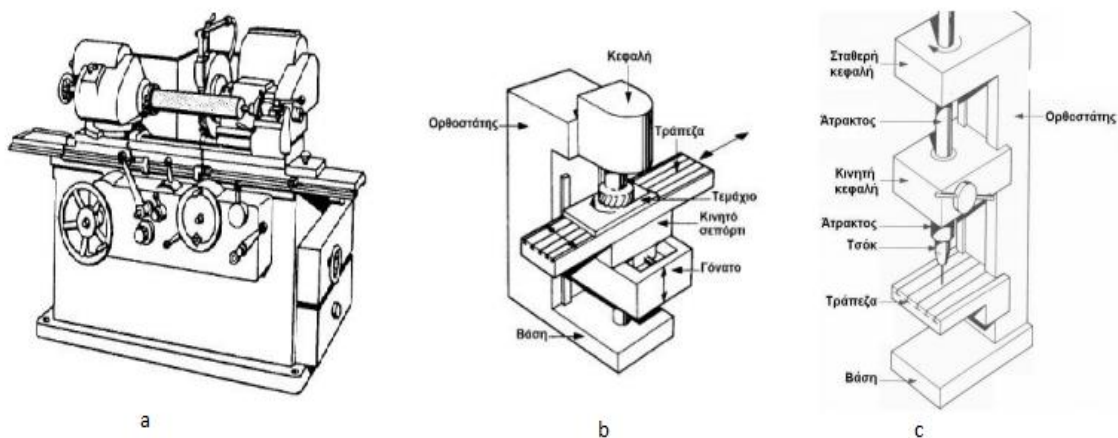
2.2 Είδη εργαλειομηχανών

Η κατάταξη των εργαλειομηχανών μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, για αυτό και σε κάθε βιβλιογραφική πηγή μπορεί κανείς να συναντήσει διαφορετική κατηγοριοποίηση. Οι συνηθέστεροι τρόποι διαχωρισμού είναι σύμφωνα με το είδος κατεργασίας, το μέγεθος, την ακρίβεια και τον αριθμό των αξόνων.

1. Είδος κατεργασίας
 - a. Αποβολής υλικού (τόρνος, φρέζα, πλάνη, δράπανο)
 - b. Διαμόρφωσης υλικού (στράντζα, πρέσα, έλαση, ολκή)

Επικεντρώνοντας την προσοχή στην πρώτη κατηγορία, αυτή των κατεργασιών αποβολής υλικού, ο διαχωρισμός των εργαλειομηχανών μπορεί να γίνει όπως παρακάτω:

- Ως προς το είδος κατεργασίας
 - Ως προς το είδος της πρωτεύουσας κίνησης
 - Εργαλειομηχανές με περιστροφική κίνηση
 - Τόρνοι
 - Φρέζες
 - Δράπανα
 - Φρεζοδράπανα
 - Λειαντικοί τροχοί
 - Πριόνια
 - Ως προς τον βαθμό αυτοματισμού
 - Κοινές εργαλειομηχανές
 - Ημιαυτόματες εργαλειομηχανές (οι κινήσεις γίνονται αυτόματα με ψηφιακή καθοδήγηση)
 - Αυτόματες εργαλειομηχανές (οι κινήσεις γίνονται αυτόματα με ψηφιακή καθοδήγηση και η φόρτωση/εκφόρτωση στην μηχανή γίνεται και αυτή αυτόματα)



Εικόνα 2 Εικόνες συμβατικών εργαλειομηχανών [12]

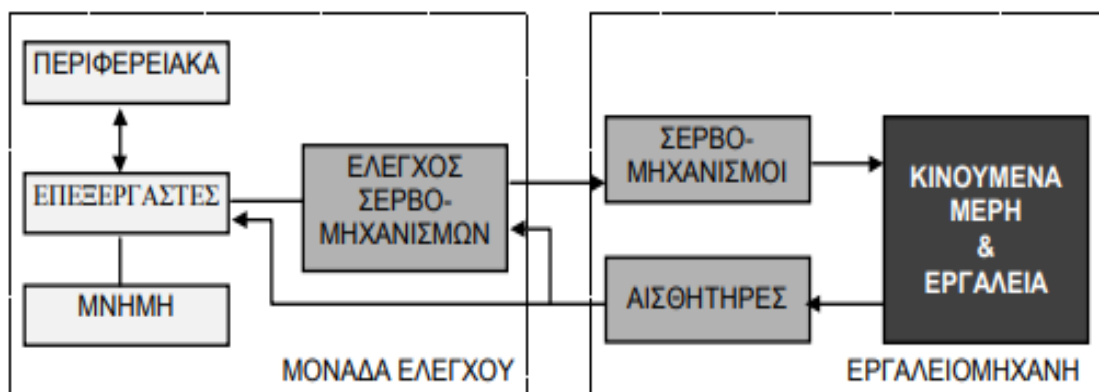
Τα κύρια μέρη μίας εργαλειομηχανής είναι τα παρακάτω :

- Οι άξονες της εργαλειομηχανής - συνδυασμός γραμμικών και περιστροφικών, όπου κάθε άξονας νοείται και με την κινηματική του έννοια, αλλά και σαν σύστημα μετάδοσης κίνησης, όπως επίσης και μέτρησης των στοιχείων αυτής της κίνησης (θέση, ταχύτητα, επιτάχυνση).

- Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου το οποίο περιλαμβάνει συνήθως ένα αριθμό μικροεπεξεργαστών, RAM, ROM και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για την επεξεργασία και διαχείριση του προγράμματος καθώς και ηλεκτρονικά ισχύος για τον έλεγχο των αξόνων.
- Το λογισμικό - λειτουργικό σύστημα το οποίο περιλαμβάνει παραμέτρους μηχανής, περιβάλλον προγραμματισμού, σταθερές ρουτίνες επιμέρους κατεργασιών, ρουτίνες διευκόλυνσης του προγραμματισμού της μονάδας ελέγχου, σύστημα ενδείξεων τρέχουσας κατάστασης, διαγνωστικά βλαβών κλπ.
- Διάφορα περιφερειακά για την εισαγωγή του προγράμματος στη μηχανή, την εκτύπωση αρχείων και ενδεχομένως την παρακολούθηση της λειτουργίας της εργαλειομηχανής

Πίνακας 1 Είδη εργαλειομηχανών [12]

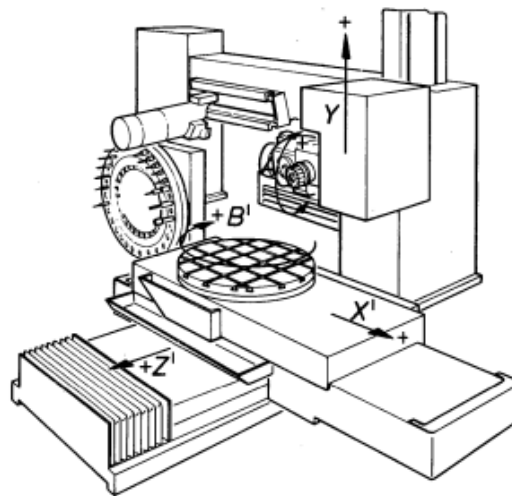
Κατεργασία	Εργαλειομηχανή	Τεχνικές Επιφάνειες	Κίνηση Εργαλείου	Κίνηση Τεμαχίου
Τόρνευση	Τόρνος	Κυκλικές	Μετατόπιση	Περιστροφή
Φρεζάρισμα	Φρέζα	Επίπεδες Κυκλικές Εσοχές Αυλάκια Οδοντοτροχοί	Περιστροφή	Μετατόπιση
Διάτρηση	Δράπανο	Άνοιγμα οπών	Περιστροφή	Ακίνητο
Πλάνισμα	Πλάνη	Επίπεδες	Μετατόπιση	Μετατόπιση
Λείανση	Λειαντικός Τροχός	Επίπεδες Κυκλικές	Περιστροφή + Μετατόπιση	Μετατόπιση + Περιστροφή



Εικόνα 3 Κύρια μέρη ελέγχου εργαλειομηχανής [12]

2.3 Αρχή λειτουργίας κέντρου κατεργασιών

Τα κέντρα κατεργασιών είναι αυτόματες εργαλειομηχανές φρεζαρίσματος και διάτρησης, που διαχωρίζονται σε κατακόρυφου άξονα (VMCs) ή οριζόντιου άξονα (HMCs). Πρακτικά, κάθε κέντρο κατεργασιών είναι και μια φρέζα, κάθε φρέζα όμως δεν είναι κέντρο κατεργασιών. Ο όρος "κέντρο κατεργασιών" περιγράφει σχεδόν κάθε μηχανή φρεζαρίσματος και διάτρησης με CNC καθοδήγηση που περιλαμβάνει αυτόματη αποθήκευση και αλλαγή εργαλείων. Σε ένα κέντρο κατεργασιών, το εργαλείο περιστρέφεται, χωρίς όμως να περιστρέφεται το προς κατεργασία τεμάχιο. Ο προσανατολισμός του άξονα είναι το πιο θεμελιώδες καθοριστικό χαρακτηριστικό ενός κέντρου κατεργασιών. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των κέντρων κατεργασιών είναι ότι μπορούμε να συναντήσουμε πολλούς περισσότερους άξονες κατεργασίας με τις μηχανές πέντε αξόνων να είναι από τους πιο δημοφιλείς τύπους. Τα πλεονεκτήματα που έχει ένα κέντρο κατεργασιών πολλών αξόνων είναι ότι μπορεί να κατεργαστεί το τεμάχιο σε διαφορετικές κατευθύνσεις χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε εργαλείο, περιστρέφοντας είτε την άτρακτο συγκράτησης του εργαλείου είτε την κλίνη, στην οποία συγκρατείται το τεμάχιο.

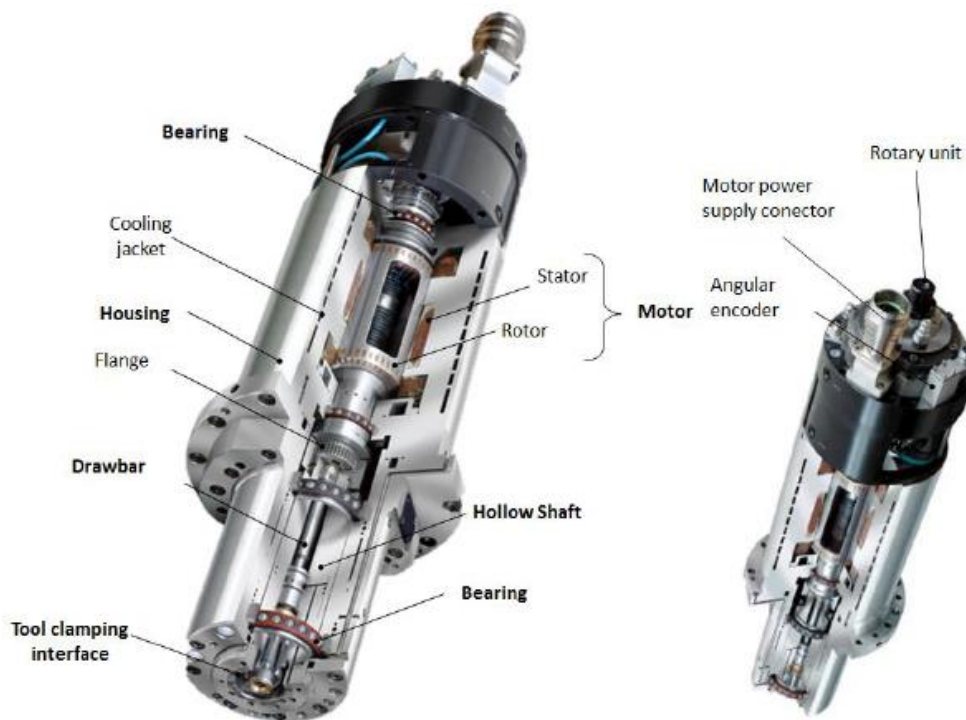


Εικόνα 4 Κέντρο κατεργασίας [12]

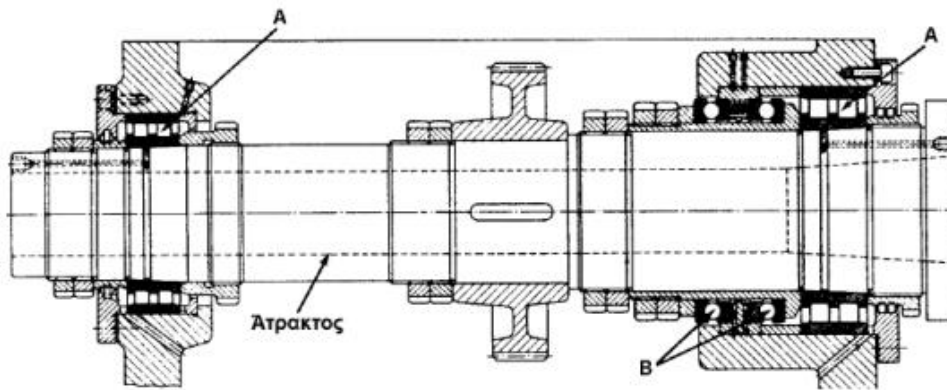
2.4 Μονάδες ατράκτου

Οι μονάδες ατράκτου είναι ένα από τα σημαντικότερα λειτουργικά μέρη μιας εργαλειομηχανής, μαζί με την τράπεζα και τον εργαλειοφορέα. Είναι το τμήμα της μηχανής το οποίο παρέχει την απαραίτητη ισχύ για την ολοκλήρωση μιας κατεργασίας κοπής. Η άτρακτος είναι κατασκευασμένη με υψηλή ακρίβεια και συμπεριλαμβάνει στο συναρμολόγημά της αρκετά εξαρτήματα ακριβείας όπως τον άξονα, τα έδρανα κυλίσεως, το

σύστημα σύσφιξης (εργαλείου ή τεμαχίου). Κρίσιμο για την λειτουργία μιας ατράκτου είναι ο σχεδιασμός της, ο τρόπος μετάδοσης της κίνησης, η μέθοδος λίπανσης, ο σχεδιασμός και η επιλογή τύπου εδράνων κύλισης, ο τύπος ηλεκτρικού κινητήρα, οι ανοχές που θα επιλεχθούν και η μέθοδος συγκράτησης στην εργαλειομηχανή. Όλα τα παραπάνω πρέπει να σχεδιαστούν και να επιλεχθούν ώστε να συνεργάζονται μεταξύ τους με απόλυτη αρμονία ώστε να επιτευχθεί κατά τη διαδικασία της κοπής η απαραίτητη ακρίβεια που προδιαγράφεται. Η συνεργασία και ο σχεδιασμός της υπόλοιπης εργαλειομηχανής που πρόκειται να εγκατασταθεί η εκάστοτε άτρακτος παίζει επίσης σημαντικό ρόλο, ιδιαίτερα στα κέντρα κατεργασίας, καθώς καθορίζονται ως ένα βαθμό οι δυνατότητες της μηχανής από αυτό. Οι προδιαγραφές μιας ατράκτου λοιπόν είναι μεταξύ άλλων η ακρίβεια, η δυνατότητα για εύρωστη λειτουργία σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων, η ικανότητα απορρόφησης κραδασμών, η στιβαρότητα, η σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας, κ.α. Για όλους τους προαναφερθέντες λόγους τα εξαρτήματα που απαρτίζουν την άτρακτο πρέπει να είναι πολύ προσεκτικά επιλεγμένα.



Εικόνα 5 Λειτουργικά μέρη ατράκτου [6]


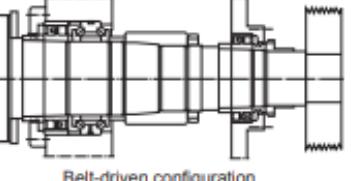
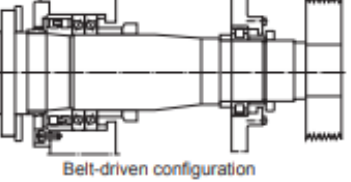
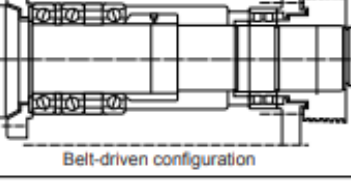
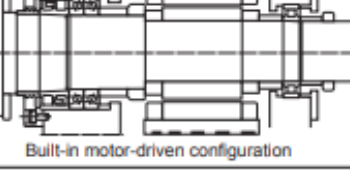


Εικόνα 6 Τομή ατράκτου [12]

2.5 Έδρανα κυλίσεως

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [6], τα έδρανα κυλίσεως απαρτίζουν το σημαντικότερο ρόλο στο σχεδιασμό του συναρμολογήματος της ατράκτου. Η ακρίβεια οδήγησης της ατράκτου, ακτινικά και αξονικά, επιτυγχάνεται με τα κατάλληλα έδρανα, την ελάχιστη «χάρη» μεταξύ τριβέα και στροφέα, το υλικό κατασκευής και τη γεωμετρία. Τα έδρανα ατράκτου παραδοσιακά κατασκευάζονται από χάλυβες χρωμίου υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα όπως το 100Cr6. Αυτά τα έδρανα λειτουργούν καλά στις περισσότερες περιπτώσεις, παρόλα αυτά στις υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής (> 100.000 στροφές ανά λεπτό) και για να επιτυγχάνουν ακόμη μεγαλύτερες διάρκειες ζωής σε μέτριες ταχύτητες, μπορεί να απαιτούν εναλλακτικά υλικά κατασκευής. Συγκεκριμένα, κράματα πυριτίου-νιτρίδιου συναντώνται στην κατασκευή των κεραμικών σφαιρών έτσι ώστε να ζυγίζουν λιγότερο και να είναι ισχυρότερες και σκληρότερες από τις σφαίρες χάλυβα επιλύοντας δυναμικά προβλήματα που απασχολούν κυρίως την κατηγορία των εργαλειομηχανών υψηλών στροφών (High-speed machining). Οι κεραμικές σφαίρες εμφανίζουν επίσης καλύτερη συμπεριφορά στην περίπτωση εισροής ψυκτικών μέσων με βάση το νερό, τα οποία δημιουργούν προβλήματα στα χαλύβδινα μέρη ενός εδράνου και τα οποία έχουν αρχίσει να κερδίζουν έδαφος έναντι των συμβατικών λιπαντικών κοπής. Ένα ακόμα κράμα που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των εδράνων είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας με υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο όπως το Nitralloy. Το συναντούμε συχνά στο συνηθέστερο τύπο εδράνων, τα σφαιρικά έδρανα γωνιακής επαφής. Τα κεραμικά και τα ανοξείδωτα ρουλεμάν χρειάζονται λιγότερη λίπανση από ό,τι τα αντίστοιχα χαλύβδινα, αν και ορισμένα χρειάζονται την ίδια λίπανση για τον έλεγχο της θερμότητας και την ελαχιστοποίηση της φθοράς. Η επιλογή και η μέθοδος διανομής λιπαντικού εξαρτάται κυρίως από συνθήκες λειτουργίας της ατράκτου όπως θερμοκρασίες λειτουργίας και ταχύτητες, αλλά μπορεί επίσης να υπαγορεύεται και από τις απαιτήσεις λίπανσης των γειτονικών στοιχείων όπως τους οδοντωτούς τροχούς του κιβωτίου ταχυτήτων. Τα στοιχεία των εδράνων έχουν αντιτριβική επένδυση μετάλλου και συναρμολογούνται με τρόπο τέτοιο ώστε να είναι εύκολη η ρύθμιση τους αξονικά και

ακτινικά. Εναλλακτικά, χρησιμοποιούνται και υδροστατικά έδρανα (λίπανση υπό πίεση), τα οποία τα συναντούμε συνήθως σε εργαλειομηχανές χαμηλότερων στροφών. Στις ατράκτους εργαλειομηχανών τα έδρανα κυλίσεως χρησιμοποιούνται σε διαφορετικούς συνδυασμούς ανάλογα με την εφαρμογή και τον τρόπο μετάδοσης κίνησης. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται μερικοί από τους διαφορετικούς συνδυασμούς τύπων εδράνων σε συνδεσμολογία ατράκτου περιστροφής.

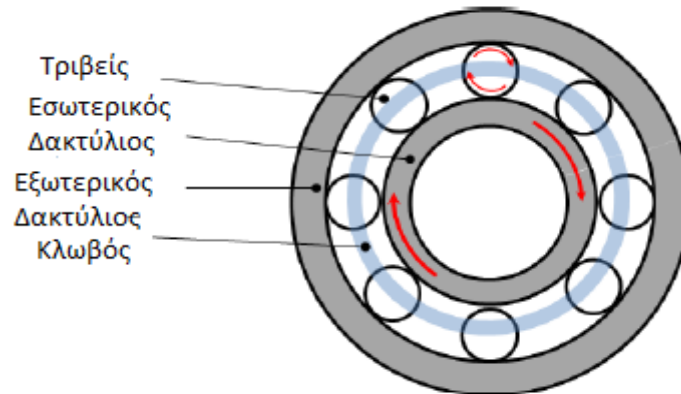
Bearing arrangement for main spindle	Bearing type	Typical applications
 <p>Gear-driven configuration</p>	<p>[Type I] Tapered roller bearing + Tapered roller bearing + (Double-row cylindrical roller bearing)</p>	<p>Large turning machine (Oil country lathe) General-purpose turning machine</p> <p>Typical lubrication <Grease lubrication></p>
 <p>Belt-driven configuration</p>	<p>[Type II] Double-row cylindrical roller bearing + Double-direction angular contact thrust ball bearing + Double-row cylindrical roller bearing</p>	<p>CNC turning machine Machining center Boring machine Milling machine</p> <p>Typical lubrication <Grease lubrication></p>
 <p>Belt-driven configuration</p>	<p>[Type III] Double-row cylindrical roller bearing + High-speed duplex angular contact ball bearing for axial load + Single-row cylindrical roller bearing</p> <p>NOTE: high-speed variant of type II</p>	<p>CNC turning machine Machining center Milling machine</p> <p>Typical lubrication <Grease lubrication></p>
 <p>Belt-driven configuration</p>	<p>[Type IV] Duplex angular contact ball bearing (DBT arrangement) + Double-row cylindrical roller bearing</p> <p>NOTE: high-speed variant of type II or III</p>	<p>CNC turning machine Machining center Milling machine</p> <p>Typical lubrication <Grease lubrication></p>
 <p>Built-in motor-driven configuration</p>	<p>[Type V] Double-row cylindrical roller bearing + High-speed duplex angular contact ball bearing for axial load + Single-row cylindrical roller bearing</p> <p>NOTE: high-speed variant of type III with built-in motor-driven configuration</p>	<p>CNC turning machine Machining center Milling machine</p> <p>Typical lubrication <Grease lubrication> <Air-oil lubrication></p>

Εικόνα 7 Διάφορες διατάξεις ατράκτων [6]

Παρά την πληθώρα των διάφορων τύπων εδράνων ως προς τον μηχανισμό περιστροφής (μαγνητικά, υδροστατικά, υδροδυναμικά), όπως αποκαλύπτεται από την εργασία των Weck & Koch [13], τα έδρανα με τριβείς κύλισης έχει αποδειχτεί ότι ανταποκρίνονται καλύτερα σε εφαρμογές όπως αυτή της ατράκτου εργαλειομηχανής. Ένα μεγάλο μειονέκτημα αυτού του τύπου εδράνων είναι η αδυναμία τους για απόσβεση κραδασμών, ενώ ανάμεσα στα βασικά

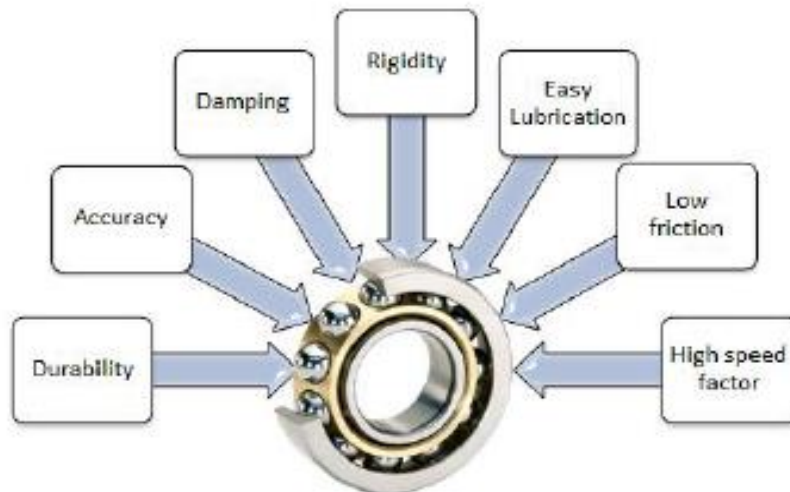
τους πλεονεκτήματα είναι το χαμηλό κόστος αλλά και η εύκολη λίπανση λόγω των οποίων έχουν κυριαρχήσει στην αγορά.

Εξετάζοντας την ανατομία ενός εδράνου κυλίσεως βλέπουμε ότι αποτελείται από τον εξωτερικό δακτύλιο, από τους τριβείς ολίσθησης, τον κλωβό συγκράτησης, και τον εσωτερικό δακτύλιο που είναι και το μέρος που συγκρατείται με τον άξονα.



Εικόνα 8 Λειτουργικά μέρη εδράνων κύλισης [6]

Κατά τη λειτουργία τους, τα έδρανα κυλίσεως έρχονται σε απευθείας επαφή με τον άξονα που περιστρέφεται μέσω της εσωτερικής επιφάνειας του εσωτερικού δακτυλίου. Έτσι, η γωνιακή ταχύτητα του εσωτερικού δακτυλίου είναι ίση με αυτή του άξονα περιστροφής και ταυτόχρονα φορτίζεται από τον άξονα, ακτινικά και αξονικά. Ο εξωτερικός δακτύλιος έρχεται σε επαφή με την εσωτερική δομή στήριξης της ατράκτου και παραμένει σταθερός χωρίς καμία περιστροφή. Οι τριβείς κυλίσεως είναι συμμετρικά κατανομημένοι και διαχωρισμένοι μέσω του κλωβού, ο οποίος αποτρέπει και την μεταξύ τους επαφή, η οποία θα επιφέρει ανάπτυξη θερμότητας. Επιπρόσθετα, ο κλωβός είναι το στοιχείο που οδηγεί τους τριβείς από την φορτισμένη ζώνη του εδράνου προς την αφόρτιστη αποφεύγοντας ταυτόχρονα την ολίσθηση των τριβέων που μπορεί να δημιουργήσει φθορές. Για την ομαλή τους λειτουργία τα έδρανα αυτά χρειάζονται μια λεπτή λωρίδα (φιλμ) ελαίου λίπανσης στον εξωτερικό και εσωτερικό δακτύλιο.



Εικόνα 9 Χαρακτηριστικά των εδράνων κύλισης [6]

Προκειμένου να επιτευχθούν οι απαιτήσεις αντοχής, ακρίβειας, απόσβεσης και στιβαρότητας τα έδρανα κύλισης σφαιρικών ή κυλινδρικών τριβών κύλισης χρησιμοποιούνται στους άξονες ατράκτων εργαλειομηχανών. Ειδικότερα, προτιμούνται τα έδρανα γωνιακής επαφής που έχουν μικρότερη επιφάνεια επαφής, δημιουργούν λιγότερη θερμότητα και επιτρέπουν την ανάπτυξη μεγαλύτερων ταχυτήτων. Από την άλλη, τα έδρανα με κυλινδρικά στοιχεία (μονής ή διπλής σειράς) έχουν γραμμική επαφή με τους δακτυλίους και αναπτύσσουν μεγαλύτερη τριβή, παρόλα αυτά μπορούν να φέρουν μεγαλύτερα ακτινικά φορτία προσφέροντας μεγαλύτερη στιβαρότητα. Όλοι οι προαναφερθέντες λόγοι είναι αυτοί που δικαιολογούν την ύπαρξη και των δύο αυτών τύπων εδράνων στον σχεδιασμό μιας ατράκτου εργαλειομηχανής.

2.6 Άξονας περιστροφής και προστατευτικό περίβλημα

Ο άξονας περιστροφής της ατράκτου πρέπει να είναι σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται προβλήματα λυγισμού και παραμορφώσεων λόγω των υψηλών ασκούμενων δυνάμεων κατά την κοπή. Πολύ σημαντική παράμετρος από σχεδιαστικής άποψης είναι και το περίβλημα (housing) της ατράκτου το οποίο κατά τη διαδικασία της κοπής μεταφέρει όλους του κραδασμούς και τις δυνάμεις στην υπόλοιπη κατασκευή της εργαλειομηχανής. Συνοψίζοντας, οι διαφορετικές παράμετροι σχεδιασμού μιας ατράκτου όπως το μέγεθος και ο τύπος των εδράνων πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά ανάλογα με την εργαλειομηχανή στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί η άτρακτος αλλά και τις προδιαγραφές ακρίβειας όσον αφορά την κοπή. Πιο αναλυτικά, το προστατευτικό περίβλημα της ατράκτου (housing) μπορεί να είναι είτε τετραγωνικού τύπου είτε κυλινδρικό. Η γεωμετρική του ακρίβεια είναι εξαιρετικά σημαντική τόσο για τη θέση των εδράνων όσο και για τον υπόλοιπο εξοπλισμό που περιέχει. Το πρότυπο που προδιαγράφει την κατασκευή και τον σχεδιάσμό τους είναι το ISO 1011. Από την άλλη, ο άξονας, του οποίου η βασική λειτουργία είναι να παραλαμβάνει

την ισχύ του κινητήρα και να την μεταφέρει στο σύστημα συγκράτησης του εργαλείου, στερεώνεται στα έδρανα κύλισης και έχει αυστηρές προδιαγραφές όσον αφορά την ευθυγράμμισή του, την παραλληλότητα, το φινίρισμά του κλπ. Σύμφωνα με τη θεωρία, ο άξονας, όπως κάθε συμπαγές μεταλλικό σώμα, έχει φυσικές ιδιοσυχνότητες. Αυτές οι ιδιοσυχνότητες μπορεί να διεγερθούν σε συγκεκριμένες ταχύτητες περιστροφής και να προκαλέσουν αστάθεια στο σύστημα.

