

**ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ (ΕΔΡΑ ΣΠΑΡΤΗ)**



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΔΥΣΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕ ΕΔΡΑΝΑ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ»



ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

ΜΠΙΝΗ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ Α.Μ: 2012086

ΑΛΕΞΑΝΔΡΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ Α.Μ: 2008019

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΝΟΚΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΣΠΑΡΤΗ 2017

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Α
2. Β
3. Γ

Τόπος_____

Ημερομηνία_____

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνουμε ενυπογράφως ότι είμαστε αποκλειστικοί συγγραφείς της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχουμε αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάση επιστημονικής παράφρασης. Αναλαμβάνουμε την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαστε υπόλογοι έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην Πτυχιακή μας Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Τίτλου Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνουμε, συνεπώς, ότι αυτή η Πτυχιακή Εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμάς προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνουμε πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δε μας ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

Όνομα και Επώνυμο Συγγραφέων (Με Κεφαλαία):

.....

Υπογραφή (Ολογράφως, χωρίς μονογραφή):

.....

Ημερομηνία (Ημέρα – Μήνας – Έτος):

.....

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1 ^ο Κεφάλαιο: Εφαρμογή των ρουλεμάν	10
1.1 Τι είναι τα ρουλεμάν και που γίνεται η εφαρμογή τους	10
1.1.1 Ποια είναι η διαφορά μεταξύ των ρουλεμάν;.....	10
1.1.2 Αρχές επιλογής και εφαρμογής εδράνων	16
1.1.3 Εφαρμογές ρουλεμάν	17
2 ^ο Κεφάλαιο: Μια ανασκόπηση για την πρόβλεψη των στοιχείων των ρουλεμάν	20
2.1 Ορισμός της πρόγνωσης των ρουλεμάν.....	20
2.1.1 Προβλέψεις με βάση το μοντέλο	21
2.1.2 Προγνωστικές μέθοδοι που βασίζονται στην εμπειρία	22
2.1.3 Μέθοδοι που βασίζονται σε δεδομένα	22
2.2 Ανασκόπηση της πρόγνωσης των ρουλεμάν	23
3 ^ο Κεφάλαιο: Δομή του ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος χαρτοποιητικής μηχανής και του γεωργικού μηχανολογικού εξοπλισμού-Μέθοδοι διάγνωσης βλαβών.....	32
3.1 Λειτουργία των συστημάτων εδράνων της χαρτοποιητικής μηχανής [31] [32] [33] 32	
3.1.1 Φθορά και συντήρηση	32
3.2 Προληπτική συντήρηση και έλεγχος μηχανών - μέτρηση δονήσεων και κραδασμών.....	34
3.2.1 Αναφορά στις μεθόδους διάγνωσης [34]	34
3.3 Μέτρηση μηχανικών ταλαντώσεων	35
3.3.1 Μετρήσεις κατάστασης σε έδρανα κύλισης.....	35
3.4 Μέτρηση μηχανικών ταλαντώσεων [34]	41
3.4.1 Τύποι ταλαντώσεων στις μηχανές	41
3.5 Προοπτικές Εφαρμογών της μετρητικής διάταξης στη βιομηχανία	43
3.6 Προηγμένες μέθοδοι διάγνωσης βλαβών γεωργικού μηχανολογικού εξοπλισμού	44
3.7 Μέθοδοι μέτρησης παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος μηχανικής μετάδοσης της κίνησης	44
4 ^ο Κεφάλαιο: IEEE PHM 2012 Προγνωστική πρόκληση	49
Περίγραμμα, Πειράματα, Βαθμολόγηση αποτελεσμάτων	49

4.1	Επισκόπηση της IEEE PHM 2012 Προγνωστικής πρόκλησης.....	49
4.1.1	Η πρόγνωση της διάρκειας ζωής των εδράνων (ρουλεμάν).....	49
4.1.2	Challenge datasets	49
4.1.3	Αναγνώριση	50
4.2	Η πλατφόρμα PRONOSTIA.....	51
4.2.1	Περιγραφικά	51
4.2.2	Περιστρεφόμενο Μέρος	52
4.2.3	Μέρος φόρτισης	53
4.2.4	Μετρήσεις.....	54
4.3	Πειραματικό σετ δεδομένων για το IEEE PHM 2012 challenge	55
4.3.1	Υποβάθμιση της κατάστασης των ρουλεμάν: πειράματα μέχρι την αστοχία.....	55
4.3.2	ΣΕΤ δεδομένων challenge	56
4.4	Οργάνωση των δεδομένων	58
4.4.1	Χαρακτηριστικά λήψης δεδομένων	58
4.4.2	Αρχεία ASCII	59
4.5	Βαθμολογία αποτελεσμάτων και συμμετέχοντες με την υψηλότερη βαθμολογία	59
4.5.1	Βαθμολογία αποτελεσμάτων	59
4.5.2	Πραγματικός RUL για να υπολογισθεί	61
5 ^ο	Κεφάλαιο: Νέα προσέγγιση πρόγνωσης	62
5.1	Μια νέα προσέγγιση πρόγνωσης για ρουλεμάν με βάση την μείωση της εντροπίας και σύγκριση της με υπάρχουσες μεθόδους.....	62
5.2	Περιγραφή Δεδομένων	65
5.2.1	Δεδομένα FEMTO.....	66
5.2.2	Δεδομένα IMS.....	66
5.2.3	Τοπικά δεδομένα.....	67
5.3	Υφιστάμενες προσεγγίσεις για προγνωστικά χαρακτηριστικά.....	68
5.4	Νέα προσέγγιση χρησιμοποιώντας την ENTROPY.....	70
5.5	Αποτελέσματα.....	74
5.5.1	Δεδομένα FEMTO.....	74
5.5.2	LOCAL δεδομένα	78
5.5.3	Δεδομένα IMS.....	79
5.6	Συμπεράσματα.....	81
6 ^ο	Κεφάλαιο: Εκτίμηση της εναπομένουσας ωφέλιμης ζωής των ρουλεμάν με τη χρήση Μεθοδολογιών που βασίζονται σε δεδομένα (Data Driven).....	83

6.1.1	RUL μεθοδολογίες εκτίμησης.....	83
6.1.2	Σύγκριση μεθόδων εκτίμησης RUL.....	100
7°	Κεφάλαιο: Εκτίμηση της υπολειπόμενης ωφέλιμης ζωής των ρουλεμάν	102
7.1	Αξιολόγηση υπολειπόμενης χρήσιμης ζωής για συστήματα με μη ταλαντευόμενη συμπεριφορά.....	102
7.2	Πειραματικά Στοιχεία.....	104
7.3	Πρόγνωση βασισμένη σε δεδομένα	105
7.4	Προσέγγιση της εκτίμησης του σημείου	107
7.5	Κριτήρια Ακριβείας	112
7.6	Εκπαίδευση του προτεινόμενου μοντέλου	113
7.7	Η μέθοδος cross-entropy	114
7.8	Μελέτη Περίπτωσης	115
7.9	Συμπεράσματα.....	116
8°	Κεφάλαιο: Μετρήσεις στο Matlab	117
	Συμπεράσματα	128
9°	Κεφάλαιο: Επίλογος-Συμπεράσματα	129
	Βιβλιογραφία	131

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα έδρανο είναι ένα μηχανικό στοιχείο που όχι μόνο υποστηρίζει το φορτίο αλλά επιτρέπει και σχετική κίνηση μεταξύ δύο τμημάτων, όπως ο άξονας και το περίβλημα, με ελάχιστη τριβή. Είναι τα πιο συνηθισμένα εξαρτήματα που βρίσκονται σε περιστρεφόμενες μηχανές και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην καλή λειτουργία αυτών των μηχανημάτων.