2.7 Μετάδοση κίνησης

Η κίνηση προσδίδεται στον άξονα περιστροφής της ατράκτου από την περιστροφή ενός ηλεκτρικού σερβοκινητήρα. Η μετάδοση της κίνησης γίνεται με τρεις, κυρίως, τρόπους :

- Μετάδοση κίνησης με ιμάντα
- Μετάδοση κίνησης με χρήση γραναζιών
- Εγκατεστημένου ηλεκτροκινητήρα στον άξονα της ατράκτου

Οι συνηθέστερες περιπτώσεις είναι αυτές του ιμάντα και του εγκατεστημένου ηλεκτροκινητήρα όπου ο ρότορας και ο στάτορας είναι εντός της ατράκτου. Στη δεύτερη περίπτωση συνήθως η ισχύς και το εύρος στροφών είναι μεγαλύτερο ενώ στην πρώτη περίπτωση την συναντά κανείς στις περισσότερες εργαλειομηχανές.

2.8 Αστοχίες ατράκτων

Παρόλο που τα έδρανα αποτελούν πολύ κρίσιμο κομμάτι της λειτουργίας της ατράκτου, είναι σχεδόν αδύνατο να προβλεφθεί εξ αρχής η διάρκεια καλής λειτουργίας αυτών καθώς η αντοχή τους εξαρτάται άμεσα με το περιβάλλον λειτουργίας αλλά και το είδος των κοπών που πραγματοποιούνται στην εργαλειομηχανή. Για αυτόν τον λόγο κυρίως, οι προληπτικές μετρήσεις δονήσεων στα έδρανα κατά τη λειτουργία της ατράκτου είναι η κύρια μέθοδος πρόβλεψης της λειτουργικής τους κατάστασης. Στο βιομηχανικό τομέα θεωρούνται ως η βασική αιτία βλάβης των ατράκτων στο μηχανολογικό και όχι ηλεκτρικό πεδίο. Επίσης, σύμφωνα με τους Abele και Korff [14], η παρουσία ελαττώματος ή ζημιάς στα έδρανα κύλισης παρουσιάζεται σε πάνω από το 40% των ατράκτων με προβλήματα λειτουργίας ενώ σε δημοσίευση αεροδιαστημικού ενδιαφέροντος, ο de Castelbajac [15] αναφέρει ότι τα έδρανα οφείλονται για το 60% των βλαβών σε ατράκτους. Βασικές αιτίες αστοχίας ατράκτων είναι [14]:

- Η κακή ευθυγράμμιση
- Η αζυγοσταθμία
- Η φθορά των εδράνων κύλισης

- Η μηχανική χαλαρότητα
- Τα φθαρμένα γρανάζια
- Αστοχία υλικού

Οι παραπάνω αιτίες οδηγούν σε επακόλουθες συνέπειες όπως, [2]:

- Η αύξηση της θερμοκρασίας
- Η υποχώρηση των εδράνων στη μηχανή
- Η εμφάνιση έντονων επαναλαμβανόμενων ταλαντώσεων
- Η μείωση της ακρίβειας που μπορεί να προσφέρει η εργαλειομηχανή

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι πολλές από τις αιτίες αστοχίας των ατράκτων συνδέονται μεταξύ τους. Για παράδειγμα, η συναρμολόγηση με μηχανική χαλαρότητα μπορεί να οδηγήσει σε φθορά των ρουλεμάν. Οι παραπάνω λόγοι θα οδηγήσουν στην περαιτέρω έρευνα γύρω από τους μηχανισμούς βλάβης των εδράνων κύλισης.

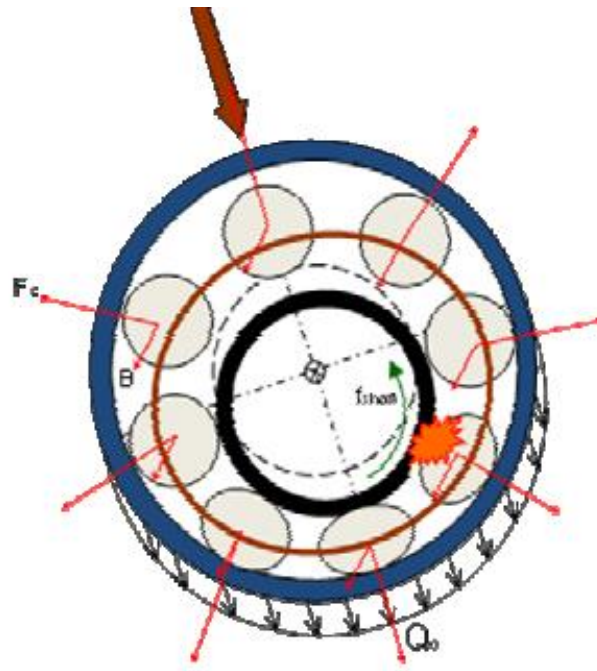
2.9 Μηχανισμοί βλάβης εδράνων κύλισης

Οι μηχανισμοί βλάβης των εδράνων διαχωρίζονται σε τρεις βασικές περιπτώσεις που παρουσιάζονται παρακάτω, [2]:

1. Φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο
2. Φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο
3. Φθορά στα στοιχεία κύλισης ρουλεμάν

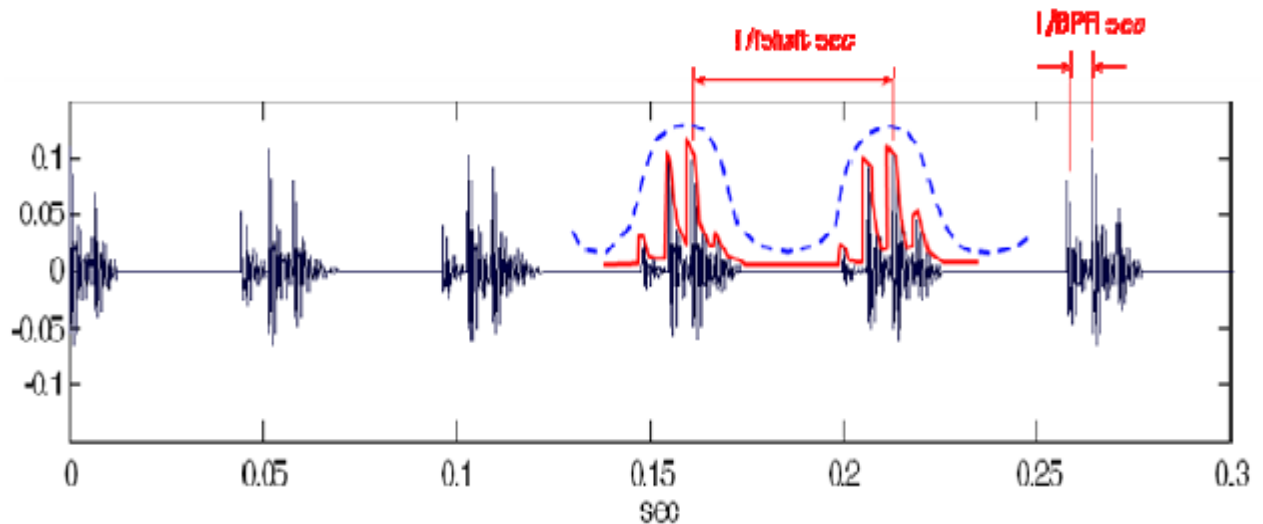
2.9.1 Φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο

Στην πρώτη περίπτωση, φθορά του εσωτερικού δακτυλίου του ρουλεμάν, η φθορά παρουσιάζεται περιοδικά, λόγω της περιστροφής του δακτυλίου με την ταχύτητα περιστροφής του άξονα, εντός και εκτός της ζώνης φόρτισης. Κάθε φορά που ο σφαιρικός ή ο κυλινδρικός τριβέας έρχεται σε επαφή με το ελάττωμα του εσωτερικού δακτυλίου, πραγματοποιείται μια κρούση που δημιουργεί έναν κρουστικό παλμό, ο οποίος αποσβένει καθώς μεταδίδεται στα υπόλοιπα στοιχεία της μηχανής αλλά επαναλαμβάνεται καθώς ο επόμενος τριβέας περνά πάνω από το ελάττωμα. Η περιοδικότητα με την οποία εμφανίζεται ο κρουστικός παλμός είναι ίση με την χαρακτηριστική συχνότητα BPFI (Ball Pass Frequency Inner) που διεγείρεται. Η φυσική σημασία της BPFI είναι ουσιαστικά ο αριθμός των τριβέων που περνούν από το σημείο του ελαττώματος σε μια πλήρη περιστροφή του άξονα.



Εικόνα 10 Φθορά εσωτερικού δακτυλίου [2]

Το μετρούμενο σήμα, είναι διπλά διαμορφωμένο κατά πλάτος. Η περιστροφή του δακτυλίου εντός και εκτός της ζώνης φόρτισης παράγει μια κυματομορφή αποσβαινόμενων κρουστικών παλμών διαφορετικής έντασης ανάλογα με τη θέση του ελαττώματος σε σχέση με την κατεύθυνση φόρτισης.



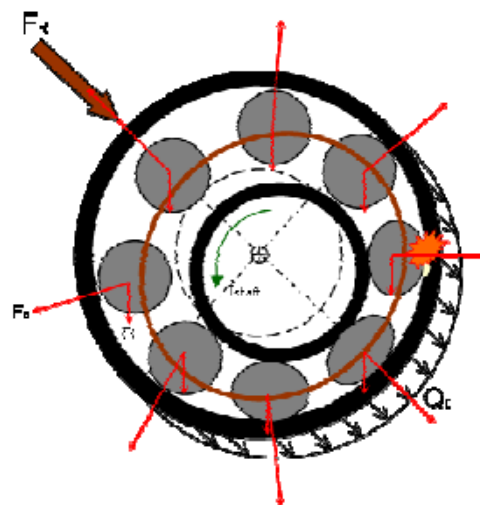
Διάγραμμα 3 Κυματομορφή επιταχύνσεων (φθορά εσωτερικού δακτυλίου) [2]

Όπως παρατηρείται από το ενδεικτικό σήμα της παραπάνω εικόνας κοντά στις αρμονικές της BPF1 συχνότητας εμφανίζονται πλευρικοί παλμοί που οφείλονται στο γεγονός ότι το πλάτος της συχνότητας BPF1 διαμορφώνεται από την f_{shaft} που είναι η συχνότητα περιστροφής του

άξονα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στη χαμηλόσυχη περιοχή κυριαρχεί η συχνότητα BRFI και έτσι είναι πιο ευδιάκριτος ο μηχανισμός βλάβης ενώ στην υψίσυχη περιοχή κυριαρχεί η ιδιοσυχνότητα του συστήματος που διεγείρεται αποδίδοντας μεγαλύτερο πλάτος στο k πλησιέστερο σε αυτή πολλαπλάσιο της BRFI.

2.9.2 Φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο

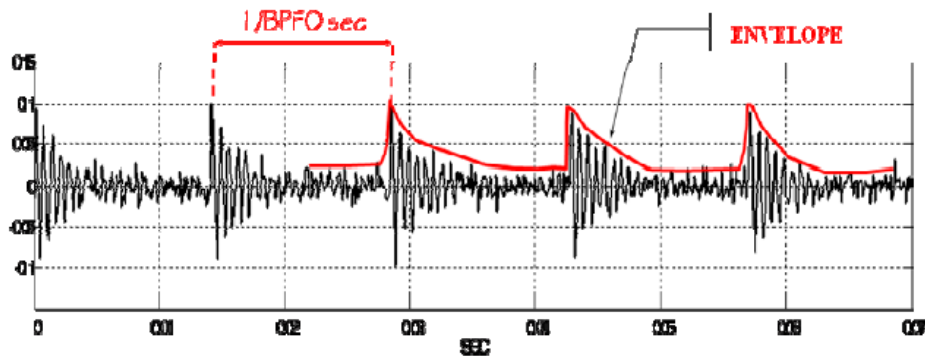
Στην δεύτερη περίπτωση, φθορά του εξωτερικού δακτυλίου του ρουλεμάν, ο εξωτερικός δακτύλιος δεν περιστρέφεται αλλά εφαρμόζει σταθερά στη «φωλιά» του ρουλεμάν και η φθορά προκαλείται εντός της ζώνης φόρτισης καθώς εκτός αυτής οι δυνάμεις που ασκούνται είναι συγκριτικά πολύ μικρότερες. Κάθε φορά που ένα στοιχείο κύλισης προσκρούει στη φθορά του δακτυλίου προκαλείται ένας κρουστικός παλμός που διεγείρει κάποια ιδιοσυχνότητα (είτε του εδράνου είτε της μηχανής). Όπως και στον προηγούμενο μηχανισμό βλάβης έτσι και σε αυτόν, ο κρουστικός παλμός αποσβαίνει καθώς μεταδίδεται μέσα στο σώμα της μηχανής. Κατά το αρχικό στάδιο της βλάβης οι παλμοί αυτοί είναι ιδιαίτερα σύντομοι αλλά έχουν μεγάλο εύρος συχνοτήτων, είναι ιδιαίτερα αιχμηροί.



Εικόνα 11 Φθορά εξωτερικού δακτυλίου [2]

Η περιστροφή του δακτυλίου εντός και εκτός της ζώνης φόρτισης παράγει μια κυματομορφή αποσβαινόμενων κρουστικών παλμών διαφορετικής έντασης ανάλογα με τη θέση του ελαττώματος σε σχέση με την κατεύθυνση φορτίσεως. Όσο η φθορά αναπτύσσεται και πλησιάζει μια κρίσιμη κατάσταση, η αιχμηρότητα των κρούσεων μειώνεται και αυξάνεται ο θόρυβος και το πλάτος των διακροτημάτων. Η κυματομορφή μιας τέτοιας φθοράς είναι διαμορφωμένη κατά πλάτος (μία φορά). Η περιοδικότητα των παλμών σχετίζεται με τη

συχνότητα με την οποία περνούν τα στοιχεία κύλισης από τη φθορά (1/BPFO - Ball Pass Frequency Outer). Ενώ ο κάθε κρουστικός παλμός περικλείει συχνότητες συσχετισμένες με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος f_n .

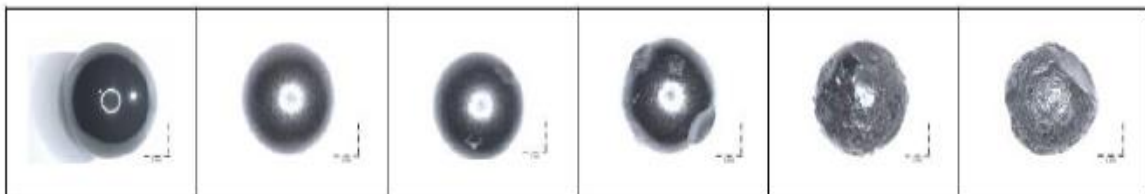


Διάγραμμα 4 Κυματομορφή επιταχύνσεων (φθορά εξωτερικού δακτυλίου) [2]

Όπως παρατηρείται από το ενδεικτικό σήμα της παραπάνω εικόνας, κοντά στις αρμονικές της BPFO συχνότητας αυτή τη φορά δεν εμφανίζονται πλευρικοί παλμοί που οφείλονται στην f_{shaft} που είναι η συχνότητα περιστροφή του άξονα, καθώς ο εξωτερικός δακτύλιος είναι σταθερός.

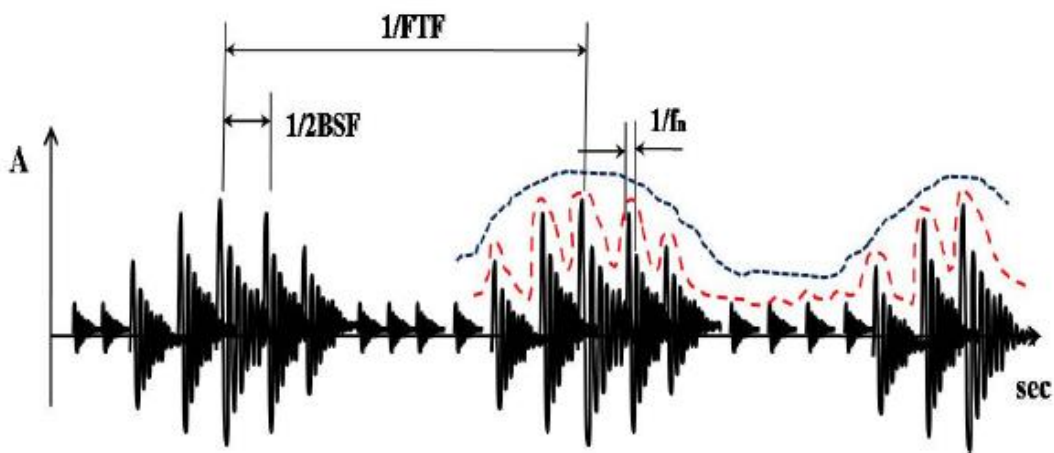
2.9.3 Φθορά στα στοιχεία κύλισης ρουλεμάν

Τα στοιχεία κύλισης ή τριβείς ολίσθησης συγκρατούνται από τον κλωβό και περιστρέφονται όλα μαζί με κοινή ταχύτητα. Μεταφέρονται συνεχώς κατά την περιστροφή, εντός και εκτός της ζώνης φόρτισης. Έτσι, οι κρούσεις ενός φθαρμένου στοιχείου, εντός και εκτός της ζώνης φόρτισης δεν μπορεί να είναι ίδιες. Βασικές αιτίες φθοράς είναι η παραπάνω φόρτιση από αυτήν που προδιαγράφει ο κατασκευαστής, η ελλειπής λίπανση και η αστοχία του υλικού κατασκευής.



Εικόνα 12 Φθορά στοιχείου κυλίσεως [2]

Ένα στοιχείο κύλισης περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του με συνέπεια εάν είναι φθαρμένο να κρούει και στον εξωτερικό και στον εσωτερικό δακτύλιο. Η συχνότητα με την οποία περιστρέφεται ένα στοιχείο κύλισης γύρω από τον άξονα του, σε μια πλήρη περιστροφή άξονα, είναι η BSF (Ball Spin Frequency). Ο κρουστικός παλμός εμφανίζει περιοδικότητα ίση με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος f_n , όπως και στην περίπτωση φθοράς στον εξωτερικό δακτύλιο. Η περίοδος κρούσης της φθοράς στους δακτυλίους είναι $1/(2*BSF)$ ενώ η ταχύτητα περιστροφής του κλωβού είναι η $1/FTF$ όπου FTF (Fundamental Train Frequency). Συνεπώς, η κυματομορφή που δημιουργείται είναι διαμορφωμένη δύο φορές κατά πλάτος, όπως στην περίπτωση σφάλματος στον εσωτερικό δακτύλιο.



Διάγραμμα 5 Κυματομορφή επιταχύνσεων (φθορά στοιχείου κυλίσεως) [2]

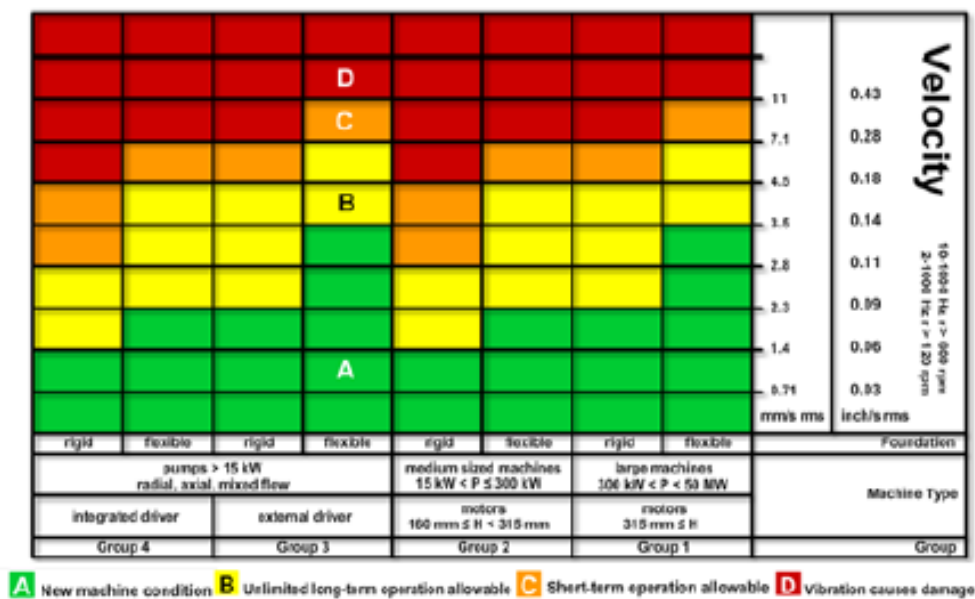
2.10 Αξιολόγηση της λειτουργικής κατάστασης ατράκτου εργαλειομηχανής και σχετικά πρότυπα

Έως σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές αξιολόγησης της κατάστασης μια στροφικής μηχανής, εξοπλισμένης με έδρανα κυλίσεως, βασισμένες στην ανάλυση των δονήσεων της. Οι διαφοροποιήσεις που συναντώνται από τη μία προσέγγιση στην άλλη είναι κυρίως όσον αφορά το ποιοι αισθητήρες θα χρησιμοποιηθούν, ποια μέθοδος ανάλυσης του σήματος ή των δεδομένων θα ακολουθηθεί κλπ. Οι μέθοδοι ανάλυσης μπορεί να είναι από πολύ απλές κατηγοριοποιώντας την κατάσταση της μηχανής βασιζόμενη μόνο στις RMS τιμές των δονήσεων, μέθοδοι που επιστρατεύουν και άλλα εργαλεία για τη δημιουργία χαρακτηριστικών του σημάτων όπως Fast Fourier Transform, Kyrtsosis, Crest Factor, Correlation function κ.α και αρκετά πιο σύνθετες μέθοδοι με τη χρήση κυματιδιακών μετασχηματισμών (Wavelets), Fuzzy logic, Deep neural network κλπ.

Η χρήση απλών τεχνικών ανάλυσης του σήματος μπορεί να οδηγήσει και σε απλούς τρόπους αξιολόγησης της κατάστασης. Η πρώτη προσέγγιση που συναντάται όσον αφορά τα όρια

καλής λειτουργίας μια μηχανής αξιολογώντας τα σήματα δονήσεων, είναι από τον Rathbone την δεκαετία του 1930, ο οποίος βασισμένος σε εμπειρικές γνώσεις ανέπτυξε κάποια όρια καλής λειτουργίας τα οποία συναντώνται ακόμα και σήμερα σε έρευνες. Ενώ ταυτόχρονα η ανάπτυξη πολλών διαφορετικών τεχνικών αξιολόγησης της κατάστασης μιας μηχανής οδηγεί σε περιπτώσεις όπου τα συμπεράσματα είναι αλληλοσυγκρουόμενα και δημιουργούν σύγχυση.

Παρά το γεγονός ότι η άτρακτος μια εργαλειομηχανής, είτε πρόκειται για τόρνο είτε για κέντρο κατεργασιών, αποτελεί το πιο κρίσιμο εξάρτημα, δεν έχει αναπτυχθεί μέχρι σήμερα ένα διεθνές πρότυπο το οποίο να δίνει σαφή απάντηση στο ποιό είναι το κρίσιμο όριο κραδασμών σε μια άτρακτο ώστε να αξιολογηθεί η κατάστασή της. Αυτό συμβαίνει λόγω της αδυναμίας στη σύγκλιση των απόψεων μεταξύ των μελών των επιτροπών του ISO [6]. Γενικότερα, για την περίπτωση των στροφικών μηχανών έχουν αναπτυχθεί δύο πρότυπα ISO, το 10816 και το 7919, τα οποία αποτελούν την εξέλιξη του ISO 2372 που αποσύρθηκε. Η διαφορά ανάμεσα στα δύο πρότυπα είναι ότι το πρώτο αναφέρεται σε στροφικές μηχανές με σταθερά μέρη ενώ το δεύτερο με όλα τα μέρη της μηχανής να υπόκεινται σε περιστροφή. Η παράμετρος κατηγοριοποίησης στα παραπάνω πρότυπα είναι η τιμή της ταχύτητας (mm/s RMS) και οι μηχανές χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:



Πίνακας 2 Πίνακας επικινδυνότητας σύμφωνα με ISO10816 [6]

Καθότι όμως υπάρχουν χώρες που η χρήση των εργαλειομηχανών είναι αρκετά διαδεδομένη λόγω βιομηχανίας, η ανάγκη ενός εξειδικευμένου προτύπου για τις άτρακτους, αναπτύχθηκε στη Σουηδία. Το όνομα του προτύπου είναι SS728000-1 και έχει τίτλο:

« Αξιολόγηση ατράκτων εργαλειομηχανών βάση μετρήσεων κραδασμών στο περίβλημα της ατράκτου, Μέρος 1: Άτρακτος με έδρανα κύλισης και εγκατεστημένο σύστημα οδήγησης με ταχύτητες 600rpm έως 30000rpm.»

Όπως και στο πρότυπο ISO 10816 έτσι και σε αυτό, αναπτύσσονται τέσσερις διαφορετικές ζώνες που υποδεικνύουν της κατάσταση της ατράκτου με τις μετρήσεις να παίρνονται με τους αισθητήρες επάνω στο περίβλημα της ατράκτου όσο πιο κοντά γίνεται στα έδρανα κύλισης. Μια διαφορά ανάμεσα στα δύο αυτά πρότυπα είναι ότι στο Σουηδικό πρότυπο τα δεδομένα κραδασμών συλλέγονται σε διαφορετικές ταχύτητες στο φάσμα των στροφών του κινητήρα. Επίσης, οι δύο νέοι παράμετροι που εισάγονται στην διαδικασία, αφορούν την μακροχρόνια και τη βραχυχρόνια κατάσταση της ατράκτου. Κατά το πρότυπο, στην πρώτη παράμετρο αντιπροσωπεύονται όλα τα προβλήματα που είναι διακριτά μεταξύ (10-5000Hz) και έχουν να κάνουν με κακή ζυγοστάθμιση, ευθυγράμμιση κλπ. Ενώ από την άλλη, στο βραχυχρόνιο έλεγχο αντιπροσωπεύονται οι δονήσεις εντός του υψίσυχνου φάσματος (2000-10000Hz) και για αυτό αποτυπώνει καλύτερα τα προβλήματα που έχουν σχέση με τα ρουλεμάν. Πρόβλεψη υπάρχει και για τις High speed μηχανές με εύρος ταχυτήτων από 6000rpm και άνω, όπου από τα δεδομένα κραδασμών που θα συλλεχθούν μπορεί να εξαιρεθεί του ελέγχου το 10 % καθώς υπάρχει πιθανότητα διέγερσης της ιδιοσυχνότητας του συναρμολογήματος.

		600< rpm ≤6 000	6 900< rpm ≤12 000	12 000< rpm ≤18 000	18 000< rpm ≤30 000
LTSC (mm/s RMS)	0,7	A			
	1,1	B			
	1,8	C			
	∞	D			
STSC (m/s ² RMS)	6	A	A	A	A
	10	B	A	A	A
	15	B	B	B	B
	20	C	B	B	B
	25	C	C	C	C
	30	D	C	C	C
	35	D	D	D	D
	40	D	D	D	D
	45	D	D	D	D
	50	D	D	D	D
∞	D	D	D	D	

Πίνακας 3 Πίνακας επικινδυνότητας σύμφωνα με το πρότυπο SS728000-1

Τέλος, δύο ακόμα πρότυπα του ISO που προσεγγίζουν το θέμα με μεγαλύτερη γενικότητα είναι το ISO 15242-3:2017, το οποίο καθορίζει τις μεθόδους μέτρησης των κραδασμών για ακτινωτά σφαιρικά ρουλεμάν διπλής σειράς και ακτινικά κωνικά ρουλεμάν μονής σειράς και διπλής σειράς, με κυλινδρική οπή και εξωτερική επιφάνεια και γωνία επαφής μέχρι και 45 °,

υπό καθορισμένες συνθήκες μέτρησης και το ISO 2041:2018 το οποίο ορίζει τους όρους και τις εκφράσεις στους τομείς των μηχανικών κραδασμών, των κραδασμών και της παρακολούθησης της λειτουργικής κατάστασης.