Η παρουσία ελαττωμάτων σε έδρανα οδηγεί σε έντονες δονήσεις περιστρεφόμενων μηχανημάτων. Έγκαιρη ανίχνευση αυτών των σφαλμάτων και εκτίμηση του χρόνου μέχρι την αποτυχία είναι οι τομείς που απασχολούν τους ερευνητές γιατί απότομη βλάβη των εδράνων μπορεί να προκαλέσει δυσλειτουργία ολόκληρου του συστήματος και αυτό έχει ως αποτέλεσμα το χρόνο διακοπής της λειτουργίας του συστήματος και οικονομική ζημία στον πελάτη. Μια αστοχία του ρουλεμάν μπορεί επίσης να βλάψει τα μηχανήματα προκαλώντας υψηλές δαπάνες επισκευής ή και αντικατάστασης αυτών. Έτσι, για τις τελευταίες δεκαετίες, συντήρηση με βάση την κατάσταση (ΣΒΚ) έχει αποτελέσει το αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας. Ανίχνευση ελαττωμάτων, διάγνωση και πρόγνωση είναι τα τρία στηρίγματα ΣΒΚ. Η ανίχνευση περιλαμβάνει από τον καθορισμό ότι η ζημία έχει εμφανιστεί στο ρουλεμάν, ενώ η διάγνωση είναι ένας προσδιορισμός της θέσης και του τύπου του σφάλματος, ενώ η πρόγνωση περιλαμβάνει εκτίμηση της υπολειπόμενης διάρκειας ζωής του χαλασμένου ρουλεμάν και διερεύνηση των τρόπων αστοχίας. Ένας σημαντικός στόχος της ΣΒΚ είναι να προβλεφθεί η υγεία των μηχανημάτων ή η εναπομένουσα χρήσιμη ζωή (EXZ) αντ' αυτού από το χρόνο υπηρεσιών του, ο οποίος οδηγεί στην προσδοκώμενη χρήση της μηχανής, μείωση του χρόνου διακοπής και ενισχυμένη λειτουργική ασφάλεια.

Η εκτίμηση της υποβάθμισης της απόδοσης των εδράνων είναι πιο αποτελεσματική από τη διάγνωση βλαβών για την πραγματοποίηση της ΣΒΚ. Ο Palmgren και Lundberg [1-3] έχουν δώσει τα θεμέλια της ανάπτυξης μεθόδων πρόβλεψης της ζωής για τα ρουλεμάν που οδήγησε σε πρότυπα για την ταξινόμηση φορτίου και τη διάρκεια ζωής των εδράνων τροχαίου υλικού [4-6]. Ένα αποτελεσματικό πρόγραμμα προγνωστικών παρέχει επαρκή χρόνο για να προγραμματιστεί μια επισκευή και να

αποκτηθούν βοηθητικά εξαρτήματα πριν από την εμφάνιση καταστροφικών βλαβών.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν από μια ομάδα από το Center for Advanced Life Cycle Engineering (CALCE) στο Πανεπιστήμιο του Maryland για το διαγωνισμό IEEE 2012 PHM Data Challenge που πραγματοποιήθηκε από την IEEE Reliability Society και το Ινστιτούτο Femto-ST. Ο στόχος της ήταν να παρέχει την καλύτερη εκτίμηση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής (remaining usefull life RUL) των ρουλεμάν κάτω από πειραματικές συνθήκες. Το πειραματικό σύνολο δεδομένων παρέχεται από το Femto-ST Ινστιτούτο. Το σύνολο δεδομένων αποτελείται από έξι σύνολα εκπαίδευσης που λαμβάνονται από πειράματα και έντεκα σύνολα δοκιμών. Τα έξι σύνολα εκπαίδευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία προγνωστικών μοντέλων εκτίμησης της RUL. Στην συνέχεια τα μοντέλα μπορούν να δοκιμαστούν με τα υπόλοιπα 11 σετ δοκιμών. Το κύριο χαρακτηριστικό των παρουσιαζόμενων δεδομένων είναι η σημαντική απώλεια της τάσης στη συμπεριφορά των σημαντικών παραμέτρων (οριζόντια και κάθετη δόνηση), αποφεύγοντας έτσι τη χρήση γνωστών προτύπων πρόβλεψης RUL. Έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί νέα μοντέλα όπως η μέθοδος Cross-Entropy που χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων ελέγχου. Τα επιτευχθέντα αποτελέσματα καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της προσέγγισης για την εκτίμηση της RUL(ωφέλιμη διάρκεια ζωής).

Επίσης, σε αυτή την εργασία προτείνεται μια νέα μέθοδος για την πρόγνωση των ρουλεμάν με βάση την ενεργειακή εντροπία στην οποία υπολογίζεται η κανονικοποιημένη ενέργεια στο φάσμα συχνοτήτων κατά τη διάρκεια των κύκλων και επιλέγεται η ζώνη συχνοτήτων που δείχνει μεγαλύτερη μείωση σε σχέση με τις άλλες και η εντροπία υπολογίζεται ως χαρακτηριστικό γνώρισμα. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά χαρακτηριστικά, τα οποία παρουσιάζουν θορυβώδη διακύμανση, μη μονότονη αλλαγή ή μόνο μια απότομη αύξηση κοντά στο τέλος της ζωής, η προτεινόμενη ενεργειακή εντροπία δείχνει την ομαλή και σταθερή μείωση των κύκλων που μπορεί να αντιπροσωπεύει το βαθμό πρόκλησης βλάβης. Προκειμένου να παρουσιαστεί το πλεονέκτημα, εξετάζονται και συγκρίνονται τέσσερα παραδοσιακά χαρακτηριστικά - RMS, kurtosis, MAS kurtosis, περιβάλλουσα και η

νέα χαρακτηριστική παράμετρος- η ενεργειακή εντροπία - χρησιμοποιώντας τις τρεις βάσεις δεδομένων: FEMTO, IMS και LOCAL .

1^ο Κεφάλαιο: Εφαρμογή των ρουλεμάν

1.1 Τι είναι τα ρουλεμάν και που γίνεται η εφαρμογή τους

1.1.1 Ποια είναι η διαφορά μεταξύ των ρουλεμάν;

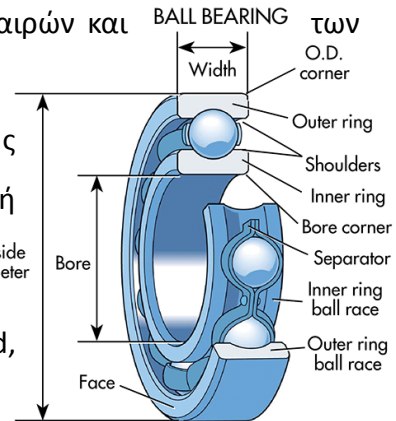
Τα ρουλεμάν χρησιμοποιούνται για να μειώσουν την τριβή. Η επαφή μετάλλου με μέταλλο παράγει μεγάλες ποσότητες τριβής. Η τριβή βοηθάει στη φθορά του μετάλλου, προκαλώντας άλεση που αργά υποβαθμίζει το μέταλλο. Τα έδρανα μειώνουν την τριβή με το να είναι οι δύο επιφάνειες κυρτές μεταξύ τους, μειώνοντας έτσι την ποσότητα τριβής που παράγεται. Αποτελούνται από μια λεία ή κυλινδρική μεταλλική σφαίρα που κυλάει σε μια ομαλή εσωτερική και εξωτερική μεταλλική επιφάνεια. Οι κύλινδροι ή οι μπάλες παίρνουν το φορτίο, επιτρέποντας στη συσκευή να περιστρέφεται.

Το φορτίο που ασκείται σε ένα έδρανο είναι είτε ένα ακτινικό φορτίο είτε ένα ωστικό φορτίο. Ανάλογα με τη θέση του ρουλεμάν στο μηχανισμό, μπορεί να δει ένα ακτινικό φορτίο ή ένα ωστικό φορτίο ή ένα συνδυασμό και των δύο. Για παράδειγμα, το έδρανο στον τροχό του αυτοκινήτου υποστηρίζει ένα ακτινικό φορτίο και ένα ωστικό φορτίο. Το βάρος του αυτοκινήτου στο ρουλεμάν παράγει ένα ακτινικό φορτίο ενώ παράγεται το ωστικό φορτίο καθώς το αυτοκίνητο γυρίζει μια γωνία. Εδώ θα εξετάσουμε ορισμένα **είδη** κοινών ρουλεμάν.

- Ρουλεμάν με σφαιρίδια

Τα ρουλεμάν με σφαιρίδια είναι ο πιο κοινός τύπος εδράνου και μπορούν να χειριστούν τόσο ακτινικά όσο και ωστικά φορτία. Τα ρουλεμάν με σφαιρίδια είναι επίσης γνωστά ως ρουλεμάν βαθιάς εγκοπής μονής σειράς ή Conrad. Ο εσωτερικός δακτύλιος είναι συνήθως στερεωμένος στον περιστρεφόμενο άξονα και η αύλακα στην εξωτερική διάμετρο παρέχει μια κυκλική σφαίρα. Ο εξωτερικός δακτύλιος τοποθετείται πάνω στο περίβλημα του εδράνου. Τα ρουλεμάν τοποθετούνται σε ένα διάδρομο και όταν το φορτίο εφαρμόζεται, μεταδίδεται από τον εξωτερικό διάδρομο στην μπάλα και από την μπάλα στον εσωτερικό διάδρομο. Οι αυλακώσεις

διαδρόμων έχουν τυπικές ακτίνες καμπυλότητας από 51,5% έως 53% της διαμέτρου της σφαίρας. Μικρότερες διαδρομές καμπυλότητας μπορούν να προκαλέσουν μεγάλη τριβή λόγω της στενής συμμόρφωσης των σφαιρών και των διαδρόμων. Υψηλότερες διαδρομές καμπυλότητας μπορούν να μειώσουν τη διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης λόγω της αυξημένης πίεσης στη μικρότερη περιοχή συμβάσεων σφαιρών.



Τα ρουλεμάν, γνωστά και ως έδρανα Conrad, χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές μικρού φορτίου.

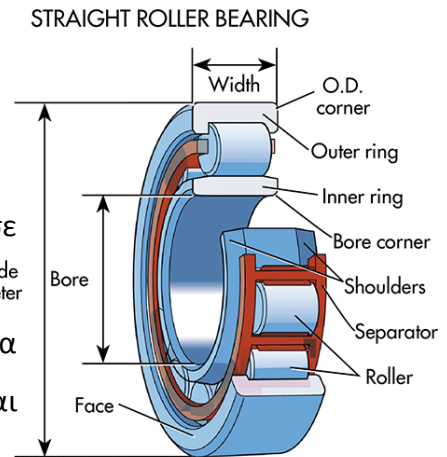
Τα σημεία επαφής μεταξύ της σφαίρας και της εξωτερικής κούρσας είναι πολύ μικρά λόγω του σφαιρικού σχήματος του εδράνου. Αυτό βοηθά επίσης την μπάλα να περιστρέφεται πολύ ομαλά. Δεδομένου ότι το σημείο επαφής είναι τόσο μικρό, το έδρανο μπορεί να υπερφορτωθεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο, προκαλώντας παραμόρφωση του ρουλεμάν. Αυτό θα καταστρέψει το έδρανο. Τα ρουλεμάν με σφαιρίδια χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές όπου το φορτίο είναι σχετικά μικρό.

AVERAGE RELATIVE RATINGS			
	Type	Capacity	
		Radial	Thrust
Ball Bearing	Conrad Type	Good	Fair
	Self-aligning	Fair	Fair
Straight/Cylindrical Roller Bearing	Separable inner ring non-locating	Excellent	0
	Self-contained two direction locating	Excellent	Poor
Tapered Roller Bearings	Self-aligning	Good	Fair
Spherical Roller Bearings	Self-aligning	Excellent	Good
Needle Bearings	Complete bearing	Good	0
Thrust Bearings	Single direction ball with grooved race	Poor	Excellent
	Single direction eye roller	0	Excellent

Πίνακας 1 Ο παραπάνω πίνακας παραθέτει μερικούς γενικούς τύπους ρουλεμάν και τις τυπικές ικανότητες φόρτωσης.

- Ευθεία ρουλεμάν

Τα κυλινδρικά έδρανα κυλίνδρων λειτουργούν σε κυλινδρικές διαδρομές και έχουν χαμηλή τριβή, υψηλή ακτινική ικανότητα φόρτωσης και δυνατότητα υψηλής ταχύτητας. Τα ρουλεμάν με κυλίνδρους είναι κυλινδρικά ρουλεμάν όπου το σημείο επαφής μεταξύ

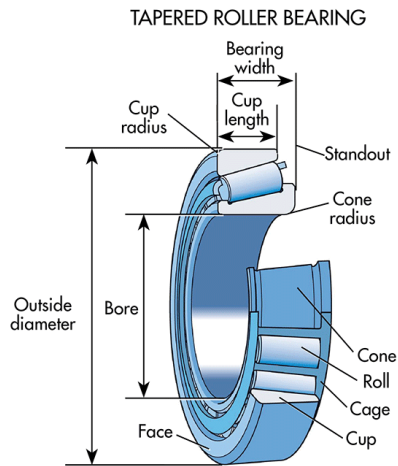


του εδράνου και του αγώνα είναι μια γραμμή και όχι ένα σημείο. Το φορτίο κατανέμεται σε μια μεγαλύτερη περιοχή και επιτρέπει στο ρουλεμάν να χειρίζεται μεγαλύτερο φορτίο. Για να ελαχιστοποιηθεί η τάση του να λοξοτομεί, το μήκος του κυλίνδρου δεν είναι πολύ μεγαλύτερο από τη διάμετρο του κυλίνδρου.