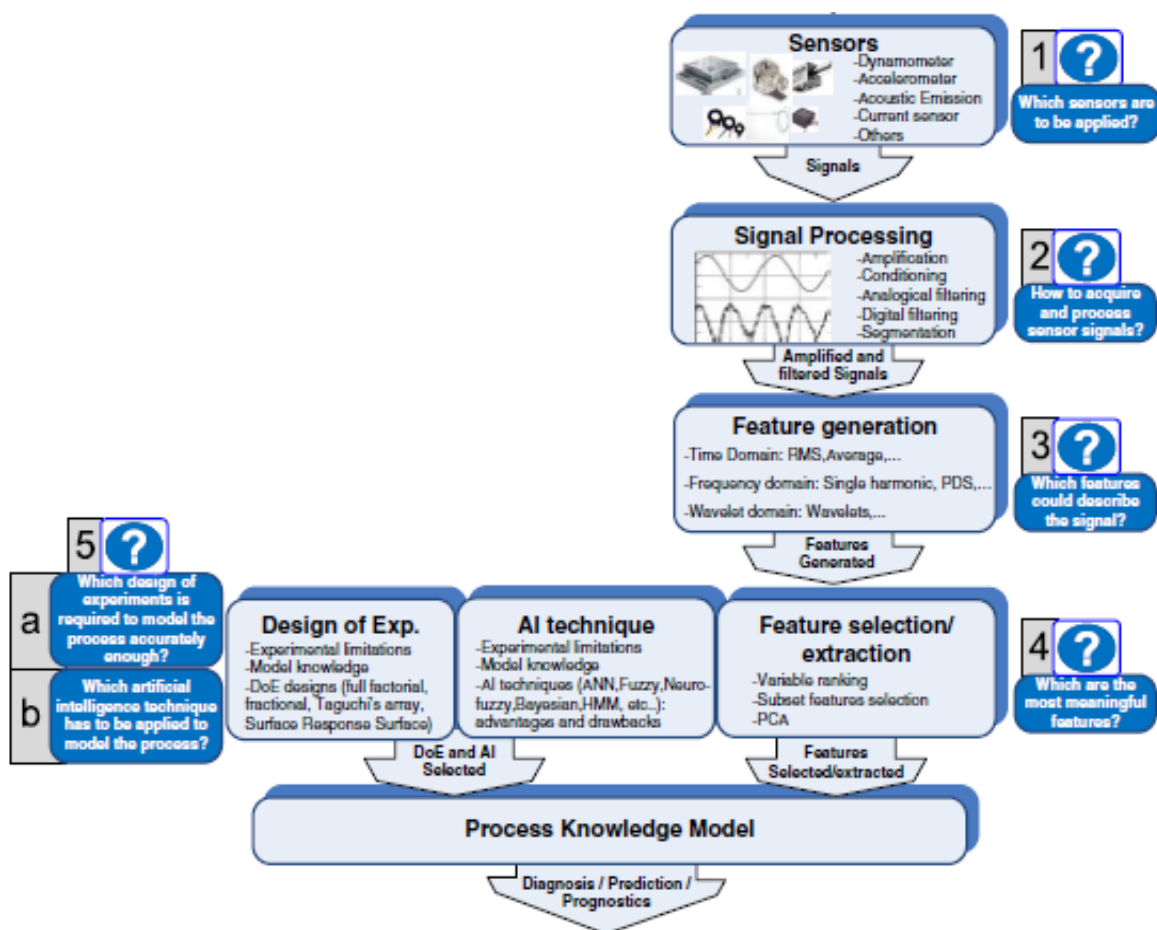
3 Προβλεπτική συντήρηση και μετρήσεις κραδασμών σε εργαλειομηχανές

Για να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή επίδραση από την παρακολούθηση των κραδασμών και επομένως να είναι οικονομικά αποδοτική, πρέπει να υπάρχει μια στρατηγική για τον τρόπο και τον τόπο διεξαγωγής της παρακολούθησης κραδασμών. Οι διαφορετικοί τύποι μηχανών θα πρέπει να μετρηθούν σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Όπως για παράδειγμα ότι οι μηχανές με αργή κίνηση (περιστροφική κίνηση με <6000rpm), πρέπει να μετρούνται μόνο μία φορά το μήνα. Η στρατηγική συνδέεται επίσης με τον ρυθμό με τον οποίο αναπτύσσεται η βλάβη καθώς και με το πόσο σοβαρό είναι το σφάλμα, εάν συμβεί. Για παράδειγμα, αν ο άξονας σπάσει, πέρα από το γεγονός ότι το προς κατεργασία τεμάχιο θεωρείται ακατάλληλο (fail), η εργαλειομηχανή χρήζει άμεσης επισκευής. Επομένως, τα πολύ γρήγορα μηχανήματα (>6000rpm) θα πρέπει να μετρούνται καθημερινά ή να διαθέτουν συνεχή (online) παρακολούθηση κραδασμών. Μόνο ο έλεγχος των κραδασμών των μηχανών που έχουν ήδη υποπτευθεί ότι έχουν αποτύχει τα στοιχεία τους, δεν μπορεί να θεωρηθεί ως εφικτή στρατηγική. Η παρακολούθηση των κραδασμών στοχεύει στην εύρεση προβλημάτων πριν αυτά οδηγήσουν σε παραγόμενα αποτυχημένα εξαρτήματα. Ωστόσο, πιο προηγμένες αναλύσεις κραδασμών θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για να βρισκεται η ακριβής αιτία του προβλήματος του μηχανήματος.

Οι μετρήσεις και ο τρόπος που εκλαμβάνονται και αναλύονται δεν είναι ίδιος για όλες τις μηχανές. Η άτρακτος μπορεί να λαμβάνει ισχύ από έναν ηλεκτροκινητήρα είτε άμεσα είτε έμμεσα (κιβώτιο ταχυτήτων ή ιμάντας), οπότε για καθεμία από τις περιπτώσεις αυτές τα επίπεδα κραδασμών δεν είναι ίδια. Τα σημεία που λαμβάνονται οι μετρήσεις, το φιλτράρισμα του σήματος, οι κρίσιμες συχνότητες στις οποίες εντοπίζονται τα σφάλματα, αλλάζουν από μηχανή σε μηχανή. Οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής είτε σε πολλά διαφορετικά επίπεδα. Παρόλα αυτά, δεν θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια ταχύτητα περιστροφής μεγαλύτερη από αυτήν που προδιαγράφει ο κατασκευαστής της μηχανής ως μέγιστη. Επιπρόσθετα, σε κάθε διαφορετική ταχύτητα περιστροφής θα πρέπει να υπάρχει μια αναμονή 10 δευτερολέπτων πριν γίνει η επόμενη αλλαγή στροφών ώστε η άτρακτος να βρίσκεται σε μία σταθεροποιημένη κατάσταση για τις μετρήσεις.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων μπορεί να γίνεται είτε θέτοντας κάποια αποδεκτά επίπεδα ταλαντώσεων τα οποία είναι αποτέλεσμα συμφωνίας με τον κατασκευαστή της μηχανής είτε μέσω αναλύσεων των σημάτων. Στην πρώτη περίπτωση, το Σουηδικό πρότυπο SS728000-1:2014, το οποίο ασχολείται με τις μετρήσεις κραδασμών σε

ατράκτους εργαλειομηχανών, αναφέρει ότι αυτές οι κρίσιμες τιμές αναφοράς μπορούν να τεθούν από 1,4 έως 2 φορές της τιμής που μετρείται ως μέσης ενώ μια γενική συμβουλή είναι ότι σημαντικό σφάλμα υποδηλώνεται όταν η τιμή φτάνει να είναι τριπλάσια της μέσης τιμής αναφοράς. Στη δεύτερη περίπτωση, το σήμα φιλτράρεται, αναλύεται στο φάσμα του χρόνου και το φάσμα της συχνότητας και εξάγονται χαρακτηριστικά τα οποία βοηθούν άμεσα ή έμμεσα να καταλάβουμε αν έχει εκδηλωθεί κάποιο σφάλμα. Τέλος, αποδεκτά επίπεδα ταλαντώσεων μπορούν να τεθούν και βάση εμπειρίας και προδιαγραφών των προς κατασκευής προϊόντων.



Εικόνα 13 Γενική μεθοδολογία ανάπτυξης συστήματος παρακολούθησης της κατάστασης μιας μηχανουργικής κατεργασίας [16]

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η γενική διαδικασία που ακολουθείται μπορεί να διαχωριστεί στα παρακάτω επιμέρους τμήματα [16]:

3.1 Αισθητήρες : Επιλογή και τοποθέτηση

Η επιλογή των αισθητήρων εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής, τη φυσική της πιθανής αστοχίας που εξετάζεται, τον υπάρχοντα μετρητικό εξοπλισμό και από το περιβάλλον που βρίσκεται ο εξοπλισμός. Ακόμα, στην επιλογή αυτή συντελούν και τα χαρακτηριστικά του κάθε αισθητήρα όπως το εύρος, η γραμμικότητα, η υστέρηση και η ευαισθησία. Οι συνηθέστεροι τύποι αισθητήρων είναι τα :

- επιταχυνσιόμετρα
- αισθητήρες ακουστικών κυμάτων
- δυναμόμετρα
- μετρητές έντασης ρεύματος
- αισθητήρες υπερήχων
- CCD κάμερες
- Αισθητήρες πίεσης
- Laser μετρητικά ακρίβειας
- Αισθητήρες εντοπισμού μεταλλικών αποπλυμάτων στα έλαια λίπανσης

Σημαντική επίσης παράμετρος που εξετάζεται στα πρώτα βήματα της μεθοδολογίας είναι το μέρος στο οποίο θα τοποθετηθούν οι αισθητήρες καθώς έχει μεγάλο αντίκτυπο στις μετρήσεις που θα πραγματοποιηθούν. Σε αυτό το στάδιο εκτός από τον τύπο των αισθητήρων επιλέγεται και υπόλοιπος εξοπλισμός που θα κάνει τη δειγματοληψία, τη συλλογή δεδομένων και τα ηλεκτρονικά που θα χρειαστούν για την ενίσχυση ή μετατροπή του μετρούμενου σήματος.

Ο πιο συνήθης τρόπος στον οποίο έμμεσα στηρίζεται και η παρούσα εργασία (καθώς τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από επιταχυνσιόμετρα άλλου ερευνητικού κέντρου) είναι η μέτρηση των κραδασμών η οποία γίνεται με την χρήση επιταχυνσιόμετρων ή κυψελών φορτίου. Τα επιταχυνσιόμετρα λόγω της ευκολίας τοποθέτησής τους, του μικρού μεγέθους, του χαμηλού κόστους αλλά και της υψηλής ανάλυσης που προσφέρουν, συναντώνται στο μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας και των εφαρμογών. Οι αισθητήρες αυτοί χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. Επιταχυνσιόμετρα τύπου AC
 - Charge mode
 - Voltage mode ή Integral Electronics PiezoElectric (IEPE)
2. Επιταχυνσιόμετρα τύπου DC
 - MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)

Τα επιταχυνσιόμετρα τύπου AC είτε πρόκειται για charge mode είτε voltage mode, παρέχουν ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων που μπορούν να καταγράψουν (συνήθως από 6 kHz και άνω) και αποτελούσαν την έως σήμερα δεδομένη επιλογή σε αισθητήρες προβλεπτικής συντήρησης. Παρόλα αυτά, διαθέτουν αρκετά μειονεκτήματα όπως ανάγκη για τροφοδοσία που σημαίνει επιπλέον συσκευές (Signal Conditioners ή τροφοδοτικά) και το ότι έχουν αναλογική έξοδο, η οποία απαιτεί την χρήση αναλογό-ψηφιακού μετατροπέα ώστε να μπορούν τα σήματα να είναι εύκολα επεξεργάσιμα με Η/Υ. Εκεί ακριβώς υπερτερούν τα επιταχυνσιόμετρα τύπου MEMS, τα οποία παρότι μέχρι πρότερος χρησιμοποιούνταν μόνο σε εφαρμογές που απαιτούσαν την αναγνώριση επιταχύνσεων μικρών συχνοτήτων, πλέον η τεχνολογία τους έχει αναπτυχθεί πολύ με αποτέλεσμα να έχουν εύρος συχνοτήτων μεγαλύτερο των 22kHz. Επίσης η έξοδός τους είναι DC και μπορούν να ενταχθούν σε μια ολοκληρωμένη κάρτα PCB, από την οποία θα τροφοδοτούνται και θα διευκολύνουν την υλοποίηση εφαρμογών για ασύρματη μετάδοση δεδομένων. Εκεί που χρειάζεται πρόσθετος σχεδιασμός από τον χρήστη είναι ο τρόπος που θα γίνει η στερέωση του ολοκληρωμένου αυτού συστήματος, ενώ τα επιταχυνσιόμετρα τύπου AC είναι τοποθετημένα ήδη σε μεταλλικό περίβλημα που μπορεί να κολληθεί ή να βιδωθεί επάνω στον προς εξέταση εξοπλισμό.

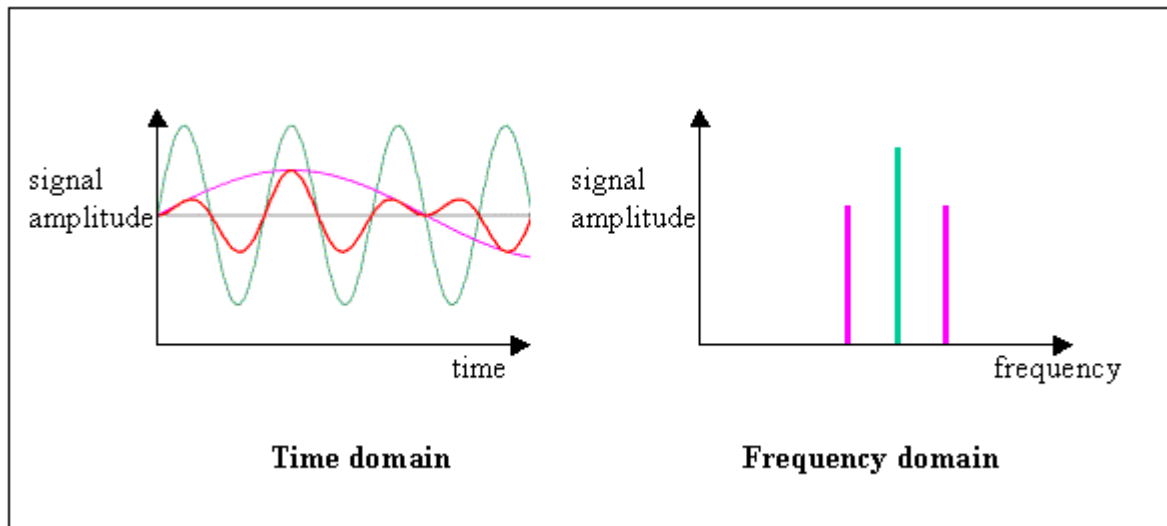
3.2 Επεξεργασία σήματος

Η επεξεργασία του σήματος που στέλνεται από τον αισθητήρα είναι το κομμάτι της μεθοδολογίας που μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα από μία φυσική ποσότητα σε χρήσιμη πληροφορία. Εδώ επιλέγονται τα φίλτρα από τα οποία θα περάσει το σήμα (ζωνοπερατά, υπεραπερατά, βαθυπερατά), η ανάλυση στο χρόνο και στο φάσμα της συχνότητας. Είναι η διαδικασία που θα αναλύσει ψηφιακά το σήμα και θα του δώσει την μορφή που χρειάζεται ώστε να εξαχθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Σε αυτό το κομμάτι της μεθοδολογίας συναντούμε τεχνικές επεξεργασίας όπως:

3.2.1 Μετασχηματισμός Fourier

Ο μετασχηματισμός Fourier αποσυνθέτει οποιαδήποτε συνάρτηση σε ένα άθροισμα ημιτονοειδών συναρτήσεων και κάθε μία από αυτές τις βασικές ημιτονοειδείς συναρτήσεις είναι μια σύνθετη εκθετική με διαφορετική συχνότητα [17]. Ο μετασχηματισμός Fourier μετασχηματίζει μια συνάρτηση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων. Αν η αρχική συνάρτηση έχει κάποια περιοδικότητα τότε ο μετασχηματισμός καταλήγει να είναι μια επέκταση της σειράς Fourier, στην οποία η σύνθετη περιοδική συνάρτηση προσεγγίζεται ως άθροισμα ημιτονοειδών/συνημιτονοειδών συνιστωσών. Αυτό γίνεται δυνατό αναλύοντας μέσω του θεωρήματος του Euler τη χρονοσειρά σε μιγαδικούς όρους. Ο μετασχηματισμός Fourier αρχικά εφαρμοζόταν στις έρευνες σε συνεχείς συναρτήσεις αλλά είναι εξίσου εφαρμόσιμος και αποδοτικός και σε δεδομένα δειγματοληψίας δονήσεων. Οι

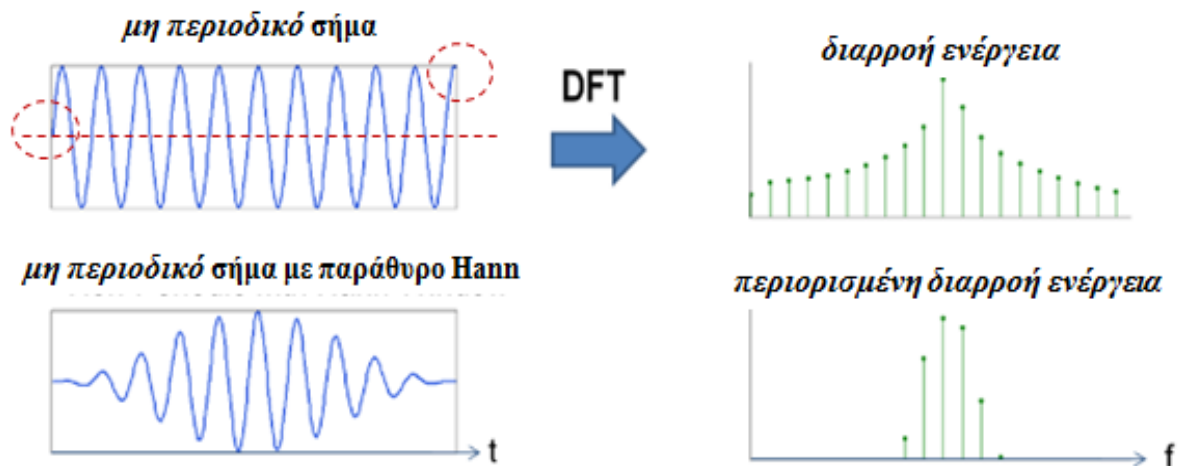
δύο πιο συνήθεις μέθοδοι που συναντώνται στη βιβλιογραφία για τον μετασχηματισμό Fourier είναι ο διακριτός μετασχηματισμός (Discrete Fourier Transform) και ο γρήγορος (Fast Fourier Transform). Συχνά οι δύο αυτές τεχνικές συγχάιονται, παρ'όλα αυτά διαφέρουν καθώς ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier είναι ένας δείκτης συσχέτισης μεταξύ μιας δεδομένης χρονοσειράς x_n και της «κυκλικής συνάρτησης» $e^{-i2\pi kn/N}$. Αντιθέτως, ο FFT διασπά το χρονικό σήμα σε μια σειρά από ημίτονα και αξιολογεί κάθε ένα ξεχωριστά.



Εικόνα 14 Απεικόνιση του μετασχηματισμού Fourier [18]

3.2.2 Χρονικά Παράθυρα

Η καταγραφή ενός σήματος χρονικής απόκρισης και στη συνέχεια η ανάλυσή του μέσω μετασχηματισμού Fourier εγκυμονεί τον κίνδυνο της διαρροής ενέργειας λόγω της μη περιοδικότητας του σήματος, το πλάτος του σήματος στην αρχή της καταγραφής είναι διαφορετικό από το πλάτος του κατά τη διακοπή της καταγραφής. Το χρονικό παράθυρο που εφαρμόζεται μηδενίζει το πλάτος του σήματος στην αρχή και στο τέλος της καταγραφής με αποτέλεσμα να μην υπάρχει διαρροή ενέργειας. Τα συνηθέστερα χρονικά παράθυρα που συναντά κανείς είναι το Hann, το Flat Top, το Exponential και το Hamming [17], όπου το καθένα από αυτά χρησιμοποιείται σε διαφορετικής μορφής χρονοσειρά.



Διάγραμμα 6 Χρονικά παράθυρα [2]

3.2.3 Κύρτωση

Η κύρτωση (βλ. Εξίσωση (1)) είναι η τέταρτη στατιστική ροπή του σήματος, η οποία περιγράφει την κατανομή των τιμών της χρονοσειράς γύρω από τη μέση τιμή του πλάτους της. Αποτελεί στατιστικό μέγεθος και είναι κατάλληλο ιδιαίτερα σε περιπτώσεις κρουστικών παλμών. Τέλος, η κύρτωση του σήματος είναι η στατιστική παράμετρος που ποσοτικοποιεί την «οξύτητα» της κατανομής στο σχήματος ως προς μια κανονική Gaussian κατανομή. Όπως έχει αποδειχθεί [19], η κύρτωση είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους ειδικότερα για την διάγνωση σφαλμάτων εσωτερικού και εξωτερικού δακτυλίου. Συγκεκριμένα, σε έρευνα σχετική με το σύνολο δεδομένων του Wavelet Based Multi Scale Principal Component Analysis (WMSPCA) παρατηρείται αύξηση στις τιμές της κύρτωσης όσο το φαινόμενο εξελίσσεται.

$$K = \frac{M_4}{\sigma^4} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) - \bar{x})^4}{\left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) - \bar{x})^2} \right)^4} \quad (1)$$

3.2.4 Μετασχηματισμός Hilbert

Ο μετασχηματισμός Hilbert (βλ. Εξίσωση (2)) συνελίσσει μια συνάρτηση του χρόνου με τον παράγοντα $1/\pi t$. Πρακτικά, δηλαδή προσθέτει φάση $\pi/2$ σε θετικές συχνότητες και αφαιρεί φάση $\pi/2$ από τις αρνητικές.

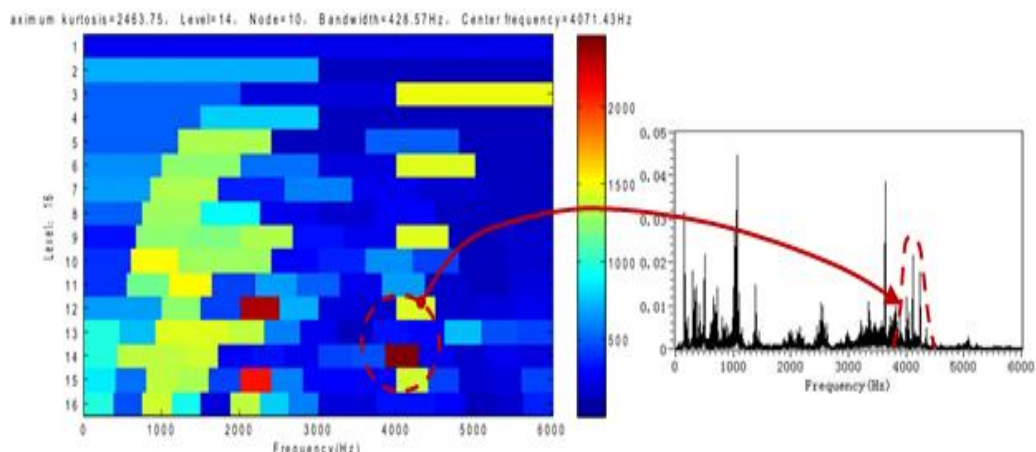
$$\mathcal{H}(u(t)) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\pi} \int_{|s-t| > \epsilon} \frac{u(s)}{t-s} ds \quad (2)$$

Ως μερική περίπτωση, η αποδιαμόρφωση με μετασχηματισμό Hilbert ουσιαστικά μετασχηματίζει τη χρονοσειρά από τον άξονα του χρόνου στους άξονες πραγματικών και μιγαδικών αριθμών με τον καθένα να αποτελεί έναν από τους δύο άξονες.

Η κύρια χρησιμότητα του μετασχηματισμού Hilbert έγκειται στον προσδιορισμό του στιγμιαίου πλάτος (κάθε διακριτή τιμή της περιβάλλουσας) και τη στιγμιαίας συχνότητας του σήματος.

3.2.5 Κυρτόγραμμα

Δίνει την οπτική απεικόνιση της κύρτωσης για ένα εύρος μεγεθών παραθύρων και συχνοτήτων. Ένα υψηλό επίπεδο κύρτωσης ανταποκρίνεται σε ένα υψηλό επίπεδο μη-σταθερής συμπεριφοράς.



Εικόνα 15 Κυρτόγραμμα [2]

3.2.6 Ολικό πλάτος

Το ολικό πλάτος του σήματος (Overall Amplitude) περιγράφει τις το σύνολο της ενέργειας των κραδασμών σε ένα φάσμα συχνοτήτων. Σύμφωνα με τον Werner [5], το ολικό πλάτος είναι ο πιο απλός αλλά αποδοτικός τρόπος παρακολούθησης στις μετρήσεις δονήσεων και

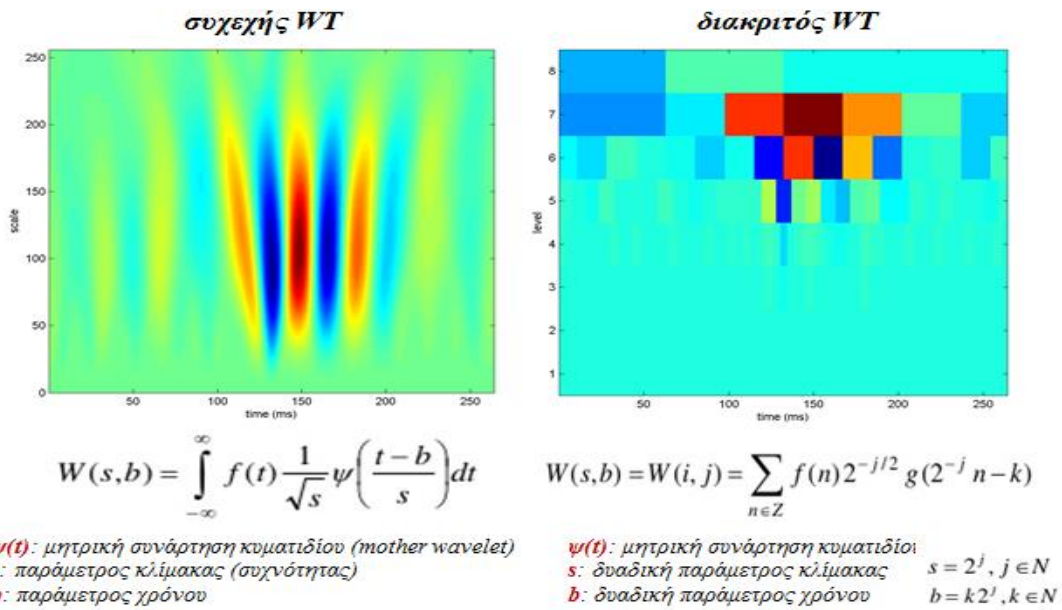
κραδασμών . Η σύγκριση των τιμών αυτών σε σχέση με μια μέση τιμή υποδουκνύει την υγεία της μηχανής.

3.2.7 Μετασχηματισμός Κυματιδίων

Ο μετασχηματισμός κυματιδίων διαχωρίζεται σε συνεχή και διακριτή ανάλυση. Η ανάλυση κυματιδίων αποτελεί μια τεχνική παραθύρωσης με μεταβλητού μεγέθους περιοχές. Επιτρέπει τη χρήση μεγάλης διάρκειας διαστημάτων όπου θέλουμε μεγαλύτερης ακρίβειας πληροφορία χαμηλής συχνότητας, και συντομότερες περιοχές όπου θέλουμε πληροφορία υψηλής συχνότητας. Η ανάλυση κυματιδίων είναι ικανή να αποκαλύψει πτυχές των δεδομένων που καμία άλλη ανάλυση δεν μπορεί, όπως σημεία κατάρρευσης, ασυνέχειες σε υψηλότερα παράγωγα και αυτοσυσχέτιση. Ακόμα, επειδή παρέχει μία διαφορετική εικόνα για τα δεδομένα από αυτές που παρουσιάζονται από παραδοσιακές τεχνικές, η ανάλυση κυματιδίων μπορεί συχνά να συμπιέσει ή να απομακρύνει το θόρυβο από ένα σήμα χωρίς ιδιαίτερη υποβάθμιση,[1]. Ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίων (Continuous Wavelet Transformation - CWT) ορίζεται ως το άθροισμα, καθ' όλο το χρόνο, του σήματος πολλαπλασιασμένο με μετατοπισμένες, κλιμακωμένες εκδόσεις της συνάρτησης κυματιδίων «Ψ», (βλ. Εξίσωση (3)).

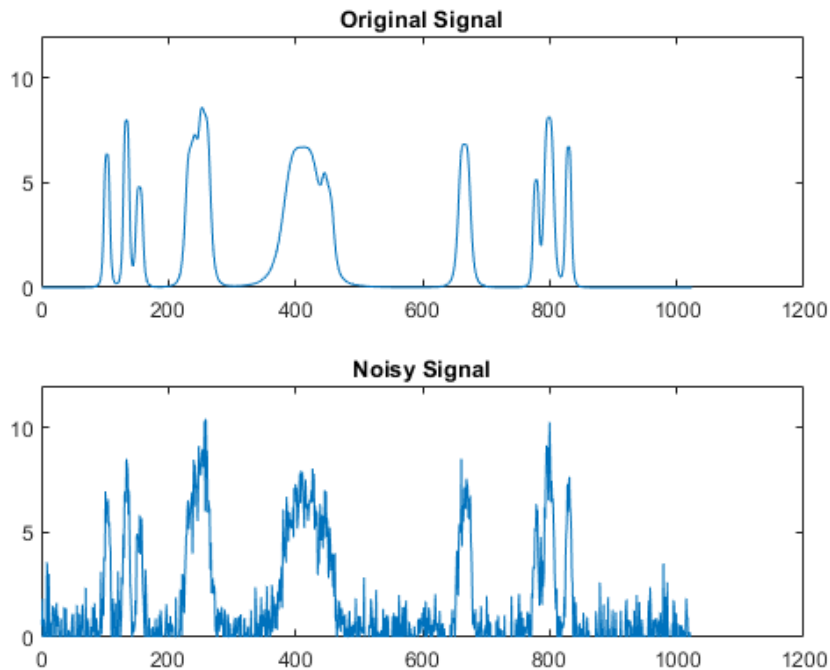
$$W_{\psi} f = S(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (3)$$

Αποδεικνύεται, ότι εάν επιλεγούν κλίμακες και θέσεις βασισμένες σε δυνάμεις του 2 (δυναμικές όπως ονομάζονται), η ανάλυση θα είναι πολύ πιο αποδοτική και το ίδιο ακριβής. Αυτή η ανάλυση παρέχεται από το Διακριτό Μετασχηματισμό Κυματιδίων (Discrete Wavelet Transformation - DWT). Στην περίπτωση του DWT η μαθηματική έκφραση που περιγράφει το κυματίδιο είναι συνάρτηση του συντελεστή ολίσθησης στο χρόνο και του συντελεστή κλίμακας. Εάν το σήμα περιλαμβάνει μια συνιστώσα που αντιστοιχεί στον συντελεστή κλίμακας, το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού σε αυτή τη συγκεκριμένη θέση λαμβάνει μεγάλη τιμή.



Εικόνα 16 Διαγραμματική απεικόνιση κυματιδιακού μετασχηματισμού [2]

Η ανάλυση κυματιδίων εκτός από τον εντοπισμό συχνοτήτων εντός του σήματός, επιτρέπει και την αποθρομβοποίησή του. Αυτή επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό κυματιδίων στο σήμα που περιλαμβάνει θόρυβο, εντοπίζοντας τα κυματίδια που περιγράφουν το θόρυβο και τέλος, εκτελώντας αντίστροφο μετασχηματισμό για την απόρριψή τους.