Τα κυλινδρικά ή κυλινδρικά έδρανα κυλίνδρων μπορούν να βρεθούν σε εφαρμογές όπως κυλίνδρους μεταφορικών ταινιών, οι οποίες απαιτούνται για τη συγκράτηση μεγάλων ακτινικών φορτίων.

Ο συνηθισμένος σχεδιασμός τους είναι ελεύθερος να επιπλέει αξονικά και έχουν φλάντζες καθοδήγησης κυλίνδρων και στις δύο πλευρές ενός δακτυλίου και καμία στην άλλη πλευρά. Αυτό επιτρέπει την επέκταση του ρουλεμάν λόγω της θερμικής δραστηριότητας όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη σταθερή θέση του ρουλεμάν στο αντίθετο άκρο. Ένα φορτίο ωθήσεως μπορεί να στηρίζεται σε μία κατεύθυνση αν προστεθεί μία οδηγητική φλάντζα σε μία πλευρά των αντιθέτων δακτυλίων. Μια δεύτερη φλάντζα μπορεί να προστεθεί για χωρητικότητα δύο κατευθύνσεων ώσης.

- Ρουλεμάν με κυλίνδρους



Τα ρουλεμάν με κωνικούς κυλίνδρους έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν σε ακτινικό φορτίο και φορτίο ώσης και μπορούν να βρεθούν σε πλήμνες αυτοκινήτου λόγω της ποσότητας ακτινικών φορτίων και φορτίων ώσης που μπορούν να μεταφέρουν.



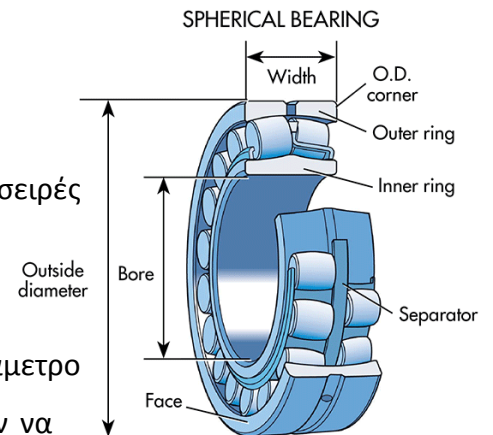
Σε ένα ρουλεμάν με κωνικούς κυλίνδρους, οι δακτύλιοι και οι κύλινδροι είναι κωνικοί σε σχήμα κώνων για να υποστηρίξουν ταυτόχρονα αξονικά και ακτινικά φορτία. Ο λόγος των φορτίων εξαρτάται από τη γωνία των αξόνων μεταξύ του κυλίνδρου και του εδράνου. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία, μπορεί να στηριχθεί το μεγαλύτερο αξονικό φορτίο. Η γωνία επαφής για τα περισσότερα κωνικά ρουλεμάν κυμαίνεται μεταξύ 10 και 16 μοίρες. Για μεγαλύτερη χωρητικότητα ωστικού φορτίου, χρησιμοποιείται γωνία επαφής 30 μοιρών.

Τα ρουλεμάν είναι τοποθετημένα ζεύγη, δεδομένου ότι χειρίζονται ακτινικά φορτία καλύτερα από μία μόνο σειρά κωνικών εδράνων. Για εφαρμογές βαρέως τύπου, δύο

ή τέσσερις σειρές κωνικών κυλίνδρων συνδυάζονται σε μια ενιαία μονάδα σε μεγάλα έδρανα.

- Σφαιρικά ρουλεμάν

Τα σφαιρικά ρουλεμάν αποτελούνται συνήθως από δύο σειρές κυλινδρικού κυλίνδρου που κινούνται σε δύο διαδρόμους. Ένας είναι στον εσωτερικό δακτύλιο και ο άλλος είναι σε συνεχή σφαιρική επιφάνεια εδάφους στην εσωτερική διάμετρο του εξωτερικού δακτυλίου. Αυτό επιτρέπει στο ρουλεμάν να

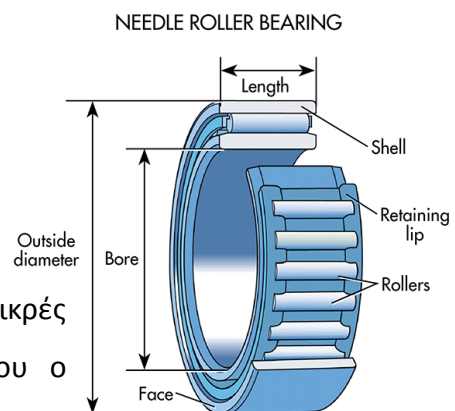


λειτουργήσει με κάποια κακή ευθυγράμμιση. Οι σφαιρικοί κύλινδροι έχουν προφίλ κυλίνδρων που ταιριάζουν απόλυτα με τα προφίλ διαδρόμων, καθιστώντας τα έτσι ισχυρά και με μεγάλη χωρητικότητα φορτίου. Τοποθετούνται σε ζεύγη στο εσωτερικό του περιβλήματος του εδράνου και αντιμετωπίζουν αντίθετες κατευθύνσεις. Αυτό γίνεται έτσι ώστε το φορτίο να μπορεί να υποστηρίζεται προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.

Τα σφαιρικά ρουλεμάν χρησιμοποιούνται σε πλήμνες αυτοκινήτου και μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλα ακτινικά και ωστικά φορτία.

- Έδρανα κυλίνδρων με βελόνες

Τα έδρανα κυλίνδρων με βελόνες χρησιμοποιούν επιμήκη κυλινδρικά κυλιόμενα στοιχεία με μικρές διαμέτρους. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου ο ακτινικός χώρος είναι περιορισμένος. Η αναλογία



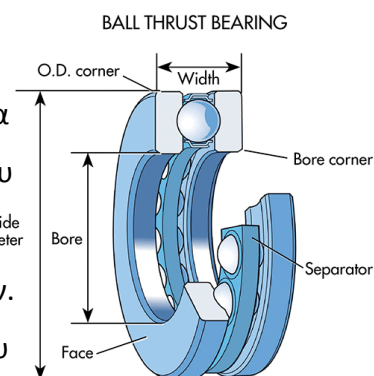
διαμέτρου προς μήκος για τις βελόνες κυμαίνεται μεταξύ 1 έως 2,5 και 1 έως 10. Λόγω του μικρού τους μεγέθους, δεν μπορούν να οδηγηθούν με ακρίβεια και να δημιουργήσουν υψηλές ποσότητες τριβής. Χρησιμοποιούνται σε χαμηλές ταχύτητες

και σε ταλαντούμενες κινήσεις. Οι κλωβοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθοδηγήσουν τις βελόνες και να βελτιώσουν τη συγκράτηση.

Τα έδρανα κυλίνδρων βελόνων χρησιμοποιούνται σε σχέδια που έχουν περιορισμούς μεγάλου χώρου.

- Έδρανα ώθησης

Σχεδιασμένα για να χειρίζονται τα υψηλά φορτία ώθησης, τα έδρανα ώθησης κυλίνδρων τυπικά βρίσκονται σε γρανάζια που χρησιμοποιούνται για μεταδόσεις αυτοκινήτων ανάμεσα σε γρανάζια ή μεταξύ περιβλήματος και περιστρεφόμενων αξόνων. Τα γωνιακά δόντια που βρίσκονται στα ελικοειδή γρανάζια που



χρησιμοποιούνται στις μεταδόσεις αυτοκινήτων παράγουν ένα υψηλό φορτίο ώθησης το οποίο υποστηρίζεται από τα έδρανα ώθησης με κύλινδρο. Τα ρουλεμάν ώθησης κυλίνδρων ολισθαίνουν μέσα σε μια επαφή κυλίνδρου-τροχιάς για να χειριστούν την μεταβολή της επιφανειακής ταχύτητας που προκύπτει ως αποτέλεσμα της μεταβαλλόμενης διαμέτρου κατά μήκος της ζώνης επαφής.

Τα ωστικά ρουλεμάν έχουν σχεδιαστεί για να χειρίζονται σχεδόν αποκλειστικά φορτία ώθησης σε εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας και χαμηλού βάρους. Ένα παράδειγμα της χρήσης του θα ήταν σε σκαμπό μπαρ όπου χρησιμοποιούνται για να στηρίξουν το κάθισμα.

Τα ρουλεμάν ώθησης αποτελούνται από δύο αυλακωτές πλάκες με ένα σύνολο σφαιρών μεταξύ τους. Οι επαφές σφαιρών έχουν μια ολισθαίνουσα δράση που αυξάνεται σε υψηλές ταχύτητες από την φυγόκεντρη δύναμη στις σφαίρες. Τα κυλινδρικά έδρανα ώθησης περιορίζονται στο 20% περίπου της ταχύτητας του

αντίστοιχου ακτινικού εδράνου και τα έδρανα σφαιρικής ώθησης περιορίζονται στο 30% της ταχύτητας του ομόλογου τους.

1.1.2 Αρχές επιλογής και εφαρμογής εδράνων

Ένα σύστημα περιβλήματος άξονα-εδράνου αποτελείται από περισσότερα από απλά έδρανα. Τα συναφή εξαρτήματα όπως ο άξονας και τα περιβλήματα αποτελούν αναπόσπαστα μέρη του συνολικού συστήματος. Το λιπαντικό και τα στοιχεία στεγανοποίησης διαδραματίζουν επίσης σημαντικό ρόλο. Για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του εδράνου, πρέπει να υπάρχει η σωστή ποσότητα κατάλληλου λιπαντικού για να μειώνεται η τριβή στο έδρανο και να προστατεύεται από τη διάβρωση. Τα στοιχεία στεγανοποίησης είναι σημαντικά επειδή διατηρούν το λιπαντικό και τους ρύπους έξω από την κοιλότητα του εδράνου. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, αφού η καθαριότητα έχει σημαντική επίδραση στη διάρκεια ζωής του ρουλεμάν. Ως εκ τούτου, η SKF (**Svenska Kullagerfabriken AB**) κατασκευάζει και πωλεί ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών σφραγίδων και συστημάτων λίπανσης.

Σε αυτό το τμήμα και στις υποενότητες του, ο σχεδιαστής ενός συστήματος εδράνων μπορεί να βρει τις απαραίτητες βασικές πληροφορίες, που παρουσιάζονται με τη σειρά που απαιτείται γενικά. Προφανώς, είναι αδύνατο να συμπεριληφθούν όλες οι πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την κάλυψη κάθε πιθανής εφαρμογής. Για το λόγο αυτό, σε πολλά μέρη, γίνεται αναφορά στην υπηρεσία μηχανικών εφαρμογών της SKF. Αυτή η τεχνική υπηρεσία μπορεί να εκτελεί πολύπλοκους υπολογισμούς, να διαγιγνώσκει και να επιλύει ζητήματα επιδόσεων των εδράνων και να βοηθά στη διαδικασία επιλογής ρουλεμάν. Η SKF συνιστά επίσης αυτή την υπηρεσία σε οποιονδήποτε εργάζεται για τη βελτίωση της απόδοσης της εφαρμογής.

Οι πληροφορίες που περιέχονται σε αυτό το τμήμα και στις υποενότητες του είναι γενικές και ισχύουν για τα περισσότερα έδρανα. Πληροφορίες σχετικά με έναν τύπο ρουλεμάν παρέχονται στο σχετικό τμήμα προϊόντος.

1.1.3 Εφαρμογές ρουλεμάν

Η εταιρία AST φέρει λύσεις για έναν μεγάλο αριθμό βιομηχανιών, η τεχνογνωσία εφαρμογών της είναι ακόμα ευρύτερη. Η AST ειδικεύεται στην παροχή λύσεων για ορισμένες από τις πιο δύσκολες καταστάσεις (και σε μερικές από τις πιο πλούσιες). Η εμπειρία μας ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό από τα εργαλεία χειρός στο χέρι έως τα εργαλειομηχανές, από εξαιρετικά ακριβείς μετρήσεις μέχρι κυλιόμενες σκάλες. Ένας μερικός κατάλογος των εφαρμογών στις οποίες η AST έχει μεγάλη εμπειρία στην παροχή οικονομικά αποδοτικών λύσεων περιλαμβάνει:

- Συστήματα φορτίου αεροσκαφών
- Αεροσκάφη ενεργοποιητές φτερού
- Ανεμόμετρο
- ΑΤΜ και αναγνώστες καρτών
- Ποδήλατα
- Οδοντιατρικά Εργαλεία χειρός
- Ηλεκτροκινητήρες
- Κινητήρες
- Κυλιόμενες κλίμακες και ανελκυστήρες
- Σύστημα Ψαρέματος
- Συστήματα υποστήριξης πτήσεων
- Μετρητές ροής
- Συγκρότημα εκκίνησης κινητήρα αερίου
- Μετρητές αερίου
- Αεροκίνητοι κινητήρες
- Υδραυλικοί κύλινδροι
- Βιομηχανικοί ανεμιστήρες

- Βιομηχανικοί κωδικοποιητές
- Βιομηχανικοί μετρητές
- Βιομηχανικά μίξερ & αναδευτήρες
- Συστήματα ανίχνευσης εισβολής
- Ρολά χειρισμού υλικών
- Ιατρικός ενεργοποιητής
- Ιατρικό διαγνωστικό εξοπλισμό
- Εξοπλισμός ιατρικής απεικόνισης
- Ιατρικά χειρουργικά λείζερ
- Ιατρικά χειρουργικά εργαλεία
- Γερανοί Αυτοκινητόδρομου
- Οπτικοί κωδικοποιητές
- Εκτυπωτές πλαστικών καρτών
- Ηλεκτρικά εργαλεία χειρός
- Ρολά εκτύπωσης
- Κυλιόμενες πόρτες
- Ανελκυστήρες ψαλιδιού και πλατφόρμας
- Αισθητήρες & Ποτενσιόμετρα
- Ηλιακοί ενεργοποιητές
- Φωτισμός σκηνής
- Συστήματα επιτήρησης
- Θερμικές κάμερες απεικόνισης
- Μεταφορά Turnstile Gates
- Εξαιρετικές εφαρμογές