+

Διάγραμμα 7 Αποθρομβοποίηση σήματος [20]

3.2.8 Φασματική πυκνότητα ισχύος

Η φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος εκφράζει την κατανομή της ενέργειας που περικλύεται στο φάσμα του σήματος ανα μονάδα χρόνου δεδομένου ότι η συνολική ενέργεια ενός τέτοιου σήματος καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου θα ήταν γενικά άπειρη. Η άθροιση ή η ολοκλήρωση των φασματικών συνιστωσών αποδίδει τη συνολική ισχύ (για μια φυσική διαδικασία) ή τη διακύμανση (σε μια στατιστική διαδικασία), ταυτόσημη με εκείνη που θα επιτευχθεί με την ολοκλήρωση στο πεδίο του χρόνου, όπως υπαγορεύεται από το θεώρημα του Parseval.

3.3 Επιλογή και δημιουργία χαρακτηριστικών

Τα χαρακτηριστικά είναι εκείνες οι τιμές που μπορούν να αποδώσουν έμμεσα την πληροφορία που μεταφέρει το σήμα του αισθητήρα. Η σωστή επιλογή αυτών, είναι τελικά αυτό που θα σηματοδοτήσει την επιτυχία της διαδικασίας καθώς ακόμα και με τα καλύτερα καταγραφικά συστήματα, εάν η επιλογή των χαρακτηριστικών που αναλύονται είναι άστοχη τότε η διαγνωστική διαδικασία δεν πρόκειται να πετύχει. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι στατιστικές, ή μη, ποσότητες που συλλέγονται σαν αποτελέσματα της επεξεργασίας σήματος στα διάφορα στάδιά της. Προκειμένου να αναπτυχθεί ένα αξιόπιστο και εύρωστο μοντέλο διάκρισης της λειτουργικής κατάστασης, χρειάζεται να παίρνει σαν είσοδο ουσιώδη χαρακτηριστικά του σήματος. Από την ανάλυση του σήματος στο χρόνο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν χαρακτηριστικά το ολικό πλάτος της επιτάχυνσης (OA), η μέση τετραγωνική τιμή (RMS) του σήματος, η οποία έχει μεγάλη καταλληλότητα για κρουστικούς παλμούς, η κύρτωση, ο δείκτης κορυφής (Crest factor), όπου και αυτός ενδείκνυται για κρουστικούς παλμούς και ο δείκτης λοξότητας (skewness factor), ο οποίος αποτελεί την 3^η στατιστική ροπή του σήματος και περιγράφει τη συμμετρία γύρω από τη μέση τιμή. Ακόμα, από τη χρονοσειρά μπορούν να υπολογιστούν ο δείκτης διάκενου (Clearance factor), ο δείκτης μορφής (Shape factor) και ο δείκτης παλμών (Impulse factor). Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις η ανάλυση του σήματος στον άξονα του χρόνου δεν επαρκεί και έτσι πραγματοποιείται και ανάλυση στο φάσμα της συχνότητας ώστε να εξαχθούν περαιτέρω χαρακτηριστικά. Συνήθως από τη ανάλυση στο φάσμα της συχνότητας παίρνουμε την RMS τιμή της επιτάχυνσης και τις ακραίες τιμές (peak values) σε κρίσιμες συχνοτικές περιοχές ενδιαφέροντος. Τέλος, συχνά συναντάται ως χαρακτηριστικό και η ισχύς της ενέργειας που περικλείεται στο σήμα (Power Spectral Density - PSD).

3.4 Λογισμικό αυτοματοποιημένης διάγνωσης βλαβών

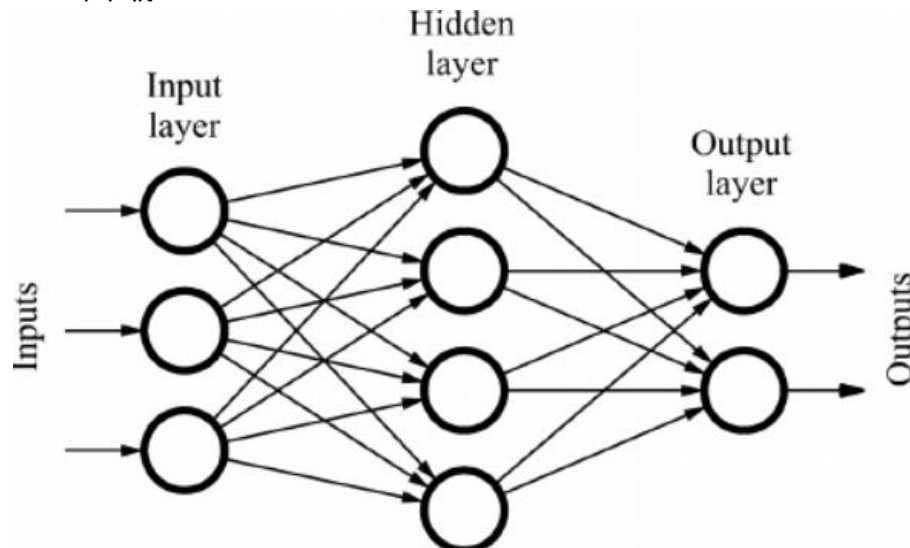
Σε αυτό το βήμα συναντάται μια πληθώρα τεχνικών που επιστρατεύονται για να προκύψει το τελικό αποτέλεσμα της διάγνωσης. Πολλά λογισμικά υπάρχουν έτοιμα στο εμπόριο, τα οποία αναφέρονται σε διαγνωστική συγκεκριμένων μηχανισμών και διενεργούν συγκριτικό έλεγχο των χαρακτηριστικών (συνήθως της RMS τιμής του σήματος επιτάχυνσης). Σε ερευνητικό επίπεδο, η μεθοδολογία που συχνά ακολουθείται είναι ο περιορισμός των χαρακτηριστικών με τεχνικές όπως η Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (Principal Component Analysis -PCA) ή η Compensation Distance Evaluation Technique (CDET). Μέσα από αυτές τις διαδικασίες μαθηματικής ανάλυσης επιλέγονται τα καταλληλότερα χαρακτηριστικά που θα βοηθήσουν στην τελική διάγνωση, ενώ απορρίπτονται όσα δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στη συνέχεια, τα χαρακτηριστικά που τελικά επιλέγονται εισάγονται σε αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης, μηχανικής μάθησης, ευφυούς ελέγχου ή ακόμα και συνδυαστικών συστημάτων των προηγούμενων ώστε να εξαχθεί σαν αποτέλεσμα η τελική απόφαση, εάν δηλαδή υπάρχει βλάβη και ποιά είναι αυτή. Εδώ η βιβλιογραφία είναι αρκετά πλούσια με πολλά διαφορετικά επιστημονικά πεδία να έχουν δείξει ενδιαφέρον για αυτούς τους αλγόριθμους και η εξέλιξή τους να είναι ραγδαία.

Ιδιαίτερα στη μηχανική μάθηση οι μέθοδοι διαχωρίζονται σε επιτηρούμενες και μη-επιτηρούμενες, όπου στην πρώτη κατηγορία συναντάται η μέθοδος μηχανών διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machines-SVM), τα Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks - NN), τα κρυφά μοντέλα Markov (Hidden Markov Models - HMM) και τα Γκαουσιανά μοντέλα ανάμιξης (Gaussian Mixture Models - GMM). Στα μη-επιτηρούμενα μοντέλα έχουμε τις μεθόδους K-means, ιεραρχικής ομαδοποίησης (Hierarchical Clustering) και Blind Source Separation (BSS). Ενδεικτικά δύο από αυτές περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

3.4.1 Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks – NN)

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ΤΝΔ) είναι από τις παλαιότερες μεθόδους μηχανικής μάθησης και εφαρμόζεται για τη διάγνωση σφαλμάτων και άλλων εφαρμογών για πάνω από 30 χρόνια [21]. Στις αρχικές της χρήσεις όσον αφορά την διαγνωστική βλαβών, η μέθοδος αυτή κλήθηκε να εντοπίσει τη φθορά του εδράνου ενός κινητήρα η οποία εντοπίζεται χάρη στον συντελεστή απόσβεσης «β» που μπορεί να συναχθεί από μία μη γραμμική χαρτογράφηση της έντασης ρεύματος του στάτορα και της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα [21]. Ως προς τη διαδικασία, για τα νευρωνικά δίκτυα, τα οποία αποτελούν έμπνευση του ανθρώπινου νευρικού συστήματος, το προς επεξεργασία σήμα είναι μια ακολουθία αριθμών και η έξοδος κάθε νευρώνα υπολογίζεται βάση μιας μη-γραμμικής συνάρτησης από το σύνολο των εισόδων. Οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων ονομάζονται συνάψεις. Κάθε νευρώνας και κάθε σύναψη τυπικά έχουν ένα ειδικό βάρος το οποίο μεταβάλλεται καθώς το δίκτυο εκπαιδεύεται. Οι νευρώνες συνήθως διαχωρίζονται σε επίπεδα (layers) με το σήμα να ταξιδεύει από το πρώτο επίπεδο έως το τελευταίο και με τον αλγόριθμο εκπαίδευσης να

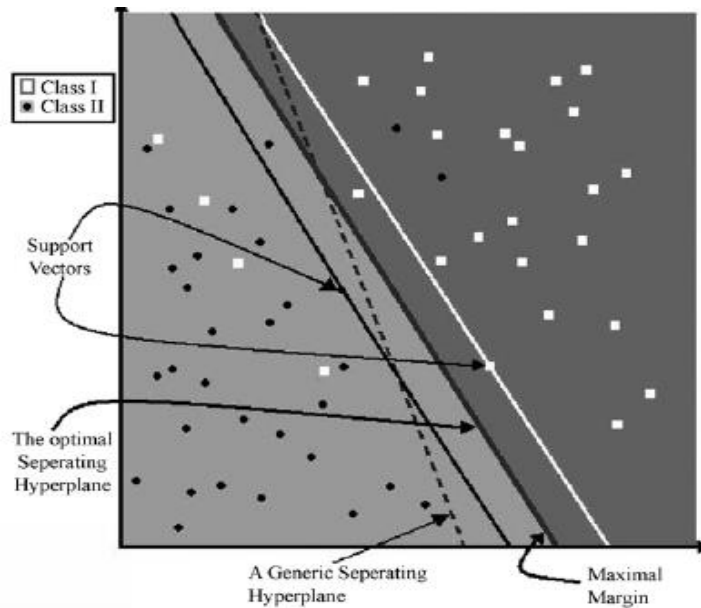
προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα ανάμεσα στην απόκριση του ΤΝΔ και στις τιμές στόχους. Στα πλαίσια της επιτηρούμενης μάθησης τα ΤΝΔ εκπαιδεύονται από γνωστά συμβάντα και μετά την ολοκλήρωση της εκπαίδευσής τους χρησιμοποιούνται για να επιλύσουν τα άγνωστα. Στις εφαρμογές που συναντώνται κάνουν διαχωρισμό (classification), συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τις εισόδους (regression) και αναγνώριση μοτίβου (pattern recognition), μια διαδικασία που συναντούμε συχνά σε εφαρμογές όπως η αναγνώριση εικόνας ή ήχου.



Εικόνα 17 Νευρωνικό δίκτυο [8]

3.4.2 Μηχανές Διανυσμάτων Υποστήριξης (Support Vector Machines – SVM)

Στη μέθοδο Μηχανών Διανυσμάτων Υποστήριξης (SVM), η οποία είναι καθαρά επιτηρούμενης μάθησης, το μοντέλο αναλύει τα δεδομένα και καλείται να βρει το υπερεπίπεδο εκείνο το οποίο διαχωρίζει σωστά τα σημεία των δεδομένων εισόδου σε έναν χώρο N -διαστάσεων, όπου N ο αριθμός των χαρακτηριστικών του σήματος. Στον αλγόριθμο αυτό ζητούμενο είναι η αύξηση του κέρδους της συνάρτησης κόστους η οποία περιγράφει την απόσταση του κάθε σημείου-δεδομένου με το υπερεπίπεδο. Όσον αφορά τα έδρανα κύλισης κλασική εργασία αποτελεί η [22], στην οποία τα αποτελέσματα που μας δίνει η SVM είναι καλύτερα από κάθε άλλη μέθοδο μηχανικής μάθησης.



Εικόνα 18 Μηχανές Διανυσμάτων Υποστήριξης [8]

Όπως βλέπουμε στην εργασία του Konar & Chattopadhyay [8], μια από τις καλύτερες μεθόδους διαχωρισμού βάση της λειτουργικής κατάστασης είναι η SVM, όπου τα αποτελέσματα (100% efficiency) που επιτυγχάνονται είναι, σε όλες τις περιπτώσεις φορτίου, εξαιρετικά για αυτή την μέθοδο σε σύγκριση με τα ΤΝΔ που χρησιμοποιούνται σαν μέτρο σύγκρισης. Βέβαια, τα αποτελέσματα της εργασίας συνδέονται σε μεγάλο βαθμό με τα επίπεδα μετασχηματισμού κυματιδίων του σήματος που έχει προηγηθεί. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι προκειμένου να υπάρξει μια βελτιστοποίηση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται ($cost$, $gamma$) είναι χρήσιμη η διαγραμματική απεικόνιση και αυτή είναι εφικτή μόνο αν χρησιμοποιούνται 2 μέχρι 3 διαστάσεις ή ισοδύναμα 2-3 χαρακτηριστικά. Μια διαφορετική προσέγγιση των Zhang et al [23], χρησιμοποιεί ΤΝΔ με βαθεία μάθηση (Deep learning) πάνω στο ίδιο σύνολο δεδομένων που χρησιμοποιεί και η παρούσα εργασία (σύνολο δεδομένων IMS). Τα αποτελέσματα είναι επίσης πολύ καλά με τον ταξινομητή να πετυχαίνει συνολικά αποτελέσματα με ακρίβεια μεγαλύτερη του 90% χωρίς να χρειαστεί να εξάγει κάποιο χαρακτηριστικό αλλά χρησιμοποιώντας το σήμα που εξαγόταν από τον αισθητήρα σαν είσοδο στον ταξινομητή. Συγκεκριμένα, στα δείγματα που παρουσιάζουν σφάλμα εξωτερικού δακτυλίου η ακρίβεια του αλγορίθμου είναι 100% ενώ στην περίπτωση του σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου η ακρίβεια ήταν 94.9%. Σύμφωνα με την ίδια εργασία, η χρονική συνοχή ανάμεσα στα δείγματα είναι βασική παράμετρος για την επιτυχία ενός τέτοιου αλγορίθμου. Άλλες μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί στο σύνολο δεδομένων του IMS όπως η Random Forest [24] και η στατιστική τοπικά γραμμική ενσωμάτωση με SVM [25], επιτυγχάνουν επίσης καλά αποτελέσματα όπως φαίνεται στον παρακάτω συγκριτικό πίνακα .

Methods	Accuracies
Genetic Algorithm + Random Forest	97.81%
8 Chi Square Features + Random Forest	93.33%
8 Chi Square Features + SVM	100%
7 Chi Square Features + SVM	92%
8 Chi Square Features + Multilayer Perceptron	97.33%
Continuous Wavelet Transform + SVM	100%
Discrete Wavelet Transform (mother wavelet: morlet) + ANN	96.67%
Discrete Wavelet Transform (mother wavelet: daubechies10) + ANN	93.33%
Statistical Locally Linear Embedding + SVM	94.07%
DNN considering temporal coherence	100%

Πίνακας 4 Συγκριτικός πίνακας μεθόδων ταξινόμησης για το σύνολο δεδομένων του IMS [24]

3.4.3 Προκλήσεις που δημιουργούνται με τη χρήση κλασσικής μηχανικής μάθησης

Όπως παρουσιάστηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια για τον εντοπισμό σφάλματος σε έδρανα κύλισης χρησιμοποιούνται οι χαρακτηριστικές συχνότητες σφάλματος των εδράνων που υπολογίζονται βάση της γεωμετρίας και της ταχύτητας περιστροφής. Βάση αυτών των χαρακτηριστικών συχνοτήτων υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά και τα πλάτη της ενέργειας σε αυτές τις συχνοτικές περιοχές και χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση μοντέλων μηχανικής μάθησης ώστε να εντοπίζουν τις ανωμαλίες. Παρόλα αυτά όλες αυτές οι μέθοδοι παρουσιάζουν κάποιες αδυναμίες, όπως οι παρακάτω [26]:

- Φαινόμενο της ολίσθησης: οι συχνότητες σφάλματος υπολογίζονται παίρνοντας σαν δεδομένο ότι δεν υπάρχει ολίσθηση κατά την περιστροφή των ένσφαιρων τριβέων εντος του εδράνου, κάτι που στην πραγματικότητα δεν συμβαίνει με αποτέλεσμα οι συχνότητες αυτές να έχουν ένα ποσοστό ολίσθησης 5-10%. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα της χρήσης αυτών των συχνοτήτων και των χαρακτηριστικών τους στην μηχανική μάθηση.
- Συχνότητα αλληλεπίδρασης: Αναφέρεται στην περίπτωση όπου διαφορετικά σφάλματα συμβαίνουν ταυτόχρονα και αλληλεπιδρούν με αποτέλεσμα οι ιδιοσυχνότητες που θα έπρεπε να εμφανιστούν στο σήμα είτε να έχουν διπλασιασμένο πλάτος είτε πολύ μειωμένο από το κανονικό.
- Εξωτερικές δονήσεις: Η χαλαρή συναρμολόγηση του ρουλεμάν ή οι κραδασμοί της μηχανής παράγουν δονήσεις που καταγράφονται αλλοιώνοντας σημαντικά τη δυναμική των χαρακτηριστικών.
- Παρατηρησιμότητα: Μερικά σφάλματα των εδράνων όπως αυτά της ελλειπούς λίπανσης δεν εμφανίζουν καμία χαρακτηριστική συχνότητα στο σήμα με αποτέλεσμα να μην είναι αντιληπτές από τέτοιες μεθόδους.

- Ευαισθησία: Αναφέρεται στην ευαισθησία της δυναμικής των χαρακτηριστικών σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας (ταχύτητα περιστροφής κλπ.)

3.5 Περιγραφή συστημάτων συλλογής δεδομένων (DAQs)

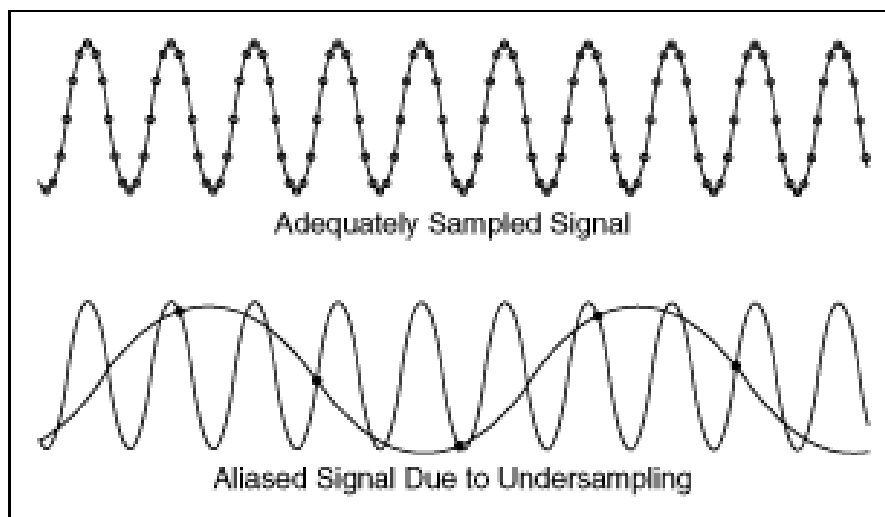
Για την παρακολούθηση της κατάστασης μιας οποιασδήποτε μηχανολογικής διάταξης μέσω αισθητήρων, σημαντική παράμετρος στην καταγραφή των δεδομένων είναι τα συστήματα συλλογής των δεδομένων, γνωστά ως Data Acquisition Systems (DAQs). Τα συστήματα καταγραφής δεδομένων έχουν εξελιχθεί από απλοί ηλεκτρομηχανικοί καταγραφείς που περιέχουν από ένα έως τέσσερα κανάλια σε σύνθετες καθαρά ηλεκτρονικές διατάξεις ικανές να μετρήσουν και να αναλύσουν εκατοντάδες μεταβλητές ταυτόχρονα. Στις σύγχρονες επιστήμες και στη μηχανική η απόκτηση και καταγραφή των δεδομένων είναι ένα θεμελιώδες και ισχυρό εργαλείο. Η εγκαθίδρυση των συστημάτων αισθητήρα-επενεργητή σε όλες τις σύγχρονες εφαρμογές προϋποθέτει την πλήρη και σωστή καταγραφή των παραμέτρων που ενδιαφέρουν στην κάθε περίπτωση, όπως η καταγραφή χρονοσειρών για μεγέθη όπως η μετατόπιση, η ταχύτητα, οι επιταχύνσεις/κραδασμοί κλπ.

Στην αγορά σήμερα υπάρχουν πολλά έτοιμα συστήματα συλλογής δεδομένων με μεγάλο εύρος τιμών. Χαρακτηριστικά ένα τέτοιο σύστημα με 8 κανάλια καταγραφής 12bit ανάλυση και δυνατότητα δειγματοληψίας 10kS/s ξεκινάει από την τιμή των 100 EUR ενώ ένα σύστημα με 8 κανάλια, 2MS/s και 16 bit ανάλυση αγγίζει τα 6000 EUR [27]. Τα συστήματα αυτά παρεμβάλλονται μεταξύ του σήματος που εξάγει ο αισθητήρας και του ηλεκτρονικού υπολογιστή (parallel, serial, USB, etc.) ή καρτών αποθηκευτικής μνήμης. Διαθέτουν συνήθως πολυπλέκτες, αναλογο-ψηφιακούς μετατροπείς (Analog to Digital Converters – ADC) και το αντίθετο, μνήμη RAM, γρήγορους χρονιστές και άλλα. Όλα τα προαναφερθέντα λειτουργικά μέρη είναι προσβάσιμα μέσω κλάδου επικοινωνίας bus του μικροελεγκτή. Ο μικροελεγκτής είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της καταγραφής (ξεκίνημα – σταμάτημα), το ξεκίνημα του ADC, τη μετακίνηση των δεδομένων στη μνήμη, την εναλλαγή του πολυπλέκτη, τον χειρισμό της τρανζιστορ σε τρανζιστορ λογικής (TTL I/O) και άλλα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, αυτό που ενδιαφέρει περισσότερο είναι η μετατροπή του σήματος και κατά πόσο αυτό επηρεάζει το στόχο της μέτρησης.

Η μετατροπή του σήματος του αισθητήρα από αναλογικό σε ψηφιακό είναι μια από τις κύριες λειτουργίες ενός τέτοιου συστήματος. Οι μετατροπείς σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό μετατρέπουν μια τάση σε ένα δυαδικό αριθμό και έπειτα σε έναν ψηφιακό αριθμό (βάση του 10) έτοιμο για περαιτέρω ψηφιακή επεξεργασία. Παρόλα αυτά ένας ψηφιακός αριθμός είναι μόνο μια εκτίμηση της πραγματικής τάσης εξόδου ενός αισθητήρα και αυτό γιατί γίνεται διακριτοποίηση της αναλογικής μορφής προκειμένου να γίνει η ψηφιοποίηση. Η μαθηματική σχέση που τα συνδέει δείχνει πως ο αριθμός bits ενός ADC συστήματος καθορίζει την ανάλυση. Ένας τέτοιος μετατροπέας με n- bits έχει ανάλυση $1:2^n$. Για παράδειγμα μετατροπέας 12bit, έχει ανάλυση 1 προς 4096 καθότι $2^{12}=4096$, όπου σε ένα

σήμα εισόδου των 10 Vdc μπορεί να αναλύσει τη μέτρηση σε $10/4096=0,00244$ Vdc ή 2,44mV. Όλη η παραπάνω διαδικασία για να υλοποιηθεί ελέγχεται από ένα πρόγραμμα εγκατεστημένο στον μικροελεγκτή της διάταξης, συνήθως σε μορφή Assembly, BASIC, C, C++, C#, Fortran, Java, LabVIEW, Lisp, Pascal κλπ. Επίσης υπάρχουν και λειτουργικά προγράμματα ανοιχτού τύπου, φιλικά σε οποιαδήποτε προσαρμογή επιθυμεί ο χρήστης και παρέχουν τα κατάλληλα εργαλεία για αυτό. Σε πολλές περιπτώσεις, το σήμα που πρόκειται να καταγραφεί χρειάζεται φιλτράρισμα (λόγω του θορύβου ή και της περιοχής ενδιαφέροντος) και ενίσχυση (amplification).

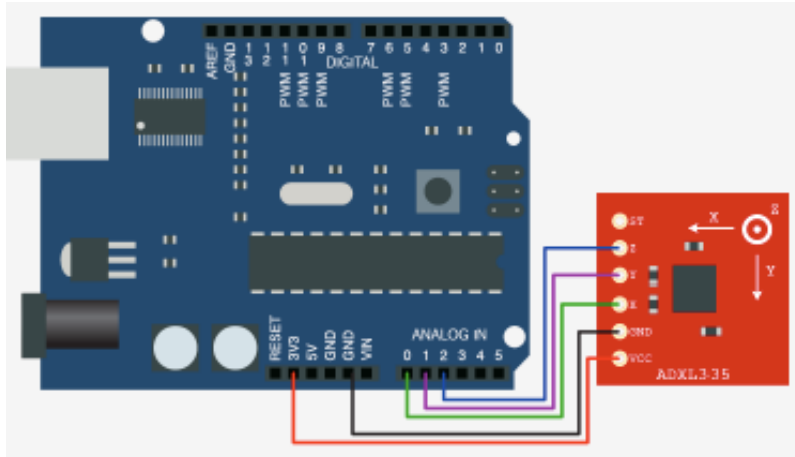
Ένα από τα σημαντικότερα μέρη μιας διαγνωστικής ανάλυσης είναι το κομμάτι της επιλογής της κατάλληλης συχνότητας δειγματοληψίας, καθώς είναι κρίσιμο το καταγραφόμενο σήμα να αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα. Η διαφορά μεταξύ των δύο προκύπτει από το γεγονός ότι το αναλογικό σήμα καταγράφεται με συγκεκριμένη συχνότητα, με αποτέλεσμα αύξηση της συχνότητας αυτής να παρέχει ακριβέστερη εικόνα του πραγματικού σήματος. Παρόλα αυτά, τα ηλεκτρονικά που απαρτίζουν το σύστημα καταγραφής δεδομένων πολλές φορές περιορίζουν τις δυνατότητές αναφορικά με την αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι χαμηλή, η αποτύπωση του σήματος είναι φτωχή και υπάρχει η πιθανότητα αναπαράστασης του σήματος με τελείως διαφορετικά χαρακτηριστικά, φαινόμενο συχνά αποκαλούμενο «αλλοίωση» (aliasing).



Διάγραμμα 8 Αλλοίωση σήματος λόγω μικρής συχνότητας δειγματοληψίας [6]

Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία συναντώνται αρκετές περιπτώσεις όπου ερευνητές κατόρθωσαν να δημιουργήσουν μόνοι τους, συστήματα συλλογής δεδομένων χαμηλού κόστους για διαγνωστική χρήση και όχι μόνο. Οι Bilski et al [28], ανέπτυξαν ένα οικονομικού τύπου ταυτοχρονισμένο αναλυτή σήματος στο φάσμα της συχνότητας ενώ οι Swisch et al

[29], παρουσίασαν μία πλατφόρμα DAQ για την επίβλεψη της κατάστασης ανεμογεννητριών με συχνότητα δειγματοληψίας ίση με 20kHz/ch. Η αποθήκευση των δεδομένων γίνεται στις περισσότερες περιπτώσεις σε MySQL database ή SD card με τη μεταφορά των δεδομένων σε υπολογιστή να πραγματοποιείται μετέπειτα μέσω πρωτοκόλλου Ethernet. Οι Zhang et al [23] ανέπτυξαν ένα χαμηλού κόστους καταγραφικό σύστημα δονήσεων βασισμένο σε μικροελεγκτή με μικρή συχνότητα δειγματοληψίας ίση με 300Hz. Πιο εξελιγμένα συστήματα συναντούμε στις εργασίες των Florin et al [30] και Jamil et al [31], όπου στην πρώτη περίπτωση έχει σχεδιαστεί ένα καταγραφικό ικανό για μετρήσεις έως και 400kS/s. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιούσε έναν ανεξάρτητο μετατροπέα σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό (ADC) και μία ανεξάρτητη μνήμη RAM 16MB, η επικοινωνία γινόταν μέσω RS232 και RS 485 για τη μεταφορά και αποθήκευση των δεδομένων σε MySQL database. Στη δεύτερη περίπτωση, παρουσιάστηκε καταγραφικό σύστημα αποτελούμενο από PIC (Peripheral Interface Controller) ικανό για καταγραφή κραδασμών επαγωγικού κινητήρα. Αρκετά συστήματα που περιλαμβάνουν μικροελεγκτές των 32bit έχουν προταθεί επίσης όπως στην αναφορά [32], όπου στο σύστημα ενσωματώθηκε ένας μικροελεγκτής βασισμένος στον επεξεργαστή ARM9 STR912F44W για καταγραφή δονήσεων με σκοπό τη διάγνωση σφαλμάτων σε μηχανές. Στα σήματα εφαρμοζόταν τεχνική DWT για την επεξεργασία τους. Τέλος, στην περίπτωση των Villarroel et al [33], σχεδιάζεται ένα χαμηλού κόστους καταγραφικό σύστημα με τη χρήση ICP επιταχυνσιόμετρου, μικροελεγκτή σε πλατφόρμα ανάπτυξης FRDM K64F, σχεδιασμό καρτών PCB για ενεργό αντι-αλλοιωτικό φίλτρο, MicroSD μνήμη και επικοινωνία μέσω πρωτοκόλλου Ethernet. Αυτό που ουσιαστικά παρουσιάζεται στην εργασία είναι η πλήρης αποτύπωση των ηλεκτρονικών που περιλαμβάνονται σε ένα σύστημα DAQ του εμπορίου, καθώς και τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν κατά τη σχεδίασή τους. Χρήσιμες πληροφορίες ανακτήθηκαν όμως και από την διπλωματική εργασία [34], όπου η καταγραφή των δεδομένων γίνεται από σύστημα που προσαρμόζεται στον εργαλειοφόρα μιας εργαλειομηχανής με σκοπό τον εντοπισμό του φαινομένου των αυτοδιεγερόμενων ταλαντώσεων (chattering) και το κύκλωμα που σχεδιάζεται και υλοποιείται για τον εντοπισμό, περιλαμβάνει επιταχυνσιόμετρο, μικροελεγκτή, ενισχυτή σήματος, αποθήκευση σε κάρτα μνήμης SD αλλά και επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων με μικροϋπολογιστή Raspberry Pi.