Το AST Bearings ειδικεύεται σε ρουλεμάν που πρέπει να λειτουργούν άψογα σε εξαιρετικές συνθήκες απόδοσης. Ένα από τα κορυφαία εργοστάσια που φέρουν στη Γερμανία παρέχει πολλές λύσεις σε δύσκολες εφαρμογές όπως:

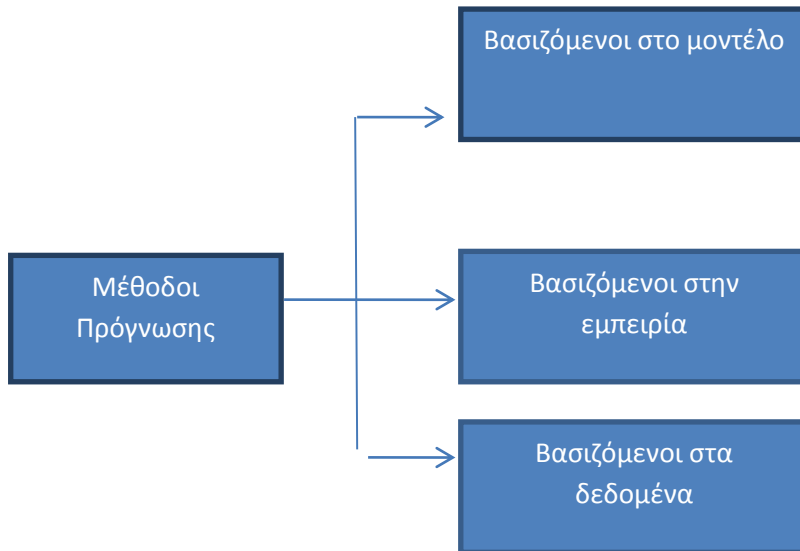
- Εφαρμογές μικρογραφίας
- Υψηλή θερμότητα
- Ψυχρές θερμοκρασίες
- Χημικές ουσίες
- Αποστείρωση
- Ακτινοβολία
- Υψηλή ταχύτητα
- Δόνηση
- Περιβάλλον κενού

2^ο Κεφάλαιο: Μια ανασκόπηση για την πρόβλεψη των στοιχείων των ρουλεμάν

2.1 Ορισμός της πρόγνωσης των ρουλεμάν

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης [7], η πρόγνωση βλάβης αντιστοιχεί στην «Εκτίμηση του χρόνου αποτυχίας και του κινδύνου για έναν ή περισσότερους υπάρχοντες και μελλοντικούς τρόπους αστοχίας». Είναι η πράξη πρόβλεψης μελλοντικών συνθηκών βάσει των σημερινών σημείων και συμπτωμάτων [8]. Η εφαρμογή του συστήματος πρόγνωσης έχει ως αποτέλεσμα ένα βέλτιστο πρόγραμμα συντήρησης. Η προγνωστική δραστηριότητα έχει στόχο την πρόβλεψη της ημερομηνίας αποτυχίας με την πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης υγείας ενός συστήματος εδράνων και την ΕΧΖ [9]. Οι περισσότερες από τις έρευνες που σχετίζονται με τη ΣΒΚ εστιάζονται κυρίως στη διάγνωση σφαλμάτων. Η πρόγνωση αποτυχίας είναι ένας νέος τομέας έρευνας και υπάρχει ένα ευρύ πεδίο για την ανάπτυξη μεθόδων, εργαλεία και εφαρμογές για ένα αποτελεσματικό προγνωστικό σύστημα. Ο Palmgren [4] έχει αναπτύξει λειτουργίες για τη διάρκεια ζωής των ρουλεμάν υπό καθαρό ακτινικό φορτίο και καθιερωμένους κανόνες για τη μετατροπή των αποτελεσματικά αξονικών και ακτινικών φορτίων σε καθαρά ακτινικά φορτία. Υπολόγισε επίσης την επίδραση διαφορετικών τύπων φορτίων που υπόκεινται σε μεταβολή με την πάροδο του χρόνου.

Οι προγνωστικές μέθοδοι αποτυχίας μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες προσεγγίσεις [9], όπως φαίνεται στο Σχήμα.



Σχ. 1 Ταξινόμηση προγνωστικών μεθόδων

2.1.1 Προβλέψεις με βάση το μοντέλο

Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν ένα αναλυτικό μοντέλο (σύνολο διαφορικών ή αλγεβρικών εξισώσεων) να αντιπροσωπεύει το φαινόμενο της δυναμικής συμπεριφοράς και της υποβάθμισης του συστήματος. Οι Yu και Harris [10] αντίστοιχα, έχουν προτείνει ένα μοντέλο ζωής που βασίζεται στο άγχος για τα ρουλεμάν. Το όφελος της έγκειται στο γεγονός ότι, παρέχει ακριβέστερα προγνωστικά αποτελέσματα. Αλλά σε πραγματικά συστήματα οι μηχανισμοί υποβάθμισης είναι γενικά στοχαστικοί και τόσο δύσκολο να επιτευχθούν με τη μορφή αναλυτικών μοντέλων. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή αυτής της προσέγγισης μπορεί να περιοριστεί στην πράξη.

2.1.2 Προγνωστικές μέθοδοι που βασίζονται στην εμπειρία

Σε αυτές τις μεθόδους, τα δεδομένα μιας εμπειρικής γνώσης που συλλέχθηκαν για μια σημαντική χρονική περίοδο (αποτυχία χρόνου, δεδομένα συνάρτησης και λειτουργίας κ.λπ.) χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του χρόνου αποτυχίας ή του EXZ. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι ότι βασίζονται στη χρήση απλών λειτουργιών αξιοπιστίας (εκθετικός νόμος, νόμος Weibull, και τα λοιπά.) παρά σε πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα. Ο Palmgren [4] έχει δημιουργήσει εμπειρική σχέση μεταξύ της διάρκειας ζωής των εδράνων και του φορτίου στο ρουλεμάν που βασίζεται στην αντίληψη, την πειραματική παρατήρηση και την προσαρμογή της καμπύλης.

Τα προγνωστικά αποτελέσματα από αυτές τις μεθόδους είναι λιγότερο ακριβή από αυτά που παρέχονται από το μοντέλο που βασίζονται σε δεδομένα, ιδίως όταν οι συνθήκες λειτουργίας είναι μεταβλητές ή στην περίπτωση νέων συστημάτων λόγω έλλειψης δεδομένων εμπειρίας.

2.1.3 Μέθοδοι που βασίζονται σε δεδομένα

Σε αυτές τις μεθόδους συλλέγονται ηλεκτρονικά δεδομένα με τη βοήθεια αισθητήρων και μετατρέπονται σε συναφή πληροφορίες. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για να μελετηθεί το φαινόμενο της υποβάθμισης με βάση διαφορετικά μοντέλα και εργαλεία όπως (Νευρωνικά δίκτυα, Bayesian δίκτυα, Μαρκοβιανές διαδικασίες κ.λπ.) ή με βάση στατιστικές μεθόδους, να μάθουν το μοντέλο υποβάθμισης και να προβλέψουν τη μελλοντική κατάσταση της υγείας και το αντίστοιχο EXZ του συστήματος. Ο Shao και Nezu [11] έχουν προτείνει πρόβλεψη που βασίζεται στην πρόβλεψη της υπολειπόμενης ζωής (ΠΠΥΖ) του ρουλεμάν. Η βασική ιδέα πίσω από ΠΠΥΖ είναι η εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων πρόβλεψης σε διαφορετικά στάδια λειτουργίας των εδράνων. Η διαδικασία αποτελείται από on-line μοντελοποίηση της

κατάστασης λειτουργίας του εδράνου μέσω νευρωνικών δικτύων και λογικών κανόνων. Η προτεινόμενη διαδικασία μπορεί να προσαρμοστεί αυτόματα στις αλλαγές των περιβαλλοντικών παραγόντων. Ο Gebraeel et al. [12] έχει αναπτύξει μοντέλα βασισμένα στο νευρικό δίκτυο για την πρόβλεψη των βλαβών των εδράνων και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο σταθμισμένος μέσος όρος των εκθετικών παραμέτρων δίνει την καλύτερη εκτίμηση των χρόνων αποτυχίας των εδράνων.

Οι μέθοδοι που βασίζονται σε δεδομένα έχουν πλεονέκτημα έναντι και των δύο παραπάνω μεθόδων, δηλαδή των προγνωστικών μεθόδων που βασίζονται σε μοντέλο και των προγνωστικών μεθόδων που βασίζονται στην εμπειρία, όπως σε πραγματικές βιομηχανικές εφαρμογές παίρνοντας αξιόπιστα δεδομένα είναι ευκολότερα από την κατασκευή μοντέλων φυσικής ή αναλυτικής συμπεριφοράς. Και από την άλλη πλευρά, τα παραγόμενα συμπεριφορικά μοντέλα από τα πραγματικά δεδομένα παρακολούθησης οδηγούν σε ακριβέστερα προγνωστικά αποτελέσματα από εκείνα που λαμβάνονται από δεδομένα ανάδρασης της εμπειρίας.

2.2 Ανασκόπηση της πρόγνωσης των ρουλεμάν

Αν και η πρόγνωση της αποτυχίας είναι ένας νέος τομέας έρευνας, αλλά όχι μια νέα έννοια έχει αντιμετωπιστεί ως ένα βαθμό για πολλά χρόνια. Υπάρχουν διάφοροι τύποι τεχνικών παρακολούθησης των συνθηκών έδρασης και τεχνικών πρόγνωσης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.

Τεχνικές Παρακολούθησης Κατάστασης			
Δόνηση	Ανάλυση πετρελαίου / θραυσμάτων	Θερμοκρασία	Ακουστική εκπομπή
<p>Πλεονεκτήματα</p> <ul style="list-style-type: none"> • Αξιόπιστη και τυποποιημένη μέθοδος • Αντιδρά αμέσως στην αλλαγή • Δυνατότητα επισημάνσεως ελαττωματικού στοιχείου <p>Μειονεκτήματα</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ακριβό • Αδιάκριτο • Υπό την επιφύλαξη των βλαβών του αισθητήρα 	<p>Πλεονεκτήματα</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ευκολία χαρακτηρισμού της κατάστασης του εδράνου • Είναι δυνατή η ανίχνευση τύπου και τοποθεσίας του ελαττώματος <p>Μειονεκτήματα</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ακριβό • Περιορίζεται σε ρουλεμάν με σύστημα τροφοδοσίας λαδιού (Δύσκολο να εφαρμοστεί σε γρασαρισμένα ρουλεμάν) 	<p>Πλεονεκτήματα</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ικανότητα ανίχνευσης ανώμαλων χώρων εργασίας • Τυποποιημένη μέθοδος <p>Μειονεκτήματα</p> <ul style="list-style-type: none"> • Δεν είναι αποτελεσματική, καθώς παρατηρείται σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας στα τελευταία στάδια της ζωής • Δύσκολο να εντοπιστεί η επικείμενη αποτυχία 	<p>Πλεονεκτήματα</p> <ul style="list-style-type: none"> • Μπορεί να εντοπιστεί ενδεχόμενο σφάλματος • Μεγάλη αναλογία σήματος-τόνου <p>Μειονεκτήματα</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ακριβό • Η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι υψηλή

Πίνακας 2 Σύνοψη των τυπικών τεχνικών παρακολούθησης της κατάστασης της έδρασης και της προγνωστικής

Η παλαιότερη πρόγνωση ρουλεμάν έκανε χρήση ανάλυσης κραδασμών, στην οποία χρησιμοποιήθηκαν τα τρέχοντα και τα προηγούμενα δεδομένα δόνησης για την πρόβλεψη της Εναπομένουσας Χρήσιμης Ζωής (EXZ) του ρουλεμάν. Ο Khan [13] και

ο Succì [14] χρησιμοποίησαν έναν απλό τρόπο αστοχίας του φορέα δοκιμής για πρόγνωση ρουλεμάν. Οι αριθμοί δοκιμών αντοχής διεξάγονται σε έδρανα δοκιμαστικής εξέδρας με ζημιές στην εξωτερική κούρσα, εσωτερική κούρσα και στο κυλιόμενο στοιχείο του ρουλεμάν και διεξήχθη μεταξύ 100 έως 900 ώρες πριν από την αποτυχία. Ο Khan [13] έχει επίσης εμφανίσει διπλό ημερολόγιο της Μέτρησης Απόκρισης Συντονισμού (ΜΑΣ) με τιμές, δηλ. μέσα στο (ΜΑΣ), έναντι της γραμμικής χρονικής κλίμακας. Διαπίστωσε ότι έχει ληφθεί μια ευθεία γραμμή από την οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια ελάχιστη τετραγωνική προσαρμογή για να εκτιμηθεί η ασφαλής διάρκεια ζωής με μια καθορισμένη ζώνη εμπιστοσύνης. Αρκετές φορές παράμετροι τομέα είχαν υπολογιστεί και έτειναν σε όλες τις δοκιμές συμπεριλαμβανομένων του (ΜΑΣ), κορυφής, συντελεστής κορυφής, κύρτωση, λόγος κορυφής σε 5-12.5 kHz σε ζώνη συχνοτήτων 0-5 kHz, λόγος του (ΜΑΣ) σε 5-12,5 kHz σε ζώνη συχνοτήτων 0-5 kHz και τη μέτρηση απόκρισης συντονισμού ανιχνευτή (ΜΑΣ) σε ζώνη συχνοτήτων 27-35 kHz [15]. Η ζώνη συχνοτήτων των 5-12,5 kHz βρέθηκε ότι παρέχει τα πιο ευαίσθητα αποτελέσματα από τον αριθμό των ζωνών συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για την στατική περιοχή του χρόνου λόγω της παρουσίας αριθμού δομικών συντονισμών. Στην πραγματικότητα, το περιβάλλον των κραδασμών και το φάσμα των τρόπων αστοχίας ποικίλουν σημαντικά, οπότε είναι δύσκολο να εξαχθούν τα αποτελέσματα σε γενικά βιομηχανικά περιστρεφόμενα μηχανήματα.