Εικόνα 19 Μικροελεγκτής με επιταχυνσιόμετρο MEMS [35]

Παρόλα αυτά, στη γενική περίπτωση τα συστήματα που συναντώνται για τη συλλογή δεδομένων είναι τυποποιημένα συστήματα από γνωστούς κατασκευαστές αυτού του χώρου (βλ. Εικόνες 20, 21) με υψηλές προδιαγραφές και δυνατότητες, τα οποία, όπως προαναφέρθηκε, είναι ικανά να συλλέγουν πληροφορίες από πολλά κανάλια ταυτόχρονα και μέσω ενός λογισμικού να αποθηκεύουν τις μετρήσεις κατευθείαν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Συνήθη πακέτα λογισμικού που χρησιμοποιούνται με αυτά τα συστήματα είναι το LabView, το Matlab και άλλα. Η χρήση των συστημάτων πρόσκτησης δεδομένων γνωστών κατασκευαστών θεωρείται η πιο αξιόπιστη επιλογή για την καταγραφή των δεδομένων αφού ενσωματώνουν μετατροπείς σήματος πολύ υψηλής ακρίβειας, δυνατότητες πολλαπλών καταγραφών, δυνατότητα χρήσης ζωνοπερατών φίλτρων αλλά και καλή συμβατότητα με όλους τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές.



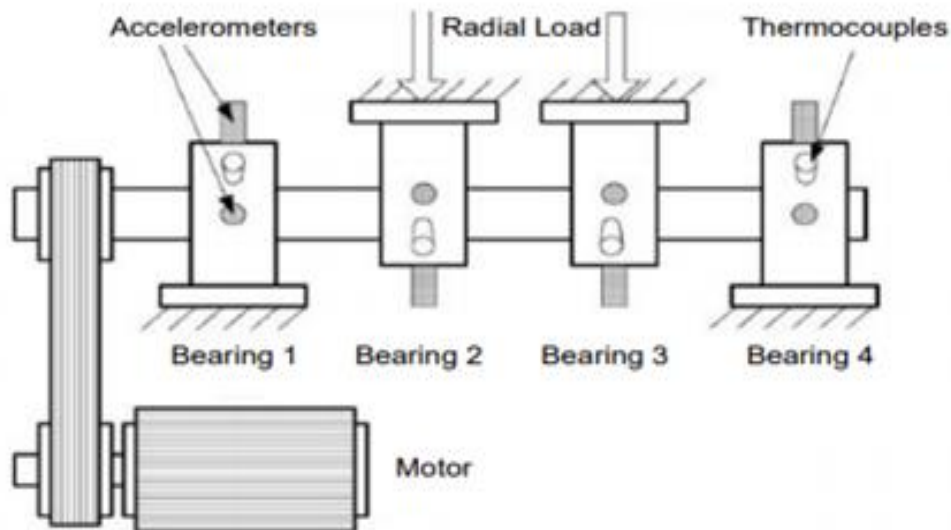
Εικόνα 20 Καταγραφική συσκευή πολλών καναλιών



Εικόνα 21 Κάρτα συλλογής δεδομένων

4 Ανάπτυξη αλγορίθμου εντοπισμού και πρόβλεψης βλάβης σε έδρανα κύλισης

Για την ανάπτυξη του κώδικα ανίχνευσης σφαλμάτων σε έδρανα κύλισης που πραγματεύεται η συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το σύνολο δεδομένων που δημιουργήθηκε το 2007 από το NSF I/UCR Center for Intelligent Maintenance Systems (IMS) με την υποστήριξη της Rexnord Corp [1]. Το σύνολο αυτό δεν επιλέχθηκε τυχαία καθώς σε αντίθεση με άλλα σύνολα δεδομένων που χρησιμοποιούνται σε αντίστοιχες εργασίες, αυτό είναι το μόνο που το σφάλμα στα έδρανα δεν προκαλείται με εμπλοκή ανθρώπου αλλά με την πάροδο του χρόνου λειτουργίας λόγω της φόρτισης στην οποία υπόκειται όλη η κατασκευή. Συγκεκριμένα, τα έδρανα περιστρέφονται συνεχόμενα για 30 ημέρες με σταθερή ταχύτητα 2000rpm συμπληρώνοντας 86,4 εκατομμύρια κύκλους περιστροφής. Η όλη διάταξη αποτελείται από τέσσερα έδρανα κύλισης Rexnord ZA-2115 διπλής σειράς τοποθετημένα σε άξονα διαμέτρου 1,93", ο οποίος συνδέεται με έναν κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος με τη χρήση οδοντωτού ιμάντα. Στον άξονα της διάταξης ασκείται ακτινική φόρτιση από ένα βάρος περίπου 300kg χρησιμοποιώντας ελατήρια. Αυτός ήταν ο δεύτερος λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων, καθώς ο τύπος των εδράνων που χρησιμοποιούνται αλλά και η γεωμετρία και η διάταξη των εξαρτημάτων προσεγγίζει την διάταξη μιας ατράκτου εργαλειομηχανής ενώ ταυτόχρονα έδρανα διπλής σειράς και παρόμοιας διαμέτρου συναντώνται πολύ συχνά στο συναρμολόγημα της ατράκτου κέντρου κατεργασιών.



Εικόνα 22 Διάταξη πειραματικών μετρήσεων του IMS [1]

Σε κάθε έδρανο ήταν τοποθετημένα δύο επιταχυνσιόμετρα και τέσσερα θερμοστοιχεία, τα οποία κατέγραφαν τις δονήσεις στις διευθύνσεις X και Y και τις αναπτυσσόμενες

θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, τα επιταχυνσιόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα PCB 253B33 High sensitivity Quartz ICP®. Το ίδιο πείραμα πραγματοποιήθηκε τρεις φορές: την πρώτη φορά το πείραμα έληξε με το τρίτο έδρανο να εμφανίζει φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο και φθορά στους τριβείς ολίσθησης του τέταρτου εδράνου, το δεύτερο πείραμα έληξε με φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο του πρώτου εδράνου ενώ το τρίτο πείραμα με την ίδια φθορά στο τρίτο έδρανο.



Εικόνα 23 Φωτογραφία διάταξης πειραματικών μετρήσεων του IMS [1]

Rexnord ZA-2115 Characteristics		
Pitch diameter	2.815 inch	71.5mm
Rolling element diameter	0.331 inch	8.4mm
Number of rolling element per row	16	16
Contact angle	15.17°	15.17°
Static load	6000 lbs	26690 N

Πίνακας 5 Χαρακτηριστικά εδράνου κυλίσεως των μετρήσεων του IMS

Το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων του IMS έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εργασίες από το 2010 σε έρευνα σχετικά με τον στατιστικό προσδιορισμό του προσδόκιμου χρόνου καλής λειτουργίας του εδράνου (Remaining Useful Life - RUL) [29], [36], [37], συγκριτικές δοκιμές τεχνικών αποθρομβοποίησης σήματος [19], ανάπτυξη αλγορίθμων εντοπισμού σφάλματος με τεχνητή νοημοσύνη όπως νευρωνικά δίκτυα, deep learning κ.

Συνολικά, από το σύνολο δεδομένων παρέχονται τρεις σειρές καταγραφών, οι οποίες περιέχουν έναν μεγάλο όγκο μετρήσεων διάρκειας ενός δευτερολέπτου κάθε 10 λεπτά με συχνότητα δειγματοληψίας 20 kHz. Στην πρώτη σειρά καταγραφής παρέχονται μετρήσεις από δύο επιταχυνσιόμετρα σε κάθε έδρανο ενώ στις υπόλοιπες δύο σειρές καταγραφής παρέχονται μετρήσεις από ένα επιταχυνσιόμετρο σε κάθε έδρανο κύλισης.

	Πλήθος αρχείων	Πλήθος καναλιών καταγραφής	Χρόνος καταγραφής	Διάρκεια	Αποτελέσματα
Καταγραφή 1	2156	8	36min	49680min, 34 ημέρες και 12 ώρες	Έδρανο 3: αστοχία στον εσωτ. δακτύλιο Έδρανο 4: αστοχία των στοιχείων κύλισης
Καταγραφή 2	984	4	16min	9840min, 6 ημέρες και 20 ώρες	Έδρανο 1: αστοχία στον εξωτ. δακτύλιο
Καταγραφή 3	4448	4	74min	44480 min, 31 ημέρες και 10 ώρες	Έδρανο 3: αστοχία στον εξωτ. δακτύλιο

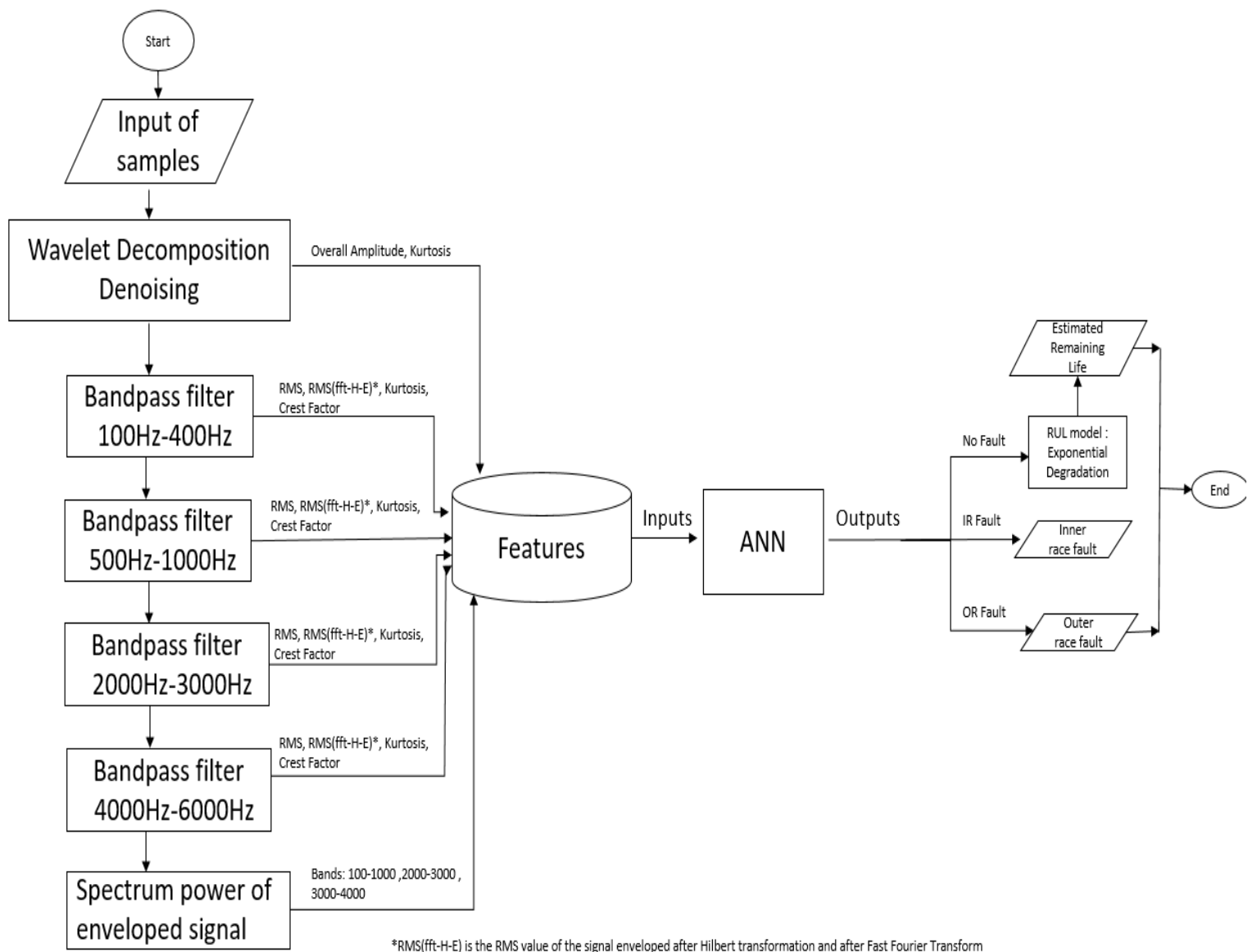
Πίνακας 6 Χαρακτηριστικά κάθε καταγραφής

Για τα συγκεκριμένα έδρανα ολίσθησης, οι συχνότητες σφάλματος υπολογίζονται ως παρακάτω:

- Ball Pass Frequency Outer race (BPFO) = 236Hz
- Ball Pass Frequency Inner race (BPFI) = 297Hz
- Ball Spin Frequency (BSF) = 278Hz
- Shaft frequency = 33Hz

Στην ερευνά των Arun et al [37], η οποία ασχολείται με την αποτελεσματικότητα της χρήσης αυτών των χαρακτηριστικών συχνοτήτων έχει αποδειχθεί ότι οι παραπάνω συχνότητες καθορίζουν τις περιοχές στις οποίες βρίσκεται η πληροφορία που χρειάζεται ο μηχανισμός εντοπισμού του σφάλματος. Στις χαμηλές συχνότητες (μικρότερες των 1000Hz) η εμφάνιση των συχνοτήτων αυτών υποδεικνύει το είδος του σφάλματος συγκεντρώνοντας μεγαλύτερη ενέργεια στη συχνότητα του σφάλματος που έχει αναπτυχθεί.

Στο παρακάτω διάγραμμα ροής περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία.



Διάγραμμα 9 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου

4.1 Επιλογή των μετρήσεων εκπαίδευσης του αλγορίθμου μηχανικής μάθησης

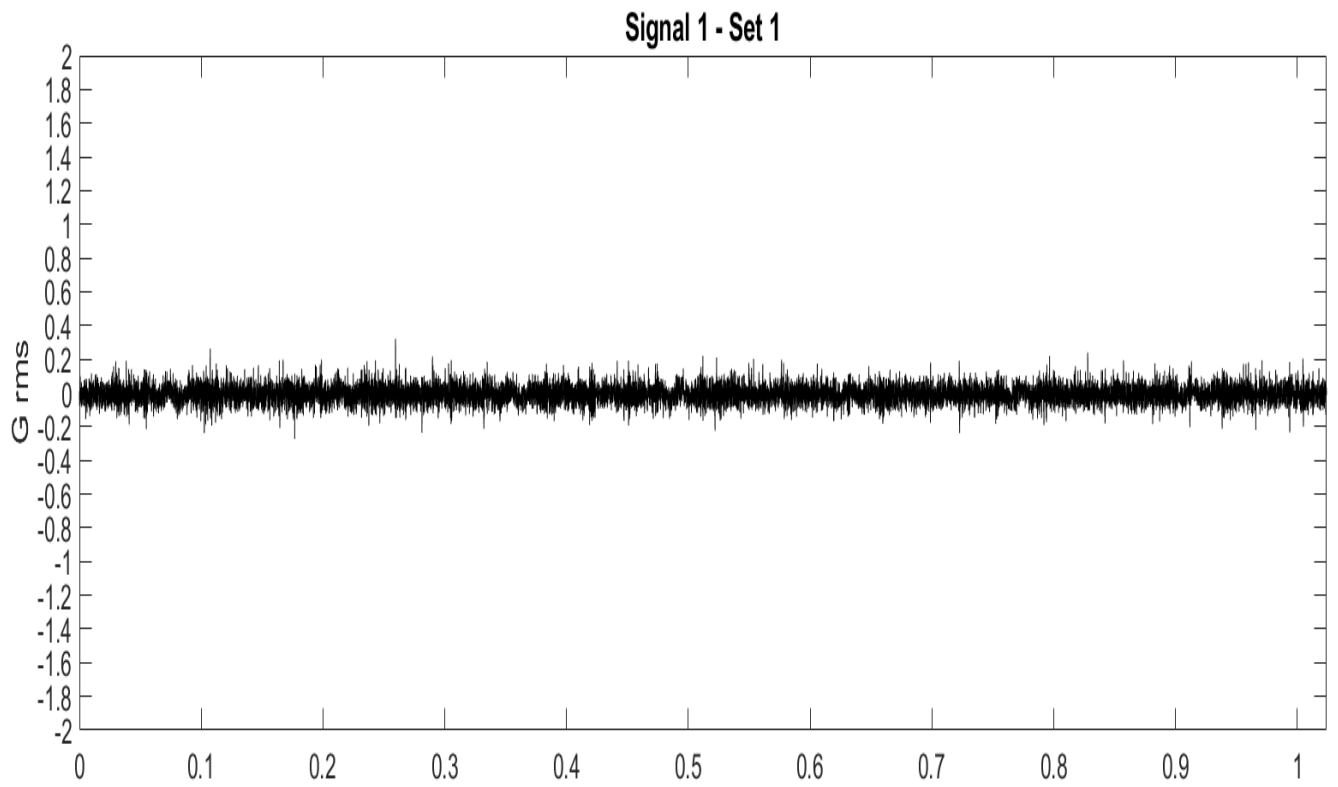
Αρχικά αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η πρώτη καταγραφή, η οποία λόγω των μετρήσεων σε δυο κατευθύνσεις είναι και πιο πλήρης σε πληροφορία. Αυτό όμως θα περιοριζε τη διαγνωστική μέθοδο να εντοπίζει μόνο το σφάλμα στον εσωτερικό δακτύλιο. Έτσι, για να είναι πιο πλήρης η ανάπτυξη του διαγνωστικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν και δειγματοληψίες από τη δεύτερη καταγραφή. Λόγω του μεγάλου πλήθους δεδομένων, οι δειγματοληψίες διαχωρίστηκαν χρησιμοποιώντας 52 μετρήσεις από την πρώτη καταγραφή (2-3 δείγματα ανά ημέρα) και 50 από τη δεύτερη (10-12 δείγματα ανά ημέρα). Η επιλογή των αρχείων έγινε με βάση τη χρονολογική σειρά διατηρώντας όσο το δυνατόν ίσα χρονικά διαστήματα ανάμεσα σε διαδοχικές δειγματοληψίες που χρησιμοποιούνται. Οι συνολικά

102 μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν προσομοίωναν και τις τρεις καταστάσεις που εξετάστηκαν:

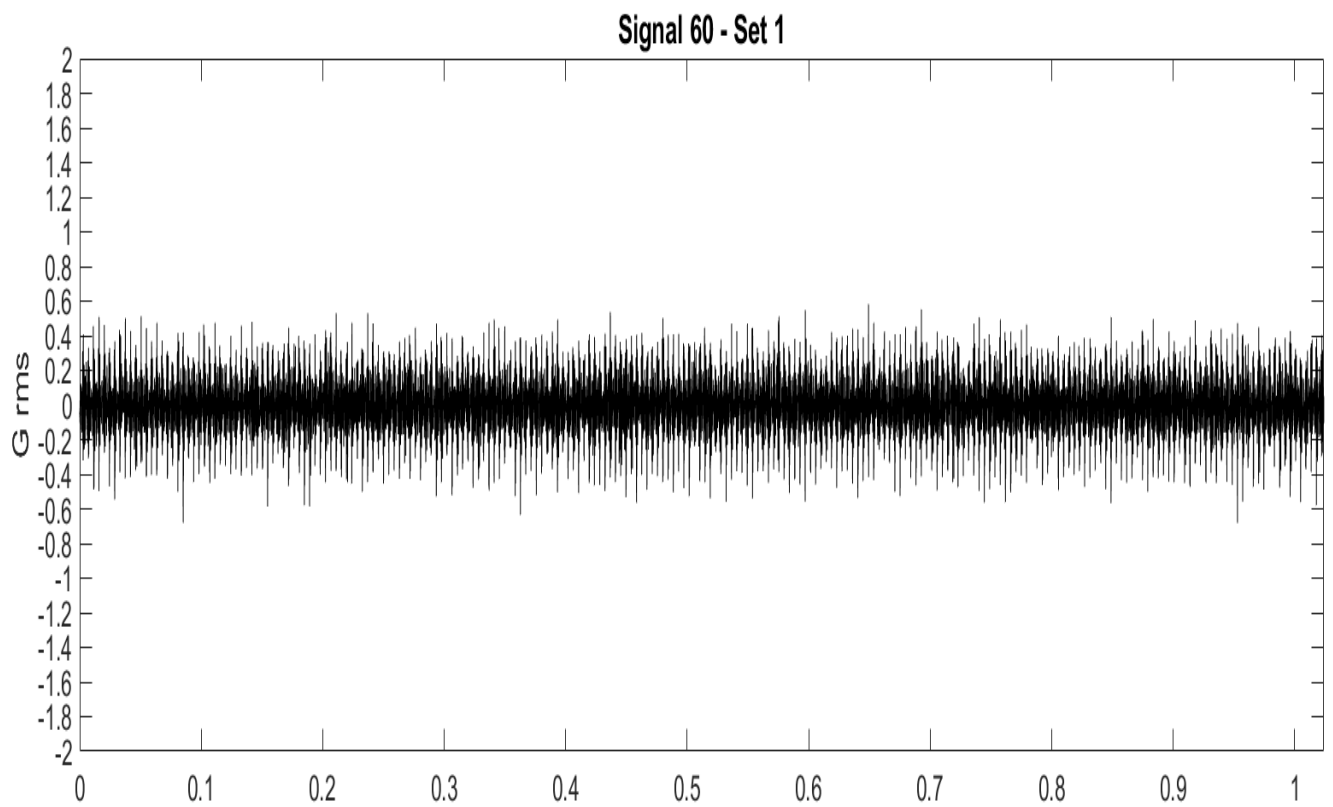
1. 60 μετρήσεις σε καλή λειτουργική κατάσταση
2. 22 μετρήσεις με σφάλμα στον εσωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν
3. 20 μετρήσεις με σφάλμα στον εξωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν

Το μοντέλο δημιουργήθηκε μέσω της ανάπτυξης κώδικα στο περιβάλλον Matlab. Τα αρχεία των δειγματοληπτικών μετρήσεων διαβάζονται και αποθηκεύονται από τον κώδικα σε πίνακα τριών διαστάσεων, εφόσον κάθε ξεχωριστή δειγματοληψία ήταν ένας πίνακας δύο διαστάσεων (20480x8) με οχτώ μετρήσεις για την πρώτη καταγραφή και τέσσερις αντίστοιχα για την δεύτερη, για τα τέσσερα έδρανα.

Η γραφική παράσταση του σήματος στο πεδίο του χρόνου, πριν εφαρμοστεί οποιαδήποτε άλλη τεχνική, δίνει μια πρώτη ένδειξη της βλάβης με μεγάλη σχετικά όμως δυσκολία όσον αφορά την διακριτικότητα καθώς ο θόρυβος είναι εμφανής. Παρόλα αυτά, το σήμα των επιταχύνσεων σε ένα έδρανο με καλή λειτουργία και σε ένα με βλάβη σε πλήρη ανάπτυξη εμφανίζει διαφορές ως προς τα πλάτη του σήματος αλλά και την πληθώρα των κρουστικών παλμών. Στο Διάγραμμα 10 φαίνεται το σήμα στην πρώτη μέτρηση που χρησιμοποιήθηκε και στο Διάγραμμα 11 το ίδιο σήμα μετά την πλήρη εξέλιξη της βλάβης (φθορά εσωτερικού δακτυλίου).



Διάγραμμα 10 Σήμα Επιτάχυνσης Σήμα 1-Set 1



Διάγραμμα 11 Σήμα επιτάχυνσης Σήμα 60-Set1

Η κλίμακα των επιταχύνσεων στην πρώτη περίπτωση είναι ιδιαίτερα χαμηλή εμφανίζοντας μια πιο ισορροπημένη συμπεριφορά και επιταχύνσεις μικρότερες των 0.2 G rms . Αντιθέτως, μετά την εμφάνιση της βλάβης (βλ. Διάγραμμα 11) οι κρουστικοί παλμοί είναι πιο έντονοι και τα πλάτη της επιτάχυνσης σε μερικές περιπτώσεις ξεπερνούν το 0,5 G rms.

4.2 Αποθορυβοποίηση του σήματος

Λόγω των δονήσεων όλης της διάταξης παρατηρείται ότι το σήμα περιλαμβάνει θόρυβο. Η αποθορυβοποίηση του σήματος είναι μια κλασσική διαδικασία που ακολουθείται και έτσι αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η αποθορυβοποίηση μέσω της μεθόδου μετασχηματισμού κυματιδίων.

4.2.1 Θεωρία αποθορυβοποίησης μέσω μετασχηματισμού κυματιδίων

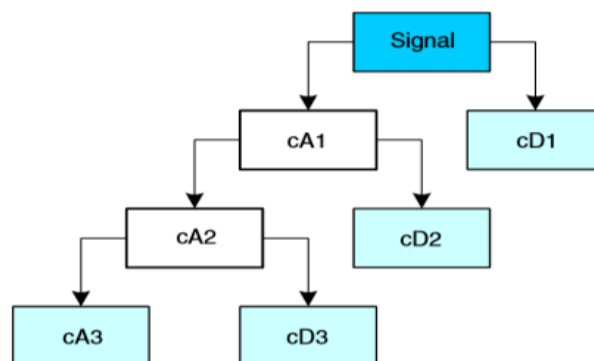
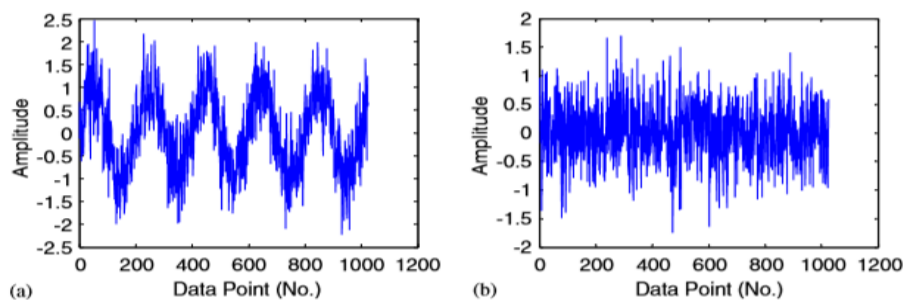
Στην αναφορά [1], οι Qiu et al είναι οι πρώτοι που αναλύουν τη μεθοδολογία της αποθορυβοποίησης βασισμένη στον μετασχηματισμό κυματιδίων για το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων. Το μοντέλο του σήματος που συμπεριλαμβάνει θόρυβο είναι το παρακάτω:

$$x(n) = S(n) + \sigma w(n), \quad n = 0, 1 \dots N - 1 \quad (4)$$

Σε αυτό το πολύ απλο μοντέλο, ο θόρυβος προσεγγίζεται με τη συνάρτηση $w(n)$, σαν Gaussian λευκός θόρυβος, ανεξάρτητος και ιδανικά κατανομημένος και την μεταβλητή “ σ ” που δηλώνει την κλίμακα του θορύβου. Το αντικείμενο της διαδικασίας αποθορυβοποίησης είναι η συμπίεση του θορύβου που υπάρχει στο σήμα $x(n)$ και η αποκατάσταση του όρου $S(n)$. Θεωρητικά, αυτό πραγματώνεται με την ανακατασκευή του σήματος απο τα δεδομένα που περιλαμβάνουν θόρυβο με τέτοιο τρόπο ώστε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ανάμεσα στο πραγματικό σήμα και το ανακατασκευασμένο να ελαχιστοποιείται. Γενικά, η αποθορυβοποίηση περιλαμβάνει τα τρία παρακάτω βήματα:

1. Μετασχηματισμό του σήματος: Επιλέγεται μια βάση κυματιδίου και ένα επίπεδο N βάση του οποίου μετασχηματίζεται το σήμα κυματιδιακά.
2. Τιμή «κατώφλι» για τον συντελεστή αναλυτικότητας: Για κάθε επίπεδο απο 1 έως N , επιλέγεται μια τιμή μετάβασης ή κατώφλι (threshold) για την ανάλυση του μετασχηματισμού.
3. Ανακατασκευή του σήματος: Υπολογίζεται η κυματιδιακή ανακατασκευή του σήματος απο την αρχική προσέγγιση του συντελεστή επιπέδου και του τροποποιημένου συντελεστή αναλυτικότητας των επιπέδων απο 1 έως N .

Η μέθοδος αυτή ανταποκρίνεται ιδιαίτερα καλά σε περιπτώσεις λευκού θορύβου και μπορεί να επιτύχει σχεδόν ολοκληρωτική αφαίρεση του θορύβου και ιδανική ανακατασκευή του αρχικού σήματος. Παρόλα αυτά, ακόμα υπάρχουν κάποια προβλήματα που χρήζουν μιας μεγαλύτερης έρευνας. Το πρώτο πρόβλημα αναφέρεται στην ορθή επιλογή του κυματιδίου που θα πραγματοποιήσει τον μετασχηματισμό. Για την διαδικασία αυτή δεν υπάρχουν οδηγίες που να την διευκολύνουν και στηρίζεται κυρίως στην κρίση του αναλυτή και στα αποτελέσματα που αποδίδει. Το δεύτερο θέμα αφορά στην επιλογή της μεταβατικής αυτής τιμής που σχετίζεται με τον συντελεστή αναλυτικότητας (detail coefficient). Αν και η βιβλιογραφία σχετικά με το ζήτημα υπάρχει [8], [38], η επιλογή αυτής της τιμής παραμένει ένα άλυτο θέμα όσον αφορά τη διαδικασία επιλογής της. Το τρίτο και τελευταίο θέμα που αναφέρεται στην [1], είναι το γεγονός ότι η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην ιδέα της συγκεντρωμένης ενέργειας του σήματος σε συγκεκριμένες περιοχές του σήματος και συγκεκριμένους συντελεστές του κυματιδιακού πεδίου. Για το λόγο αυτό, η μη-γραμμική συνάρτηση μετάβασης τείνει να χρησιμοποιεί μεγαλύτερους συντελεστές που αναπαριστούν το σήμα και ταυτόχρονα μειώνουν το θόρυβο. Η μέθοδος αυτή όπως αναφέρθηκε και παραπάνω λειτουργεί καλά όταν στο σήμα δεν υπάρχουν απότομες αλλαγές, σε περιπτώσεις όμως σήματος που προέρχεται από περιστρεφόμενη εργαλειομηχανή για διαγνωστικούς λόγους η επιτυχία της αποθουροποίησης περιλαμβάνει μια επιπλέον δυσκολία.



Διάγραμμα 12 Αποθουροποίηση με μετασχηματισμό κυματιδίων [1]

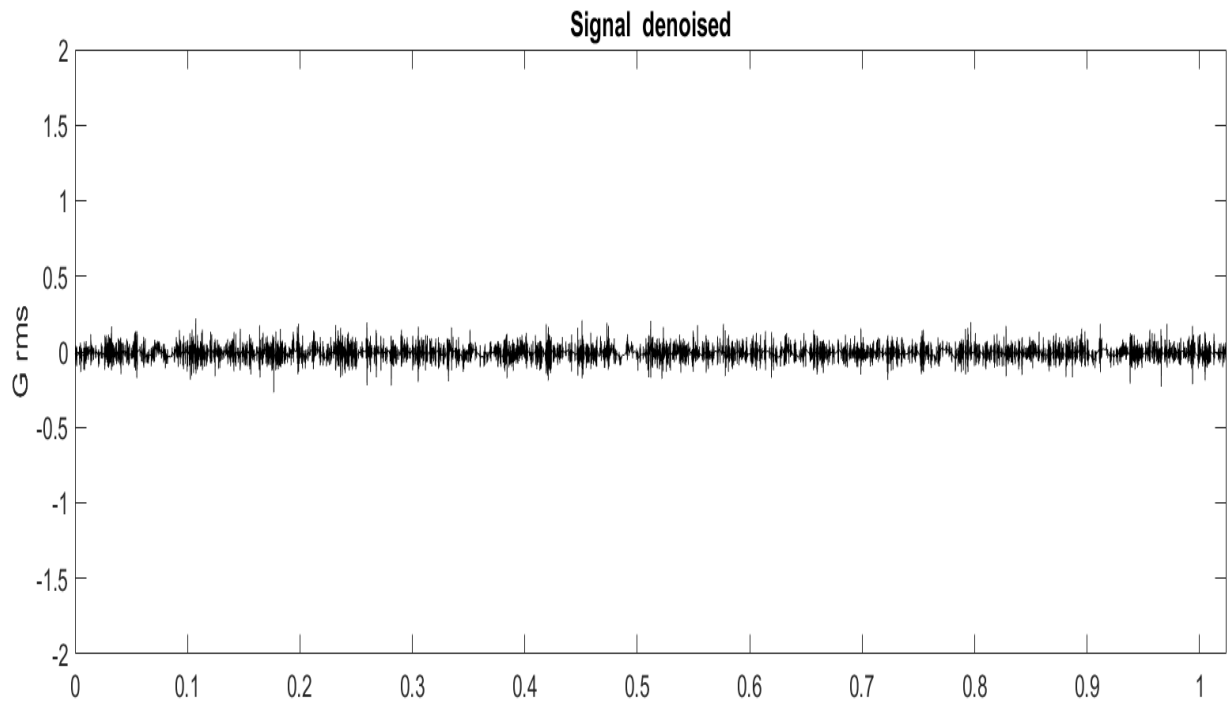
4.2.2 Εφαρμογή της αποθορυβοποίησης και αποτελέσματα

Σε συνέχεια της ανάλυσης του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε, αφού τα δεδομένα εισήχθησαν σε έναν πίνακα κατα χρονολογική σειρά, δημιουργήθηκε ένας νέος, στον οποίο εισήχθησαν οι τιμές του σήματος στο συγκεκριμένο ρουλεμαν που παρουσίασε τη βλάβη οπότε από τις οκτώ στήλες της πρώτης καταγραφής και τις τέσσερις της δεύτερης καταγραφής, χρησιμοποιήθηκαν η πέμπτη και η πρώτη αντίστοιχα (επιταχυνσιόμετρο «χ» άξονα). Για την αποθορυβοποίησή τους χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που βασίζεται στον μετασχηματισμό κυματιδίων, όπως αναλύθηκε παραπάνω.

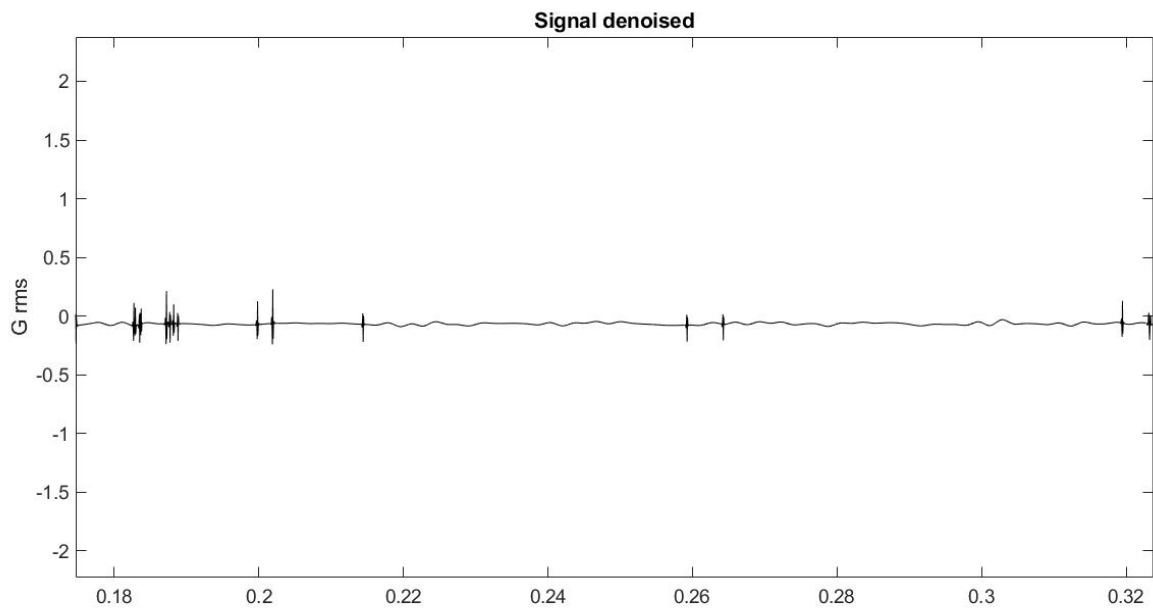
Για την εφαρμογή της μεθόδου, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση του Matlab «wden» ή wavelet denoising, κατά την οποία χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός κυματιδίων του σήματος για τον εντοπισμό των συχνοτήτων που θα διατηρηθούν και αυτών που θα απομακρυνθούν.

Χρησιμοποιώντας σαν επίπεδο μετασχηματισμού το 5^ο (lev = 5) και συνάρτηση μετάβασης κυματιδιακών συντελεστών την SURE ('rigrsure'), δόθηκαν σαν είσοδοι στην συνάρτηση τα ακατέργαστα σήματα, επιστρέφοντάς τα αποθορυβοποιημένα. Ως προς την αποτελεσματικότητά τους εξετάστηκαν και οι τρεις συναρτήσεις μετάβασης συντελεστών κυματιδίων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και προτείνονται από το Matlab. Παρόλα αυτά όμως απορρίφθηκαν καθώς αφαιρούσαν πολύ πληροφορία από το σήμα. Η μέθοδος SURE αποκόπτει τις λιγότερες συχνότητες από το σήμα με αποτέλεσμα να είναι πιο κατανοητό και επεξεργάσιμο χωρίς όμως οι συχνότητες που αναγνωρίζει ως θόρυβο να περικλείουν σημαντικά χαρακτηριστικά του σήματος που αφορούν τη διαγνωστική βλαβών. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα των τριών προσεγγίσεων που πραγματοποιήθηκαν σε ένα τυχαίο σήμα επιταχυνσιόμετρου πριν εμφανιστεί οποιαδήποτε βλάβη στο ρουλεμάν.

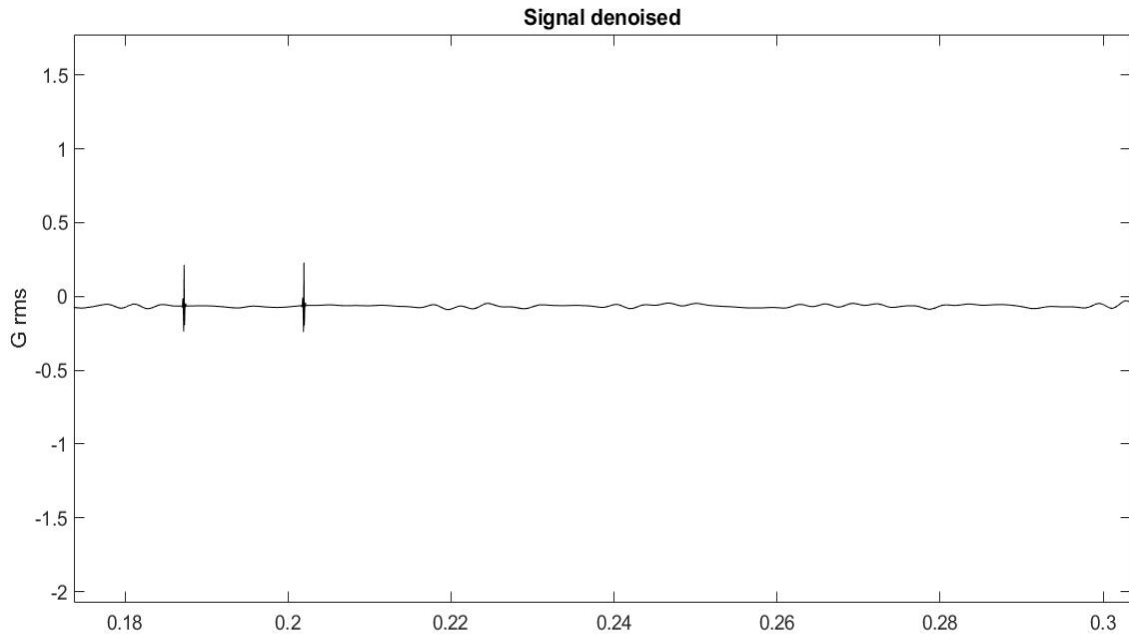
Τα διαφορετικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση διαφορετικών μεθόδων αποθορυβοποίησης του σήματος είναι εμφανή στις χρονικά σήματα που ακολουθούν (βλ. Διάγραμμα 13 έως Διάγραμμα 15). Παρατηρήθηκε ότι ειδικότερα στην υψηλή συχνοτική περιοχή στην οποία γίνεται προσπάθεια να εντοπιστεί το μέγεθος της βλάβης, το κατώφλι αναγνώρισης θορύβου έχει μεγάλη σημασία, αφού στις μεθόδους Minimax (βλ. Διάγραμμα 14) και Donoho Johnstone (βλ. Διάγραμμα 15), η ενέργεια που περικλείουν οι υψηλές συχνότητες περιορίζεται αρκετά σε σχέση με την μέθοδο SURE (βλ. Διάγραμμα 13). Ετσι, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η αποθορυβοποίηση δε θα έχει μεγάλο αντίκτυπο στο μέγεθος των χαρακτηριστικών του σήματος που θα επιλεχθούν, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SURE.



Διάγραμμα 13 Σήμα 1 - Set1- Αποθρομβολοποίηση μέσω μετασχηματισμού κυματιδίων και (rig)SURE



Διάγραμμα 14 Σήμα 1 - Set1- Αποθρομβολοποίηση μέσω μετασχηματισμού κυματιδίων και "Minimax"

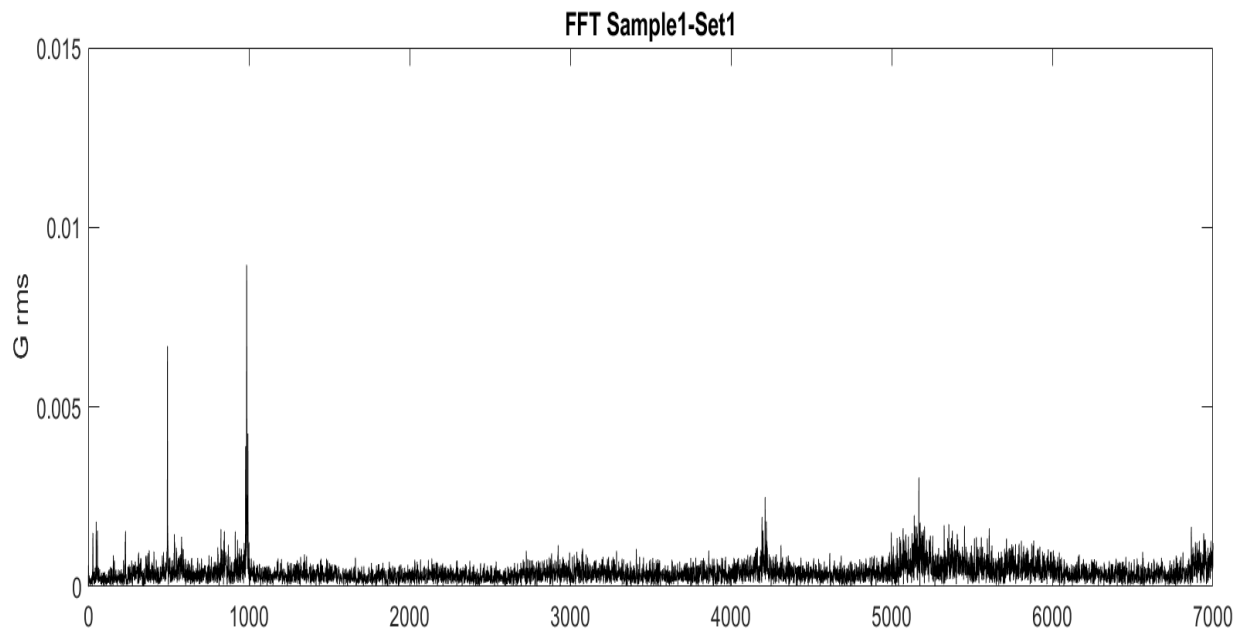


Διάγραμμα 15 Σήμα 1 - Set1- Αποθρομβοποίηση μέσω μετασχηματισμού κυματιδίων και "Donoho Johstone"

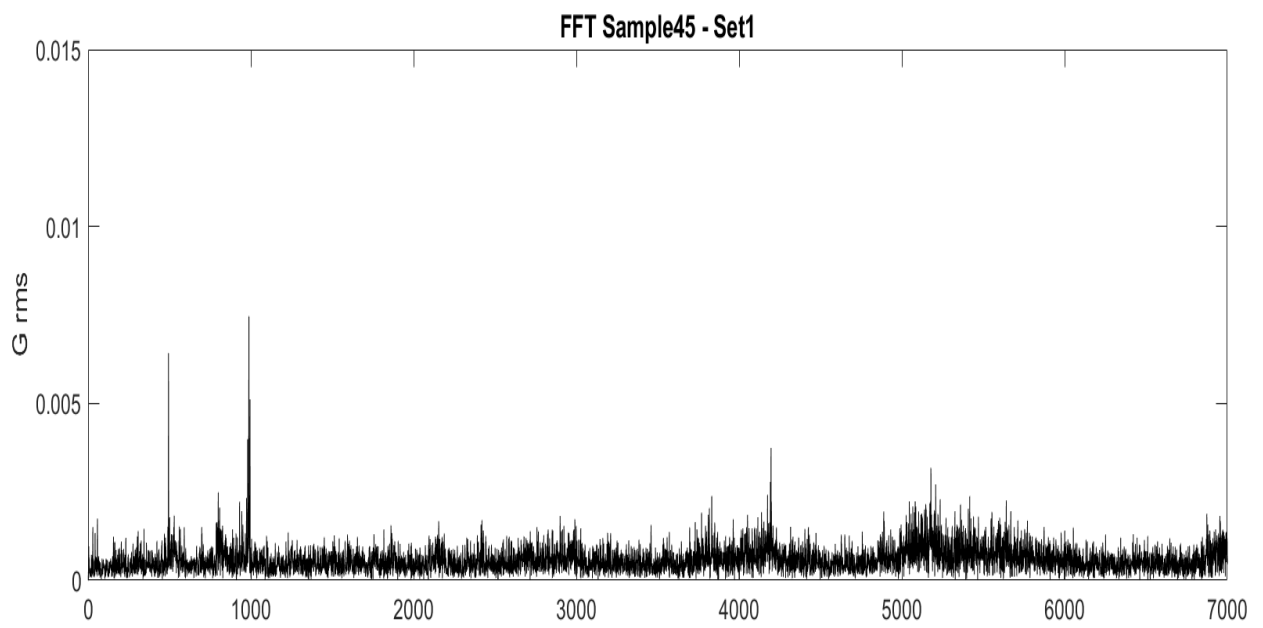
Για καλύτερη αποτύπωση της πληροφορίας εφαρμόστηκε και η μέθοδος εξομάλυνσης του σήματος Savitzky-Golay (savitzky-golay smoothing filter), που χρησιμοποιείται επίσης σε αντίστοιχες έρευνες διαγνωστικού ενδιαφέροντος. Τα αποτελέσματα όμως που απέδωσε η μέθοδος μείωσαν σημαντικά την αποδοτικότητα των μεθόδων μηχανικής μάθησης που εφαρμόστηκαν στη συνέχεια με αποτέλεσμα να απορριφθεί από τη ροή του αλγορίθμου.

4.3 Ανάλυση του σήματος στο φάσμα της συχνότητας

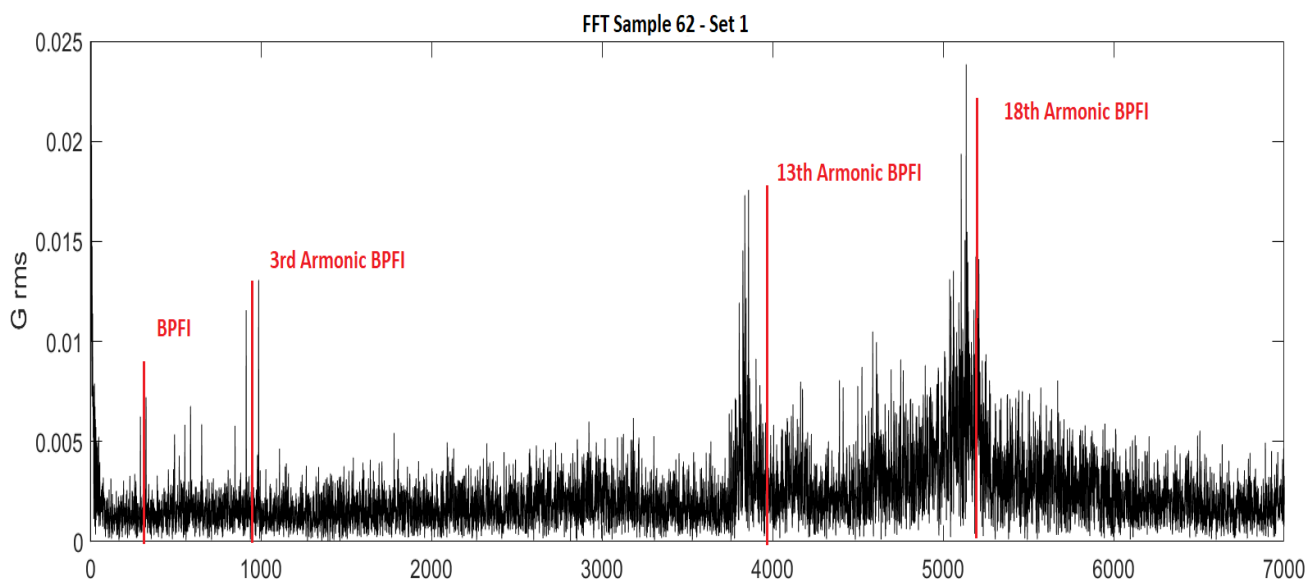
Αφού τα δεδομένα ήταν σε μορφή τέτοια ώστε να μπορούν να αναλυθούν και στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας, απαλλαγμένα από ένα μέρος του θορύβου, έγινε χρήση του μετασχηματισμού Fourier που θα φανέρωνε τις συχνότητες που συμμετέχουν στο σήμα αλλά και τον βαθμό επίδρασής τους σε αυτό (βλ. Διαγράμμα 16 έως Διάγραμμα 18).



Διάγραμμα 16 Σήμα1-Σετ1 επιταχύνσεων μετά από μετασχηματισμό Fourier



Διάγραμμα 17 Σήμα 45-Σετ1 επιταχύνσεων μετά από μετασχηματισμό Fourier



Διάγραμμα 18 Σήμα 62-Σετ1 επιταχύνσεων μετά από μετασχηματισμό Fourier

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι η ενέργεια των κραδασμών όταν ξεκινά η πειραματική διαδικασία δεν εμφανίζεται ιδιαίτερα μεγάλη (βλ. Διάγραμμα 16) ενώ η μεγαλύτερη ενέργεια περικλείεται στην 3^η αρμονική της χαρακτηριστικής συχνότητας BPF1 που αντιπροσωπεύει τη φθορά που αναπτύσσεται σε αυτό το σετ μετρήσεων και στην ιδιοσυχνότητα του συστήματος και είναι πολύ κοντά στην 18^η αρμονική της BPF1. Περίπου το ίδιο διάγραμμα βλέπουμε στην περίπτωση του 42^{ου} δείγματος που είναι και η αρχή της φθοράς (βλ. Διάγραμμα 17) ενώ αντίθετα όταν πλέον η φθορά έχει προχωρήσει σημαντικά (Σήμα 62-Σετ1), η ενέργεια που περικλείεται στο σήμα είναι κατα πολύ μεγαλύτερη με πολλές αρμονικές της BPF1 να εμφανίζουν κορυφές και τα πλάτη να είναι πολύ μεγαλύτερα κυρίως στην υψίσυχη περιοχή των 4kHz-6kHz (βλ. Διάγραμμα 18). Η πληροφορία της συχνοτικής απόκρισης του φαινομένου είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς απο αυτήν αντιλαμβανόμαστε ποιές συχνοτικές περιοχές είναι άξιες περαιτέρω διερεύνησης και θα χρησιμοποιηθούν αργότερα για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών. Τέλος, επιβεβαιώνεται ότι το είδος της βλάβης μπορεί να βρεθεί απο τις αρμονικές με μεγάλα πλάτη στις χαμηλές συχνότητες ενώ το μέγεθος της βλάβης είναι μια πληροφορία περισσότερο διακριτή στα πλάτη των υψηλών συχνοτήτων του σήματος και τις αρμονικές της χαρακτηριστικής συχνότητας βλάβης που προσεγγίζουν την ιδιοσυχνότητα του συστήματος.

4.4 Δημιουργία χαρακτηριστικών

Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή των χαρακτηριστικών που θα χρησιμοποιηθούν. Η φιλοσοφία πάνω στην οποία χτίστηκε ο κώδικας ήταν να δημιουργηθεί ένας αλγόριθμος, ο οποίος δεν θα απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ ώστε να μπορεί να εκτελεστεί σε έναν μικροελεγκτή

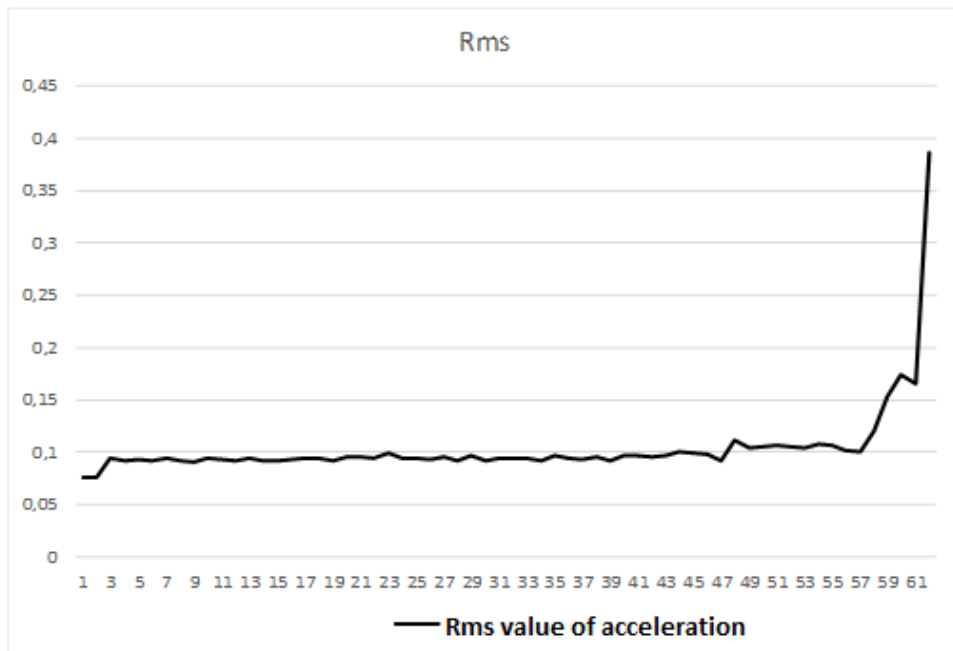
όπως για παράδειγμα το Arduino ή το Raspberry Pi κλπ. και να συσταθεί έτσι μια φορητή συσκευή για το διαγνωστικό έλεγχο. Έτσι, αναπτύχθηκε ένας κώδικας εύκολα προσαρμόσιμος που ταυτόχρονα στηρίζεται πάνω στη θεωρία της διαγνωστικής των εδράνων κύλισης και δημιουργεί χαρακτηριστικά τα οποία είναι κατάλληλα για κρουστικά φαινόμενα.

Καθότι δεν χρησιμοποιήθηκαν μεθοδολογίες περιορισμού και αξιολόγησης των χαρακτηριστικών όπως η PCA και η CDET, ο αριθμός των χαρακτηριστικών περιορίστηκε στα παρακάτω 20 χαρακτηριστικά:

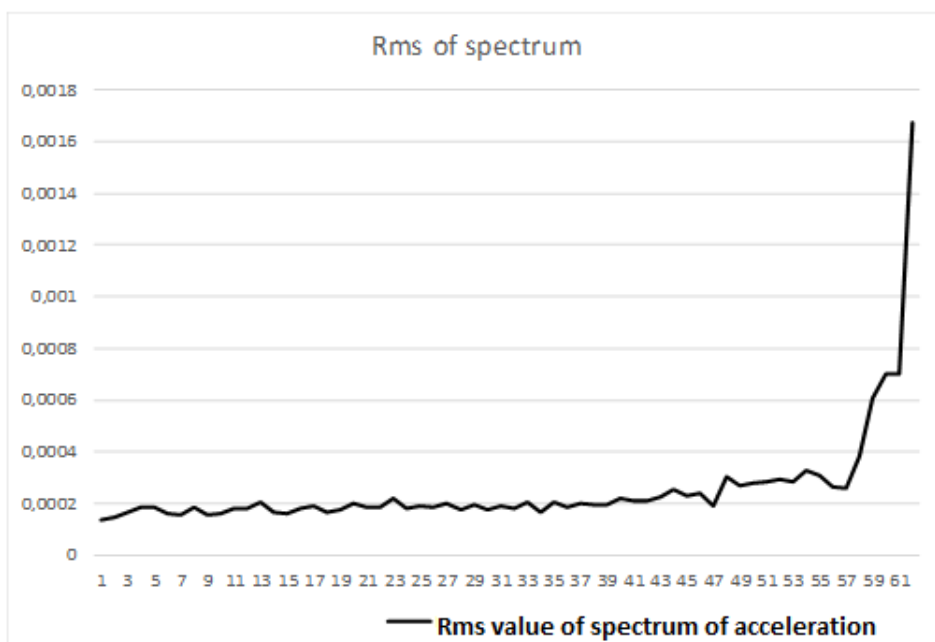
1. Η κύρτωση στο αποδιαμορφωμένο κατα Hilbert σήμα (4000Hz-6000Hz)
2. Το ολικό πλάτος
3. Ο δείκτης κορυφής στο σύνολο του σήματος
4. Η μέση τετραγωνική τιμή της επιτάχυνσης σε όλο το σήμα
5. Η μέση τετραγωνική τιμή της ενέργειας στο αποδιαμορφωμένο κατα Hilbert σήμα (4000Hz-6000Hz)
6. Η φασματική πυκνότητα ισχύος στην περιοχή 100Hz-1000Hz
7. Η φασματική πυκνότητα ισχύος στην περιοχή 2000Hz-3000Hz
8. Η φασματική πυκνότητα ισχύος στην περιοχή 3000Hz-4000Hz
9. Η κύρτωση στην περιοχή 100Hz-400Hz
10. Ο δείκτης κορυφής στην περιοχή 100Hz-400Hz
11. Η μέση τετραγωνική τιμή επιτάχυνσης στην περιοχή 100Hz-400Hz
12. Η μέση τετραγωνική τιμή της ενέργειας στην περιοχή 100Hz-400Hz
13. Η κύρτωση στην περιοχή 500Hz-1000Hz
14. Ο δείκτης κορυφής στην περιοχή 500Hz-1000Hz
15. Η μέση τετραγωνική τιμή επιτάχυνσης στην περιοχή 500Hz-1000Hz
16. Η μέση τετραγωνική τιμή της ενέργειας στην περιοχή 500Hz-1000Hz
17. Η κύρτωση στην περιοχή 2000Hz-3000Hz
18. Ο δείκτης κορυφής στην περιοχή 2000Hz-3000Hz
19. Η μέση τετραγωνική τιμή επιτάχυνσης στην περιοχή 2000Hz-3000Hz
20. Η μέση τετραγωνική τιμή της ενέργειας στην περιοχή 2000Hz-3000Hz

Αυτά τα 20 χαρακτηριστικά δημιουργήθηκαν από την ανάλυση του αποθρομβωμένου σήματος σε όλη του την έκταση αλλά και σε πιο μικρές περιοχές αυτού. Τα χαρακτηριστικά που κυριαρχούν στον αλγόριθμο είναι η μέση τετραγωνική τιμή (RMS) της επιτάχυνσης και η μέση τετραγωνική τιμή της ενέργειας του σήματος σε συγκεκριμένες συχνοτικές περιοχές. Ο λόγος που επιλέχτηκαν αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η συμπεριφορά τους κατά την διάρκεια του φαινομένου. Όπως φαίνεται και από τα παρακάτω διαγράμματα η RMS τιμή είναι σταθερή σε όλη τη διάρκεια καλής λειτουργίας και οι τιμές της αυξάνουν αμέσως με την έναρξη της βλάβης (42° δείγμα).

Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται να εμφανίζεται και στην RMS τιμή της ενέργειας του σήματος στο επόμενο διάγραμμα. Στα δύο αυτά διαγράμματα ο κατακόρυφος άξονας αφορά την επιτάχυνση σε μονάδες (G) ενώ ο οριζόντιος άξονας αφορά τον αύξοντα αριθμό των δειγμάτων.



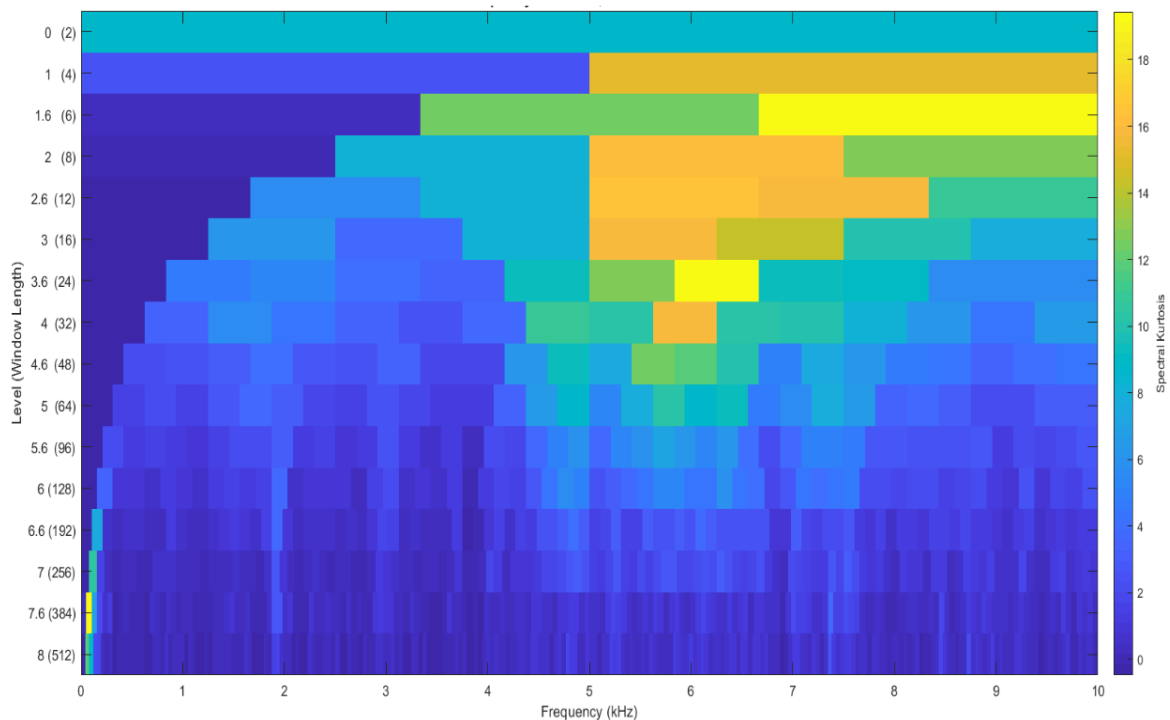
Διάγραμμα 19 Εξέλιξη RMS επιτάχυνσης σε κάθε δείγμα που χρησιμοποιήθηκε



Διάγραμμα 20 Εξέλιξη RMS επιτάχυνσης του σήματος στο φάσμα συχνότητας

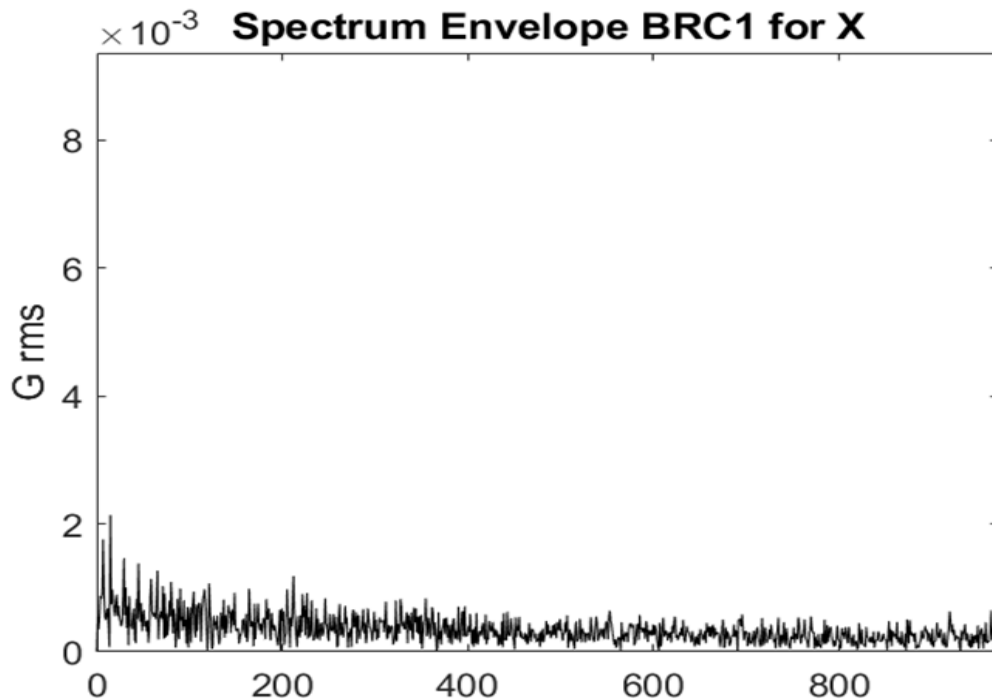
Το σήμα αναλύεται σε διαφορετικές συχνοτικές περιοχές με τις τρεις πρώτες συχνοτικές περιοχές να είναι οι : 100-400Hz, 500-1000Hz και 2000-3000Hz. Για την απομόνωσή τους χρησιμοποιήθηκε ζωνοπερατό φίλτρο. Στη συνέχεια, έγινε μετασχηματισμός του σήματος μέσω της μεθόδου Hilbert και χρήση της απόλυτης τιμής των πλατών του σήματος που προκύπτουν (Envelope).

Στο μόνο που διέφερε η ανάλυση της τέταρτης συχνοτικής περιοχής, η οποία ήταν η 4000-6000Hz και δίνει την πληροφορία των υψηλών συχνοτήτων, είναι το ζωνοπερατό φίλτρο που χρησιμοποιήθηκε. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρήθηκε ότι τα χαρακτηριστικά που δημιουργήθηκαν σε αυτή την περιοχή είχαν καλύτερα αποτελέσματα στην μετέπειτα μηχανική μάθηση με τη χρήση του ζωνοπερατού φίλτρου Butterworth 5^{ης} τάξης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αρχικά υπήρχε η πρόθεση η τέταρτη αυτή συχνοτική περιοχή να μην είναι μεταξύ σταθερών τιμών που δηλώνει ο προγραμματιστής αλλά γύρω από την συχνότητα με τη μεγαλύτερη κύρτωση για κάθε σήμα, πληροφορία που προκύπτει από το κυρτόγραμμα, (βλ. Διάγραμμα 21). Παρόλα αυτά αποδείχθηκε ότι αυτό είχε αρνητική επίδραση στην απόδοση της μεθόδου μηχανικής μάθησης οπότε και απορρίφθηκε.



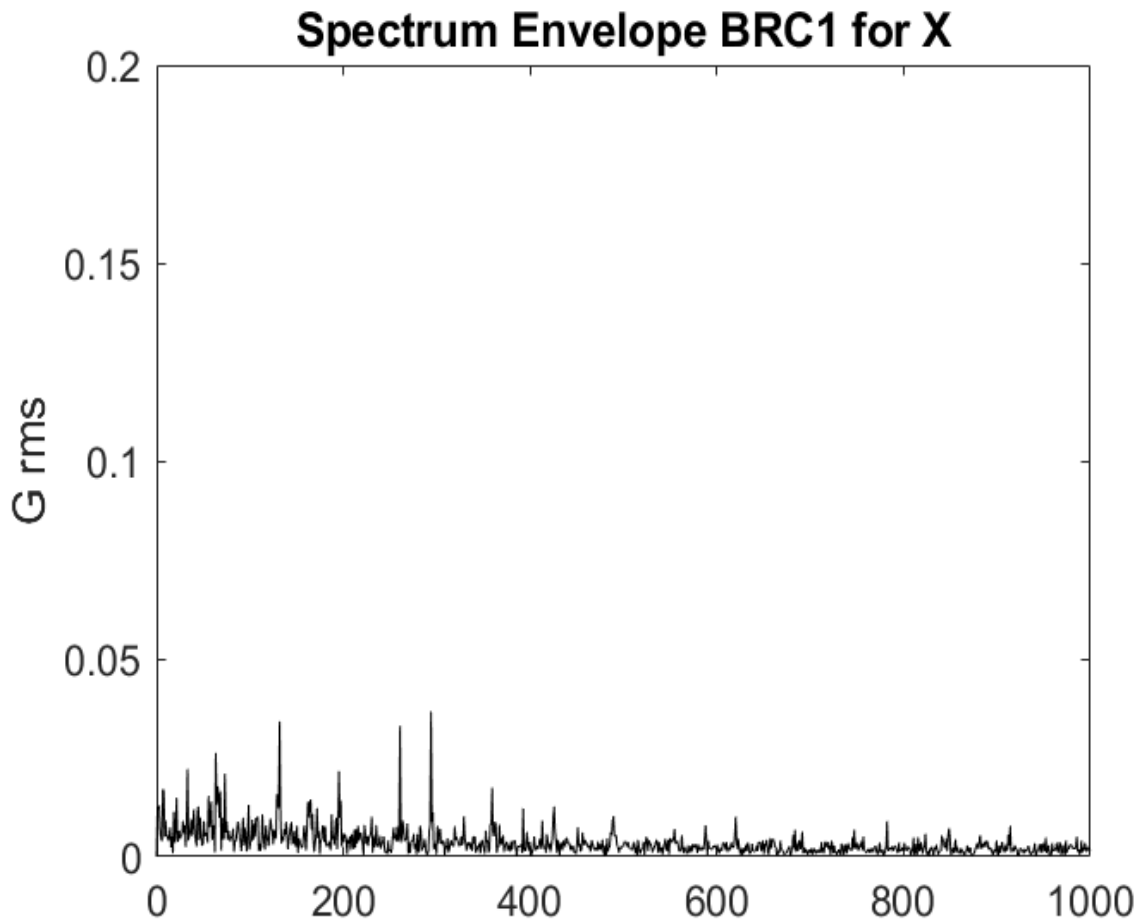
Διάγραμμα 21 Κυρτόγραμμα 62^{ου} σήματος – Σει 1 (φθορά εσωτ. δακτυλίου σε εξέλιξη)

Στο Διάγραμμα 22 βλέπουμε την κυματομορφή του μετασχηματισμένου κατα Fourier πρώτου δείγματος (1^ο δειγμα-Σετ 1) μετά τον μετασχηματισμό Hilbert και του υπολογισμού της περιβάλλουσας. Η περιοχή που απομονώθηκε από το ζωνοπερατό φίλτρο ήταν 4kHz-6kHz που όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 21, συγκεντρώνει την μεγαλύτερη ενέργεια.



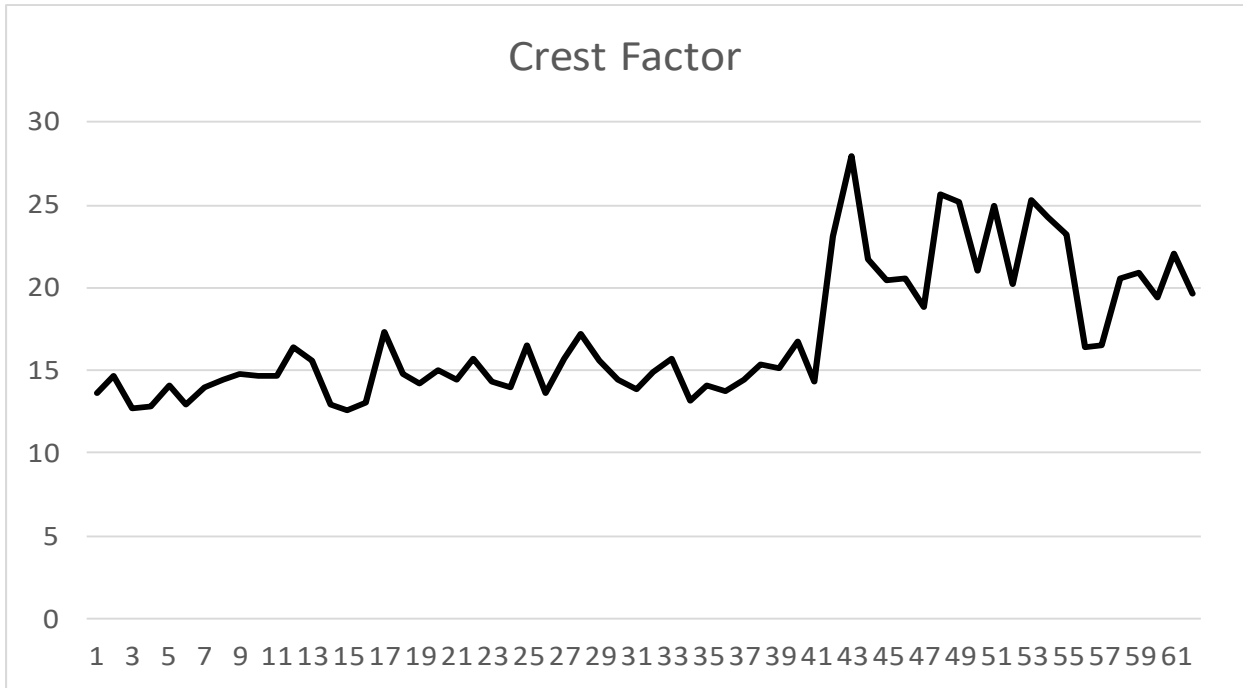
Διάγραμμα 22 RMS επιτάχυνσης στο φάσμα συχνότητας περιοχή 4kHz-6kHz(1^ο δείγμα)

Ενώ στο Διάγραμμα 23 δίνεται η ίδια κυματομορφή για το τελευταίο δείγμα που εξετάστηκε από την 1^η καταγραφή. Οι διαφορές ανάμεσα στις δύο κυματομορφές είναι εμφανείς τόσο στα πλάτη γενικότερα της επιτάχυνσης όσο και στην εμφάνιση έντονων κορυφών (spikes) σε διάφορες αρμονικές.



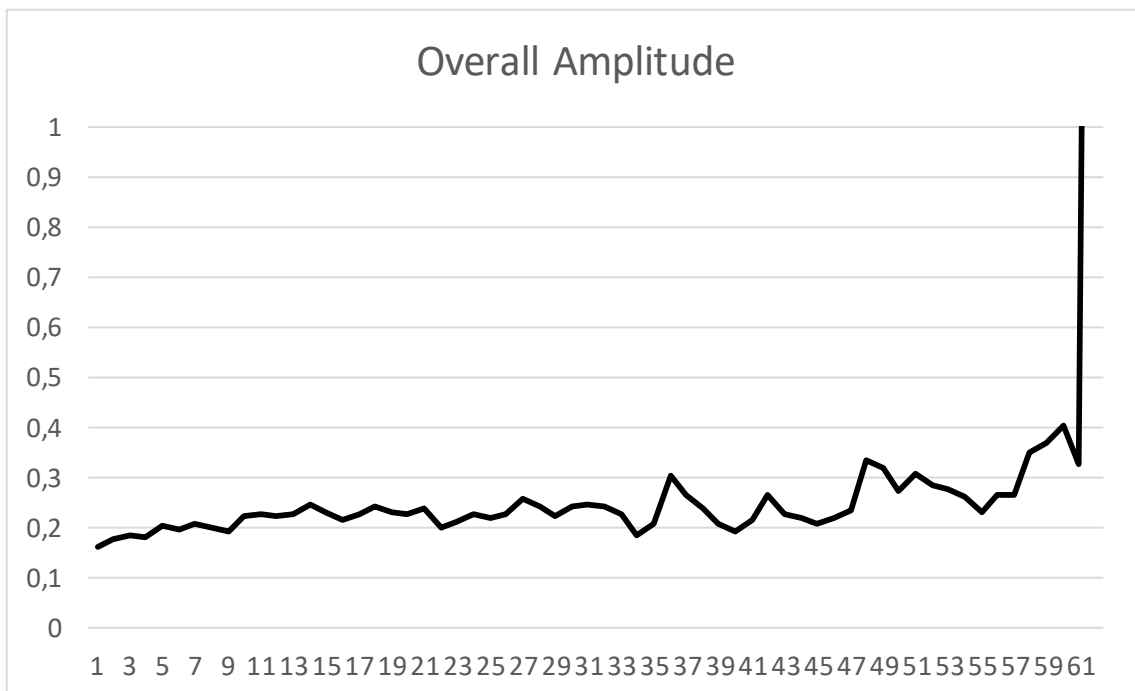
Διάγραμμα 23 RMS επιτάχυνσης στο φάσμα συχνότητας περιοχή 4kHz-6kHz(62° δείγμα)

Το γεγονός ότι όσο εξελισσόταν το φαινόμενο εμφανίζονταν έντονες κορυφές στο σήμα οδήγησε στη δημιουργία του χαρακτηριστικού του δείκτη κορυφής (Crest Factor). Όπως παρατηρήθηκε ο δείκτης αυτός που αναδεικνύει την οξύτητα των παλμών, λάμβανε όλο και μεγαλύτερες τιμές όσο το φαινόμενο του σφάλματος εσωτερικού δακτυλίου αναπτυσσόταν στην 1^η καταγραφή όσο και στη 2^η όπου το σφάλμα ήταν η βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο του εδράνου.

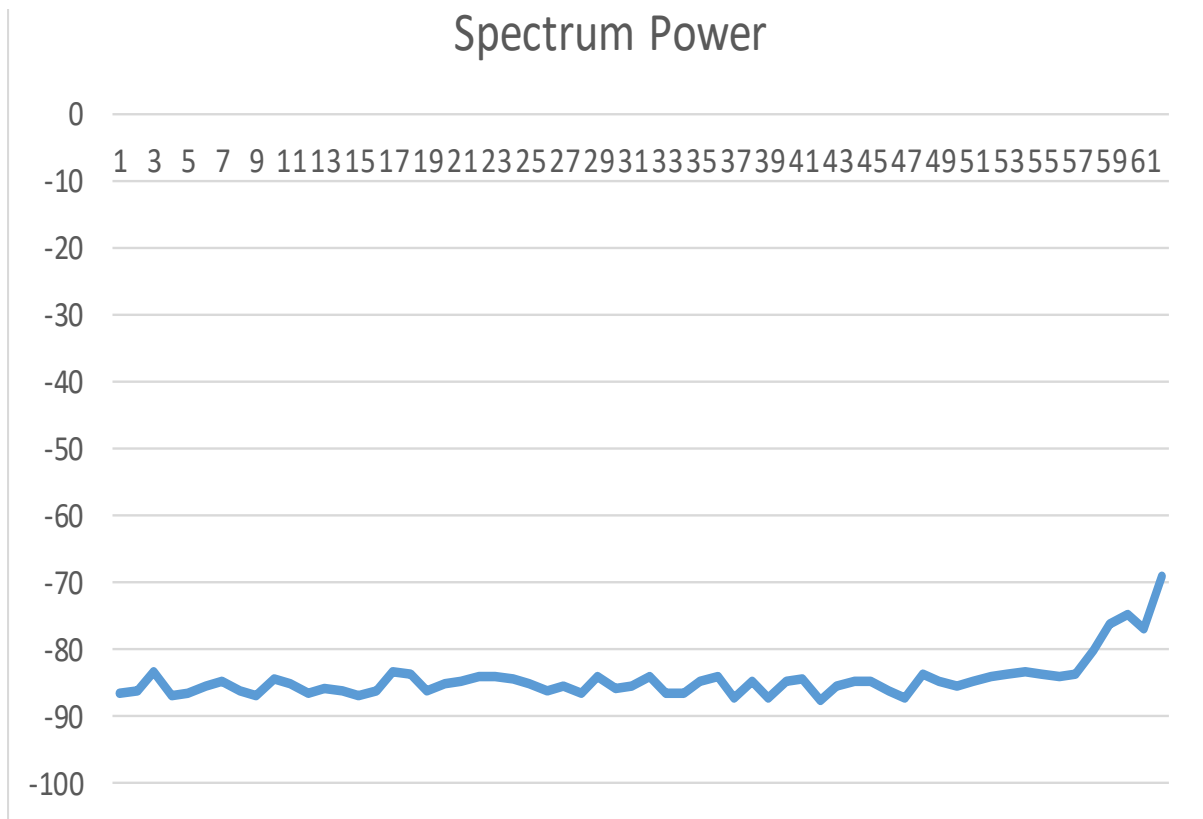


Διάγραμμα 24 Δείκτης κορυφής για κάθε δείγμα (1^η Καταγραφή)

Ο δείκτης κορυφής (βλ. Διάγραμμα 24) χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων και στις μεμονομένες περιοχές σε αντίθεση με το ολικό πλάτος, το οποίο εφαρμόζεται στο σύνολο του σήματος. Στο Διάγραμμα 25 που ακολουθεί αναδεικνύεται η εξέλιξη του ολικού πλάτους του χρονικού σήματος κατα την εξέλιξη του φαινομένου .



Διάγραμμα 25 Εξέλιξη ολικού πλάτους σήματος για κάθε δείγμα (1^η Καταγραφή)



Διάγραμμα 26 Εξελιξη ισχύος του σήματος (1^η Καταγραφή)

Το σύνολο των 20 χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της παρούσας εργασίας, ολοκληρώνουν οι τιμές κύρτωσης στις τέσσερις συχνοτικές περιοχές (100-400Hz, 500-1000Hz, 2000-3000Hz και 4000-6000Hz) και η φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος (βλ. Διάγραμμα 26) στις περιοχές 100-1000Hz, 2000-3000Hz, 3000-4000Hz. Οι συχνοτικές περιοχές που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή κάθε χαρακτηριστικού προέκυψαν έπειτα από δοκιμές.

4.5 Μηχανική μάθηση – Ταξινόμηση λειτουργικής κατάστασης

Εφόσον κατα την ανάπτυξη του αλγορίθμου έχουν δημιουργηθεί τα χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν προς εξαγωγή, μπορεί να προχωρήσει η επίλυση του βασικού θέματος το οποίο πραγματεύεται η παρούσα εργασία, δηλαδή ο καθορισμός της λειτουργικής κατάστασης της «υγείας» του συναρμολογήματος της ατράκτου μέσω της λειτουργικής κατάστασης των εδράνων. Η μηχανική μάθηση είναι το κομμάτι εκείνο του αλγορίθμου, το οποίο εκτελεί τους απαραίτητους υπολογισμούς για την κατάταξη κάθε δείγματος σε μία από τις πιθανές λειτουργικές καταστάσεις. Ουσιαστικά αυτό που προτείνει η καθεμία από αυτές τις μεθόδους είναι ένας διαφορετικός ταξινομητής.

Λόγω του πλήθους των χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, της εύκολης χρήσης αλλά και των αποτελεσμάτων που πετυχαίνουν σε προβλήματα ταξινόμησης, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν τα νευρωνικά δίκτυα (ΤΝΔ) και συγκεκριμένα μέσω της εργαλειοθήκης του Matlab (nnstart). Η εξ'ορισμού σύνθεση της μεθόδου που παρέχει η εργαλειοθήκη αυτή για ταξινόμηση είναι τα «ρηχά» νευρωνικά δίκτυα δύο επιπέδων με πρόσθια τροφοδότηση (two layer feed-forward network). Το γραφικό περιβάλλον διεπαφής (GUI) του Matlab δίνει τη δυνατότητα να επιλέχθει ο αριθμός των νευρώνων (στο Hidden layer) που θα χρησιμοποιηθούν (προεπιλεγμένη τιμή ίση με 10), όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση αυξήθηκαν σε 20 για μεγαλύτερη ακρίβεια αφού μετά απο δοκιμές παρουσιάστηκαν καλύτερα ποσοστά επιτυχίας απο την χρήση 10 νευρώνων στο δίκτυο. Η αρχιτεκτονική του ΤΝΔ ήταν 20x20x3.

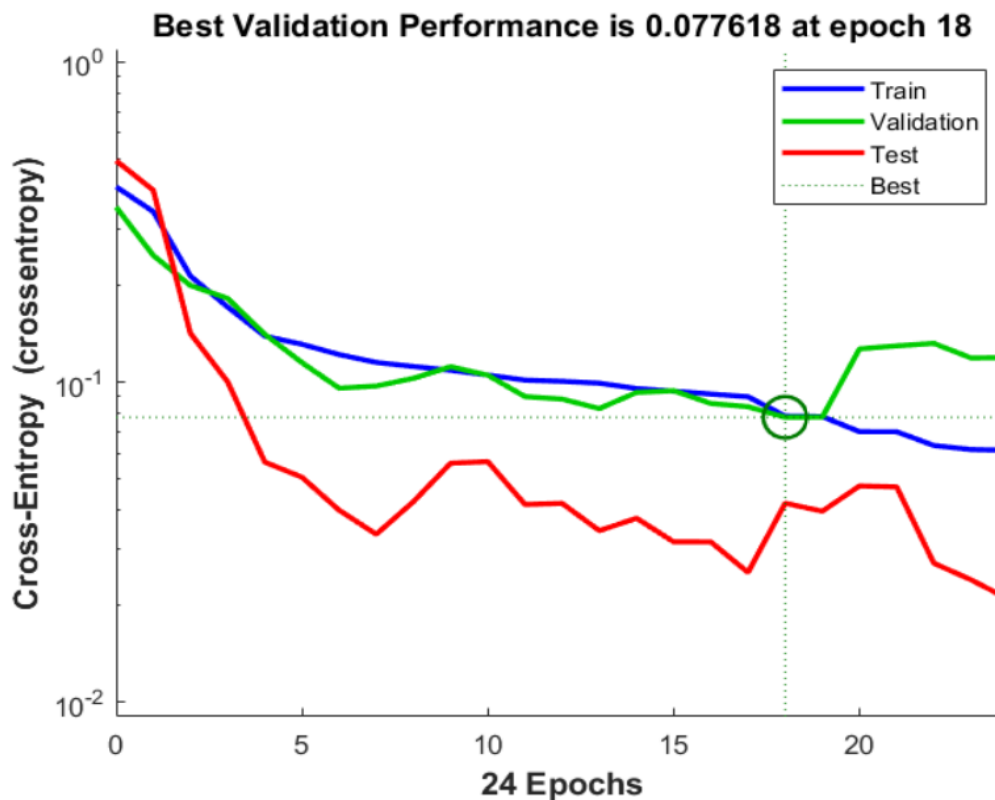
Τα χαρακτηριστικά που είχαν εξαχθεί έως τώρα χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του μοντέλου ΤΝΔ. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα χαρακτηριστικά από 30 δείγματα καλής λειτουργίας και 22 δείγματα με σφάλμα εσωτερικού δακτυλίου. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν 30 δείγματα καλής λειτουργίας και 20 δείγματα με σφάλμα εξωτερικού δακτυλίου.

Ένας απο τους βασικότερους τρόπους διαχωρισμού των μεθόδων ταξινόμησης είναι ο βαθμός επιτήρησης της μεθόδου απο τον προγραμματιστή. Καθότι η μέθοδος που επιλέξαμε εμείς είναι επιτηρούμενη σαν είσοδος στο σύστημα έπρεπε να δοθεί και ο χαρακτηρισμός της λειτουργικής κατάστασης κάθε δείγματος προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εκπαίδευση. Ετσι, χρησιμοποιήθηκε ένας πίνακας εξόδου διαστάσεων 102x3 όπου η πρώτη στήλη αντιπροσωπεύει την καλή λειτουργική κατάσταση, η δεύτερη τη φθορά εσωτερικού δακτυλίου και η τρίτη τη φθορά εξωτερικού δακτυλίου. Σε κάθε σειρά, που αντιπροσώπευε κάθε δείγμα που χρησιμοποιήθηκε, υπήρχε η μηδενική τιμή στις λειτουργικές καταστάσεις που δεν το αντιπροσώπευαν και η τιμή 1 στην στήλη που το χαρακτήριζε.

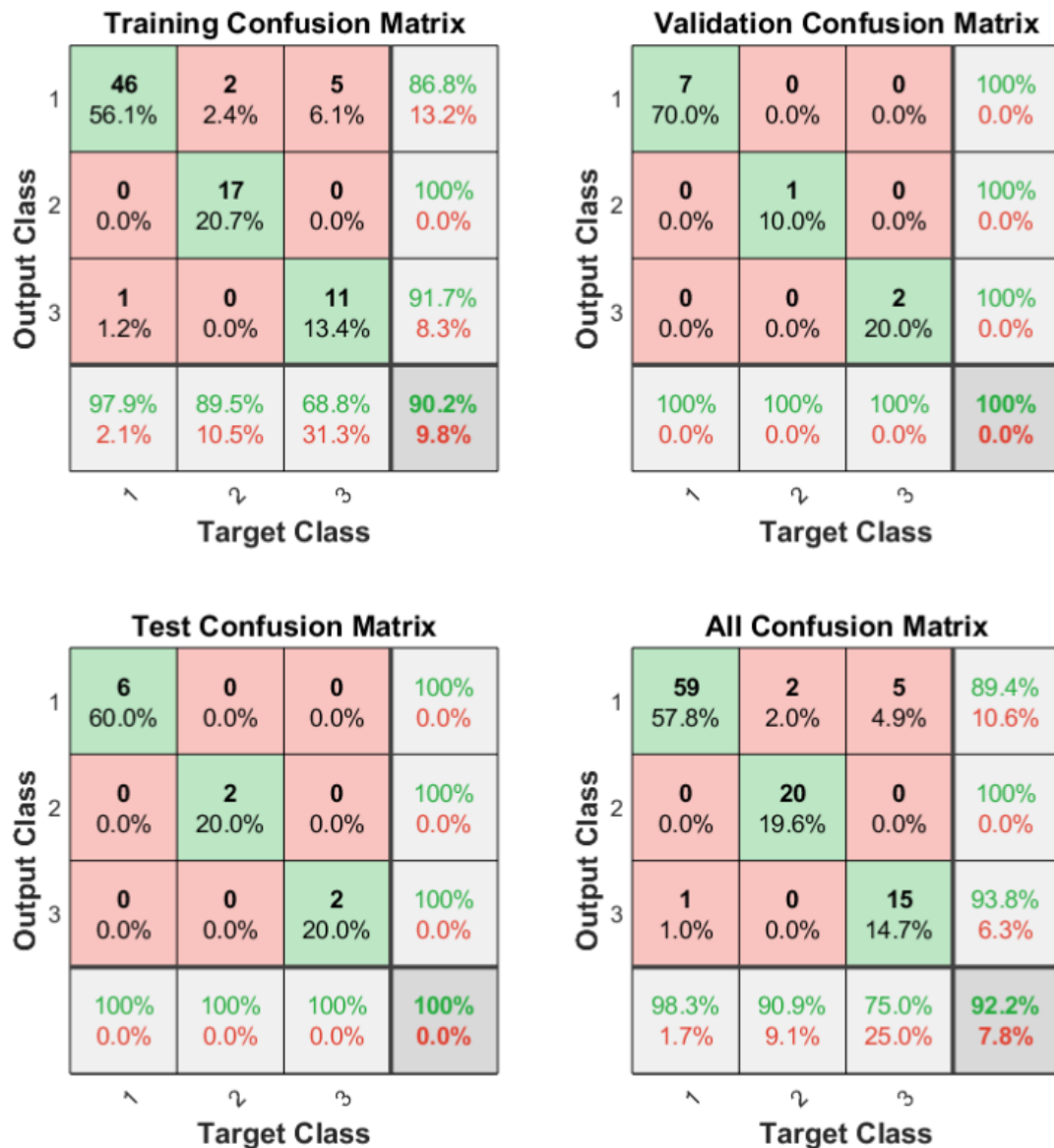
Πρίν ξεκινήσει η εκπαίδευση, απαραίτητος ήταν και ο προσδιορισμος των υποσυνόλων εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου που θα χρησιμοποιηθούν απο τον αλγόριθμο. Δηλαδή, πόσα απο τα δείγματα εισόδου θα χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση ώστε το δίκτυο να προσαρμοστεί ανάλογα με το σφάλμα τους, πόσα για την επικύρωση που είναι τα δείγματα που υποδεικνύουν την ικανότητα γενίκευσης του δικτύου και διακόπτουν την διαδικασία όταν σταματά η μείωση του σφάλματος και πόσα για την αξιολόγηση όπου τα δείγματα αυτά δεν παρεμβαίνουν στη διαδικασία εκπαίδευσης αλλά αποτελούν άγνωστα δεδομένα που ποσοτικοποιούν την ικανότητα γενίκευσης του νευρωνικού δικτύου. Ο καταμερισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο παρακάτω:

- 80% Training (82 δείγματα)
- 10% Validation (10 δείγματα)
- 10% Testing (10 δείγματα)

Η εκπαίδευση του μοντέλου ΤΝΔ επαναλήφθηκε αρκετές φορές έως ότου επιτευχθεί ένα μικρό μέσω τετραγωνικό σφάλμα ανάμεσα στα αποτελέσματα. Πιο αναλυτικά, τα αποτελέσματα του μοντέλου απο τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 90.2% κατά την εκπαίδευση, 100% κατά την επικύρωση (Validation) και 100% κατά την αξιολόγηση (Test), όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα όπου βλέπουμε την μείωση της εντροπίας του συστήματος (cross-entropy) κατά τη διάρκεια την εκπαίδευσης (βλ. Πίνακα 7).



Διάγραμμα 27 Διάγραμμα απόδοσης νευρωνικού δικτύου



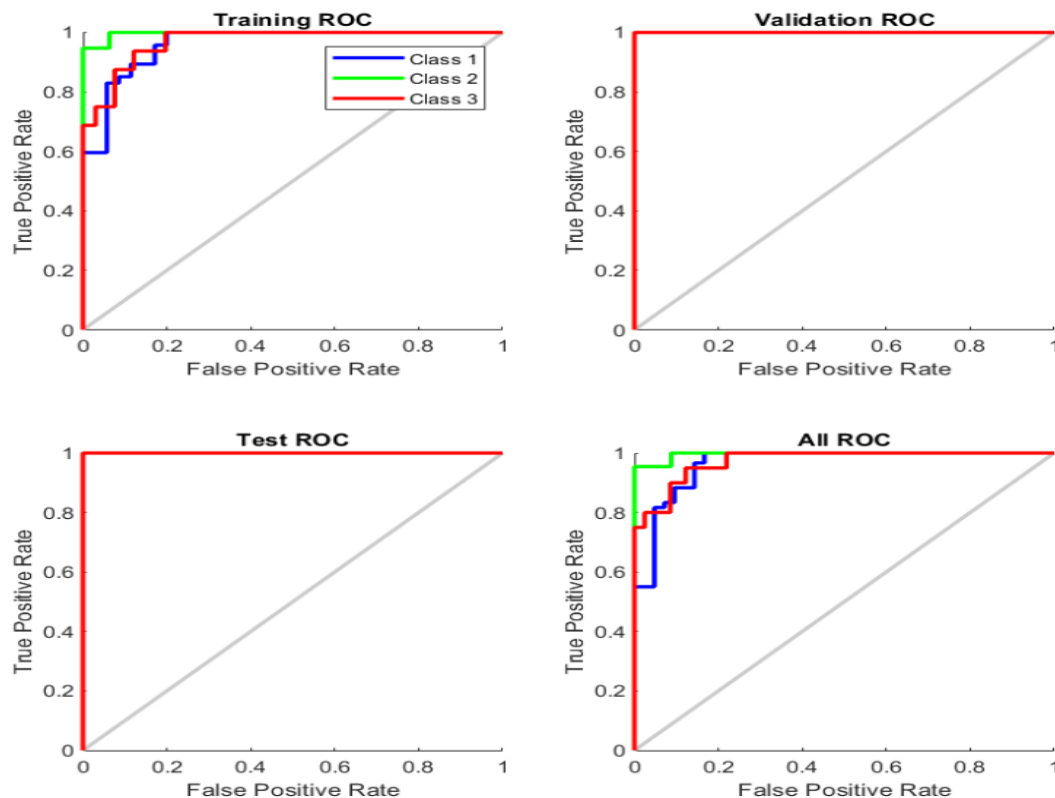
Πίνακας 7 Πίνακας σύγχυσης

Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται οι πίνακες σύγχυσης της διαδικασίας εκπαίδευσης του μοντέλου ΤΝΔ, στους οποίους φαίνεται ότι στο υποσύνολο εκπαίδευσης υπήρξαν συνολικά 8 λάθος ταξινομήσεις δειγμάτων στην κατάλληλη λειτουργική κατάσταση. Για το υποσύνολο επικύρωσης δεν υπάρχει καμία λάθος ταξινόμηση της κατάστασης απο τα 10 δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν ενώ και για το υποσύνολο ελέγχου, όπου χρησιμοποιήθηκαν επίσης 10 δείγματα, δεν υπήρξε καμία λάθος ταξινόμηση. Τα παραπάνω αποτελέσματα ήταν απολύτως ικανοποιητικά και οδήγησαν στην περαιτέρω χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου ΤΝΔ.

Μια χρήσιμη απεικόνιση της απόδοσης του μοντέλου ΤΝΔ που αναπτύχθηκε είναι μέσω του διαγράμματος ROC (Receiver Operating Characteristic). Η καμπύλη ROC αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της απόδοσης ενός δυαδικού ταξινομητή όσον αφορά την ικανότητά του να διαχωρίζει τις δύο κλάσεις. Πρόκειται για ένα διάγραμμα που αποτελείται από το ποσοστό των False Positives στον άξονα Χ και το ποσοστό των True Positives στον άξονα Υ. Η καμπύλη ROC καταγράφει το ποσοστό των λάθος προβλέψεων έναντι του ποσοστού επιτυχίας.

Αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για δύο βασικούς λόγους:

- Οι καμπύλες διαφορετικών μοντέλων μπορούν να συγκριθούν άμεσα.
- Η περιοχή κάτω από την καμπύλη (Area Under the Curve – AUC δίνει το ποσοστό πιθανότητας σωστού διαχωρισμού μεταξύ των δύο κλάσεων.



Διάγραμμα 28 Διαγράμματα ROC για τα υποσύνολα εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου.

Τα παραπάνω αποτελέσματα καθορίζονται εξ ολοκλήρου από τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του μοντέλου ΤΝΔ.

Για τον περαιτέρω έλεγχο της απόδοσης του ανεπτυγμένου μοντέλου ΤΝΔ, χρησιμοποιήθηκαν επίσης και άλλα 400 δείγματα από την 2η καταγραφή του συνόλου

δεδομένων του IMS. Από τις πειραματικές μετρήσεις είναι γνωστό ότι η βλάβη στη 2η καταγραφή αφορά την φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο (κατηγορία 3) και εμφανίζεται από το 300-στό δείγμα και έπειτα.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο ΤΝΔ ήταν αρκετά καλά σημειώνοντας απόδοση 91%. Πιο αναλυτικά, σημειώθηκαν 36 λάθος εκτιμήσεις λειτουργικής κατάστασης στα 400 δείγματα.

Test Confusion Matrix			
Output Class	281 93,6%	19 6,33%	93,66% 6,33%
	17 17%	83 83%	83% 17%
	94,2% 5,8%	81,3% 18,7%	91% 9%

Πίνακας 8 Πίνακας σύγκρισης αξιολόγησης

4.6 Πρόβλεψη εκτιμώμενου χρόνου ζωής του εδράνου

Το τελευταίο βήμα ανάπτυξης του αλγορίθμου για τον καθορισμό παραμέτρων λειτουργικής κατάστασης του συναρμολογήματος της ατράκτου αποφασίστηκε να είναι η πρόβλεψη του εκτιμώμενου χρόνου ζωής του εδράνου ολίσθησης, εφόσον φυσικά το εκπαιδευμένο ΤΝΔ δώσει σαν εκτίμηση ότι το έδρανο δεν παρουσιάζει ήδη κάποια βλάβη (κατηγορία 1). Η πρόβλεψη αυτή είναι πολύ σημαντική, καθώς στα πλαίσια της προβλεπτικής συντήρησης, είναι κρίσιμο να ανγνωρίζονται έγκαιρα οι πιθανές βλάβες/αστοχίες στον εξοπλισμό και να προγραμματίζονται οι απαραίτητες διορθωτικές ενέργειες (προμήθεια ανταλλακτικών, χρονικός προγραμματισμός επισκευής/αντικατάστασης) για να αποφευχθεί η πιθανότητα σταματήματος του εξοπλισμού και κατά συνέπεια της παραγωγής.

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της υπολειπόμενης ζωής του εδράνου ήταν αυτό της εκθετικής υποβάθμισης (exponential degradation model) [11]. Το μοντέλο αυτό ανήκει στην γενικότερη οικογένεια μοντέλων υποβάθμισης που προσφέρει το λογισμικό Matlab μαζί με το μοντέλο γραμμικής υποβάθμισης. Το γραμμικό μοντέλο υποβάθμισης αποφασίστηκε να μην χρησιμοποιηθεί καθότι σχεδόν όλα τα χαρακτηριστικά εμφανίζουν ένα εκθετικό, και όχι γραμμικό, προφίλ καθώς το φαινόμενο εξελίσσεται. Για την πρόβλεψη της υπολειπόμενης ζωής προσφέρονται και δύο ακόμα οικογένειες μοντέλων, τα μοντέλα ομοιοτήτων (similarity models) και τα μοντέλα επιβίωσης (survival models), τα οποία όμως απαιτούν δεδομένα διαφορετικής μορφής (πχ πολλά έδρανα με παρόμοια

λειτουργική συμπεριφορά και τρόπο αστοχίας) σε σχέση με τα διαθέσιμα στο σύνολο του IMS.

Το μοντέλο εκθετικής υποβάθμισης λειτουργεί σύμφωνα με την παρακάτω θεωρία:

$$S(t) = \phi + \theta(t)e^{\left(\beta(t)t + \varepsilon(t) - \frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (5)$$

, όπου:

Φ : είναι η τιμή διακοπής του μοντέλου, μπορεί να αρχικοποιηθεί σαν το κατώτατο όριο ή το ανώτατο όριο ανάλογα με το εάν το σήμα « θ » είναι θετικό ή αρνητικό.

$\Theta(t)$: είναι μια τυχαία μεταβλητή με λογαριθμική κατανομή με μέση τιμή Θ και τυπική απόκλιση Θ Variance.

$\beta(t)$: είναι μια τυχαία μεταβλητή με κανονική κατανομή με μέση τιμή β και τυπική απόκλιση β Variance.

$\varepsilon(t)$: είναι ο θόρυβος που προσθέτει το μοντέλο ενώ σ^2 αποτελεί τη τιμή κατανομής του θορύβου.

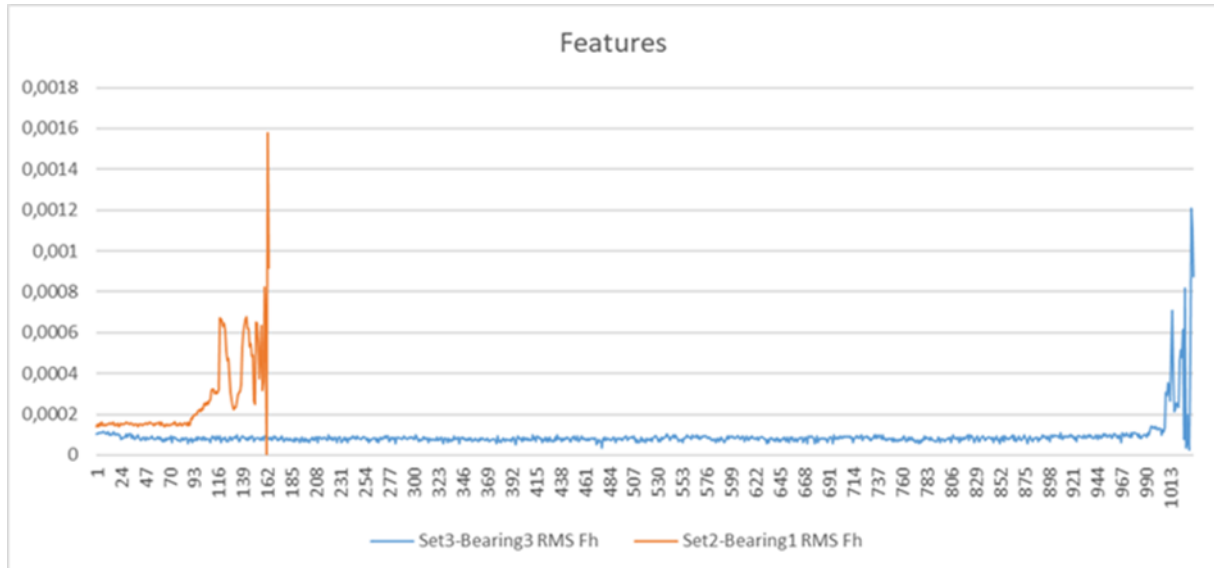
Ο τρόπος που λειτουργεί το μοντέλο εκθετικής υποβάθμισης είναι ο εξής: δίνονται χαρακτηριστικά από γνωστές καταγραφές τα οποία εμφανίζουν μια συγκεκριμένη τάση όσο το φαινόμενο εξελίσσεται. Στο μοντέλο δίνεται μια τιμή-κατώφλι, η οποία έχει παρατηρηθεί ότι για τα δείγματα που έχουν δοθεί στο μοντέλο υποδεικνύει ότι το στοιχείο έχει φτάσει στο τέλος της ζωής του. Στη συνέχεια, το ίδιο χαρακτηριστικό συλλέγεται για το υπό διερεύνηση σήμα για τακτά χρονικά διαστήματα και μέχρι την στιγμή εκείνη. Κάθε φορά που συλλέγονται νέες τιμές του χαρακτηριστικού αυτού για το ίδιο στοιχείο γίνεται ανανέωση του μοντέλου πρόβλεψης, το οποίο εκτιμά τον χρόνο στον οποίο θα φτάσει το χαρακτηριστικό αυτό στην κρίσιμη τιμή φθοράς.

Πιο συγκεκριμένα, για να διερευνηθεί η λειτουργία αυτού του μοντέλου για το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν οι δειγματοληψίες για κάθε ώρα από το Εδρανο 3 – Σετ 3, το οποίο εμφανίζει φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο. Σαν χαρακτηριστικό σύγκρισης αποδείχθηκε καλύτερο, μέσω διαδικασίας δοκιμής και σφάλματος ανάμεσα στα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, να χρησιμοποιηθεί η μέση τετραγωνική τιμή (RMS) ενέργειας του σήματος στο φάσμα της συχνότητας, έπειτα από μετασχηματισμό Hilbert στην συχνοτική περιοχή 4000-6000Hz.

Η καταγραφή των επιταχύνσεων του Εδράνου 3 – Σετ 3, αποτελείται συνολικά από 1034 δείγματα (δείγμα /ώρα) και η κρίσιμη τιμή του χαρακτηριστικού επιλέχθηκε να είναι $4 \cdot 10^{-4}$. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε μετά την γραφική αξιολόγηση του χαρακτηριστικού αυτού αφού

όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 29 όταν το χαρακτηριστικό φτάσει να πάρει την τιμή $4 \cdot 10^{-4}$, η φθορά βρίσκεται σε πλήρη εξέλιξη και οδεύει στην τελική της φάση.

Η καταγραφή που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο του μοντέλου ήταν αυτή του Εδράνου 1 – Σετ 2 για το οποίο είναι γνωστό ότι εμφανίζει το ίδιο σφάλμα (φθορά εξωτερικού δακτυλίου) κάποια στιγμή και αποτελείται από 163 δείγματα/ώρα.



Διάγραμμα 29 RMS επιτάχυνσης στο φάσμα συχνότητας περιοχή 4kHz-6kHz για RUL

Χρησιμοποιώντας τις πρώτες 60 ώρες του Σετ 2 το μοντέλο προβλέπει μια διάρκεια ζωής άλλες 128 ώρες, δηλαδή συνολική διάρκεια ζωής 188 ώρες, η οποία είναι κοντά στην πραγματικότητα (163 ώρες συνολική διάρκεια) αλλά παρουσιάζει ένα σχετικό σφάλμα 15,3% (25 ώρες). Κάνοντας ανανέωση του μοντέλου για τις ώρες 61-100 δίνει υπολειπόμενη διάρκεια ζωής 118 ώρες, το οποίο είναι επίσης λάθος (σχετικό σφάλμα 33,7%) αλλά έχει μια τάση μείωσης που είναι ένα από τα ζητούμενα της διαδικασίας ελέγχου. Τέλος, κάνοντας ανανέωση του μοντέλου με τις ώρες 101-140 μας δίνει διάρκεια ζωής 0 ώρες το οποίο είναι σωστό γιατί όπως φαίνεται από το διάγραμμα το χαρακτηριστικό έχει ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή που τέθηκε.

Από το υπολογιστικό μοντέλο προκύπτει ότι η εξίσωση που χρησιμοποιείται για την εκθετική υποβάθμιση και κατ' επέκταση για την πρόβλεψη είναι η παρακάτω:

$$S(t) = 8.1449 \cdot 10^{-5} + 9.8844 \cdot 10^3 \cdot e^{\left(0.009t + \varepsilon(t) - \frac{36.163^2}{2}\right)} \quad (6)$$

Ο υπολογισμός του ποσοστού σφάλματος έγινε βάση της παρακάτω εξίσωσης:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i^*=1}^N |\Delta^{(i^*)}| \quad (7)$$

, όπου:

$$\Delta^{(i^*)} = \hat{R}^{(i^*)} - R^{(i^*)} \quad (8)$$

6. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι η εκτίμηση εμφάνισης βλάβης σε έδρανα κύλισης με τη χρήση του μοντέλου ΤΝΔ και η αρχική εκτίμηση της υπολειπόμενης διάρκειας ζωής (RUL) μπορούν να επιτευχθούν με μεγάλη και μέση ακρίβεια, αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε μπορεί να καθορίζει τις παραμέτρους κατάστασης της «υγείας» μιας εργαλειομηχανής, μέσω πρόβλεψης της κατάστασης των εδράνων κύλισης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στον αλγόριθμο δεν χρησιμοποιήθηκαν οι συχνότητες βλάβης των συγκεκριμένων εδράνων της διάταξης, αλλά συχνοτικές περιοχές με αποτέλεσμα ο ίδιο αλγόριθμος να μπορεί να ανταποκριθεί σε μια οικογένεια εδράνων. Για να χρησιμοποιηθεί ο κώδικας της συγκεκριμένης εργασίας απευθείας σε μια άτρακτο εργαλειομηχανής δεν θα χρειαστεί πάρα μόνο μερικές μετατροπές καθότι τα σήματα πάνω στα οποία στηρίχτηκε αναφέρονται σε συγκεκριμένη διάταξη των εδράνων και συγκεκριμένο φορτίο που ασκείται συνεχώς. Όσον αφορά την πρόβλεψη της υπολειπόμενης ζωής των εδράνων, η μέθοδος εκθετικής υποβάθμισης φαίνεται να λειτουργεί ικανοποιητικά παρόλα αυτά το σύνολο μετρήσεων του IMS που χρησιμοποιήθηκε δεν θεωρείται μια ασφαλής προσέγγιση καθώς είναι λίγα τα δείγματα εδράνων που εμφανίζουν παρόμοια φθορά ώστε να χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση του μοντέλου.

Γενικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε πετυχαίνει τους στόχους του καθώς δεν απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό φορτίο και συνδυάζει τεχνικές από την μέχρι τώρα έρευνα με καλά αποτελέσματα.

Η φυσική εξέλιξη αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας είναι η προσαρμογή του κώδικα σε πραγματικές μετρήσεις που εξετάζουν τη λειτουργική κατάσταση ενός εδράνου ατράκτου κέντρου κατεργασίας. Θα παρουσίαζε επίσης ενδιαφέρον, το να μεταφερθεί ο κώδικας σε συσκευή βασισμένη σε μικροελεγκτή για να μπορεί να εκτιμάται η λειτουργική κατάσταση των εδράνων το συναρμολογήματος της ατράκτου, απευθείας στο πεδίο. Ακόμα, απαραίτητη κρίνεται η επιπλέον προσπάθεια βελτίωσης του εκθετικού μοντέλου υποβάθμισης για την εκτίμηση της υπολειπόμενης διάρκειας ζωής (RUL). Τέλος, θα μπορούσε να γίνει μια συγκριτική έρευνα χρησιμοποιώντας πραγματικές μετρήσεις από συναρμολόγημα ατράκτου σχετικά με το ιδανικό μοντέλο μηχανικής μάθησης για αυτή την εφαρμογή.

7. Βιβλιογραφία

- [1] Qiu H. , Lee J., Lin J., Gang Y. “Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics”, *Journal of Sound and Vibration* 289(4):1066-1090 , 2006
- [2] Αντωνιάδης Ι. , Γιακόπουλος Χ. , “Machine Dynamic Notes”, “Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις” ,ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού, ΕΜΠ, 2010
- [3] “Condition Monitoring” Image <https://www.tuv.com/tunesi>
- [4] Christiansen B. “A Complete Guide To Condition Based Maintenance”, Limble CMMS,2018
- [5] Werner A., “An Early Warning Monitoring System for CNC Spindle Bearing Failure” ,Clemson University , All Theses. 1235, 2011
- [6] Perez T., “Study of vibration severity assessment for Machine Tool spindles within Condition Monitoring”, KTH, Stockholm, 2015
- [7] Zapciu M.,K’nevez J.,Laheurte R., Darnis P., “ Dynamic characterization and Predictive Maintenance Concept of Machine Tool Spindle”,*Applied Mechanics and Materials* ,Vol.2, 2011, pp.147-154
- [8] Konar P., Chattopadhyay P., “Bearing fault detection of induction motor using wavelet and Support Vector Machines”, Electrical Engineering Department, Bengal Engineering and Science University
- [9] Chow M.-Y., Mangum P. M., Yee S. O., “A neural network approach to real-time condition monitoring of induction motors,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 38, no. 6, pp. 448–453, Dec. 1991.
- [10] Mahamad A.K., Saon S. and Hiyama T., “Predicting remaining useful life of rotating machinery based on artificial neural network”, *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 60, no 4, p. 1078-1087, 2010.
- [11] Gebraeel, Nagi. "Sensory-Updated Residual Life Distributions for Components with Exponential Degradation Patterns." *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. Vol. 3, Number 4, 2006, pp. 382–393.
- [12] Βοσνιάκος Γ.Χ. “Γενικές αρχές εργαλειομηχανών CNC” , “CAM και Εφαρμογές” , ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού, ΕΜΠ, 2000
- [13] Weck M., Koch A., “Spindle Bearing Systems for High-Speed Applications in Machine Tools”, *CIRP Annals Volume* 42, Issue 1, 1993, pp. 445-448
- [14] Abele E., Brecher C., Gsell S. C., Hassis A., Korff D., “Steps towards a protection system for machine tool main spindles against, crash-caused damages”, *Production Engineering volume* 6, pp.631–642,2012

- [15] Castelbajac, C., "Advance monitoring and improvement of HSM process". Original title: Surveillance avancée et amélioration du procédé d'UGV. Doctoral thesis of the University of Nantes ,2012
- [16] Abellan-Nebot J., Subiron F. 'A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models' Department of Industrial Systems Engineering and Design, Universitat Jaume ,2009
- [17] Boashash, B. "Time-Frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference", Oxford, 2003
- [18] "Teach Tough Concepts: Frequency Domain in Measurements" Diagram, <http://www.ni.com/tutorial/13042/en/>, 2018
- [19] Gousseau W., Antoni J., Girardin F., Griffaton J., "Analysis of the Rolling Element Bearing data set of the Center for Intelligent Maintenance Systems of the University of Cincinnati" CM2016, Charenton, France, 2016
- [20] "Wavelt denoising" wdenoise. (n.d.). Diagram, <https://www.mathworks.com/help/wavelet/ug/wavelet-denoising.html>
- [21] Soualhi A. Razik H. and Clerc G., et al. "Prognosis of bearing failures using hidden Markov models and the adaptive neuro-fuzzy inference system." IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no 6, p. 2864-2874, 2014
- [22] Rojas A., Nandi A. K., "Detection and classification of rolling element bearing faults using support vector machines," in Proc. IEEE Workshop on Mach. Learning Signal Process., Mystic, CT, USA, pp. 153–158, 2005
- [23] Zhang, J.Z. Chen, J.C. "Tool condition monitoring in an end-milling operation based on the vibration signal collected through a microcontroller-based data acquisition system". Int. J. Adv. Manuf. Technol. 39, pp.118–128 ,2008
- [24] Zhang R, Peng Z., Wu L., Yao B., Guan Y., "Fault Diagnosis from Raw Sensor Data Using Deep Neural Networks Considering Temporal Coherence", College of Information Engineering, Capital Normal University, Beijing 100048, China
- [25] Wang, X., Zheng, Y., Zhao, Z., Wang, J., "Bearing fault diagnosis based on statistical locally, linear embedding". Sensors 2015, 15, 16225–16247
- [26] Zhang S., Wang B., Habetler T. "Deep Learning Algorithms for Bearing Fault Diagnostics – A Comprehensive Review", IEEE,2020
- [27] Junnola J. "The Suitability of Low-Cost Measurement Systems for Rolling Element Bearing Vibration Monitoring" University of Oulu, Degree Program of Mechanical Engineering, 2017
- [28] Bilski, P. Winiiecki, W. "A low-cost real-time virtual spectrum analyzer" IEEE Trans. Instrum. Meas., 56, 2169–2174,2007

- [29] Swiszc G., Cruden A, Booth C., Leithead W. “Development of a Wind Turbine Condition Monitoring System” University of Strathclyde, Department of EEE, Glasgow, UK, 2008
- [30] Florin G., Luminita P., Constantin C., “Acquisition System for Monitoring Vibrations” In Novel Algorithms and Techniques In Telecommunications, Automation and Industrial Electronics, Springer: Dordrecht, The Netherlands, ,2008, pp. 89–92
- [31] Jamil, I.A., Abedin, M.I., Sarker D.K., Islam, J. “Vibration data acquisition and visualization system using MEMS accelerometer”. In Proceedings of the 2014 International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology, Dhaka, Bangladesh, 2014, pp. 1–
- [32] Merendino G., Pieracci, A., Lanzoni, M., Ricco B., “An embedded system for real time vibration analysis. In Proceedings of the 2011 4th IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI), Savelletri di Fasano, Italy ,2011,pp. 6–11
- [33] Villarroel A.,Zurita G., Velarde R. “Development of a Low-Cost Vibration Measurement System for Industrial Applications” Laboratory of Industrial Innovation Technology and Robotics, Universidad Privada Boliviana (UPB),2019
- [34] Αναστασιάδης Α., “Αυτόματη ταυτοποίηση έναρξης αυτοσυντηρούμενων ταλαντώσεων εργαλειομηχανών” ,Ε.Μ.Π , Αθήνα ,2019
- [35] Patel V., Patel M., “Development of Smart Sensing Unit for Vibration Measurement by Embedding Accelerometer with the Arduino Microcontroller”, International Journal of Instrumentation Science 2017, 6(1): 1-7DOI: 10.5923/j.instrument.20170601.01
- [36] Ali, J.B., Chebel-Morello B. and Saidi L. and al. “Accurate bearing remaining useful life prediction based on Weibull distribution and artificial neural network. Mechanical Systems and Signal Processing”, vol. 56, p. 150-172, 2015
- [37] Arun P., Lincon S. Abraham, Prabhakaran N., “Reliability of Using Characteristic Frequency Components for the Detection and Characterization of Bearing Faults”,7th International Conference on Advances in Computing & Communications, 2017, Cochin, India
- [38] Chang S.G., Yu. Bin, M.Vertelli, “Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression”, IEEE Transactions on Image Processing 9 (9) ,2000