Ο Randall [16] και ο Berry [17] έχουν επικεντρωθεί στην πρόγνωση του ρουλεμάν σε γενικά βιομηχανικά περιστρεφόμενα μηχανήματα και συνέβαλαν στην υπέρβαση του περιορισμού του προτύπου που πρότεινε ο Khan. Ο Randall συνέστησε τη χρήση της τοποθέτησης μιας ευθείας γραμμής στις τιμές db (λογαριθμική κλίμακα) έναντι μιας γραμμικής χρονικής κλίμακας. Η καμπύλη που ελήφθη προέκυψε για να φθάσει σε 20 db αλλαγή σε σχέση με το επίπεδο γραμμής βάσης, για να ληφθεί ο προβλεπόμενος χρόνος πρωτοπορίας. Ωστόσο, μια σειρά ελαττωμάτων όπως η ανάπτυξη ρωγμών δείχνουν μια ξαφνική σταδιακή αλλαγή τάσης, γεγονός που καθιστά δύσκολη την πρόβλεψη της τάσης με αυτή τη μέθοδο.

Στον τομέα της πρόγνωσης των ρουλεμάν, το έργο από όλα τα παραπάνω έθεσε τα θεμέλια για σημαντική πρόοδο. Ωστόσο, οι περισσότερες από τις προηγούμενες

μελέτες δεν εξέτασαν τις επιπτώσεις των αλλαγών στο λειτουργικό περιβάλλον και τις συνθήκες λειτουργίας του μηχανήματος όπως η αλλαγή του φορτίου, της ταχύτητας και των επισκευών του εξοπλισμού. Η διαδικασία πρόβλεψης της ζωής ρουλεμάν πρέπει να έχει **προσαρμοστική προγνωστική ικανότητα** να παρέχει **εξαιρετικά ακριβή αυτόματα μακροπρόθεσμα πρόβλεψη**. Αυτό ξεπεράστηκε από τη διαδικασία πρόβλεψης που αναφέρεται ως πρόβλεψη με Βάση την πρόβλεψη της Εναπομένουσας Ζωής (ΠΠΕΖ) [11]. Χρησιμοποιεί διάφορες μεταβλητές χαρακτηρίζουν την κατάσταση ενός μηχανισμού αποικοδόμησης που προσδιορίζεται από μετρήσεις on-line. Οι εφαρμογές του (ΠΠΕΖ) περιλαμβάνουν την πρόβλεψη μιας διαδικασίας ανάπτυξης ελαττωματικού ρουλεμάν, η ακριβής πρόβλεψη της Εναπομένουσας Χρήσιμης Ζωής (EXZ) του ρουλεμάν και την επίλυση προβλημάτων προσαρμοστικών αλλαγών περιβαλλοντικών παραγόντων.

Ο Li et al. [18] προσπάθησε επίσης να ξεπεράσει τους περιορισμούς των τεχνικών παρακολούθησης της κατάστασης, όπως η εκτίμηση της σοβαρότητας των ζημιών και την πρόγνωση. Έγινε εισαγωγή της έννοιας του μοντέλου διάδοσης ελαττωμάτων σε συνδυασμό με την προσαρμοστική προγνωστική μεθοδολογία για την πρόβλεψη της ανάπτυξης ελαττωματικών εδράνων. Έχει διεξαχθεί **συγκριτική μελέτη** μεταξύ του μελλοντικού μεγέθους ελαττωματικού ελλείμματος ως πρόβλεψης από το προγνωστικό μοντέλο και τη συνήθη συνθήκη φέρουσας μέτρησης. Έδειξε κάποια ποσότητα σφάλματος πρόβλεψης λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα της ανάπτυξης ελαττωμάτων. Ο ακριβής συντονισμός των παραμέτρων του μοντέλου είχε γίνει χρησιμοποιώντας **προσαρμοστικό αλγόριθμο**. Συμπέραναν ότι τα προσαρμοστικά προγνωστικά προβλέπουν αποτελεσματικά τη διαδικασία διάδοσης του ελλείμματος έδρασης χωρίς την ανάγκη προηγούμενης γνώσης των παραμέτρων του προγνωστικού μοντέλου. Οι έμμεσες ή μη παρεμβατικές μετρήσεις, όπως οι κραδασμοί και η ακουστική εκπομπή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για την εκτίμηση του μεγέθους της περιοχής ελαττωμάτων μέσω των μοντέλων επεξεργασίας σήματος και διαγνωστικών μοντέλων χωρίς να χρειάζεται να σταματήσουν οι λειτουργίες του μηχανήματος.

Ένα άλλο έργο που εκτελέστηκε από τους Orsagh et al. [19] αποτελείται από δύο **μοντέλα έναρξης και εξέλιξης ρουλεμάν** που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με

την ανάλυση χαρακτηριστικών κρίσιμων ρουλεμάν του κινητήρα για την πρόβλεψη του EXZ. Η βασισμένη στο μοντέλο προσέγγιση παρέχει τις πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη δημιουργία ζημιών.

Κρίσιμες συνιστώσες πολύ πριν από τις ενδείξεις βλάβης, ενώ άμεσες μετρήσεις των συνιστωσών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενημέρωση των παραδοχών μοντελοποίησης και τη μείωση της αβεβαιότητας στις προβλέψεις του EXZ, παρέχονται με προσέγγιση βασισμένη στον αισθητήρα. Έτσι, τα μοντέλα παρέχουν από κοινού συμπληρωματικές πληροφορίες αξιολόγησης της κατάστασης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη μιας ολοκληρωμένης προγνωστικής ικανότητας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής των συστατικών τους.

Η υπογραφή ελαττωματικών ρουλεμάν συχνά καλύπτεται από φαινόμενα θορύβου και χαμηλής συχνότητας. Για ακριβή πρόγνωση του συστήματος εδράνων, η υπογραφή ελαττωματικού εδράνου πρέπει να είναι καθαρή, οπότε ο μηχανισμός μέτρησης πρέπει να είναι αποτελεσματικός και ικανός να μετράει την υπογραφή σε μια ευρεία ζώνη συχνοτήτων. Ο Qiu et al. [20] έχει εισαγάγει ενισχυμένες και στιβαρές προγνωστικές μεθόδους για έδρανα κύλισης. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν μια προσέγγιση βασισμένη στο φίλτρο wavelet για αδύναμη βελτίωση της υπογραφής για την αναγνώριση βλαβών και τη μέθοδο βασισμένη στο Self Organizing Map (SOM) για την εκτίμηση της υποβάθμισης της απόδοσης. Για την επικύρωση της μεθοδολογίας εκτελέστηκε μια δοκιμή κυλιόμενου ρουλεμάν, η οποία σχεδιάστηκε για να παράγει πολλαπλά σύνολα δεδομένων πλήρους αποικοδόμησης κύκλου ζωής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα ελαττώματα των εδράνων μπορούν να ανιχνευθούν σε ένα πρώιμο στάδιο ανάπτυξης με το σχεδιασμό ενός βέλτιστου φίλτρου wavelet. Τα αποτελέσματα όταν συνδυάζονται με μεθόδους πρόβλεψης χρονοσειρών όπως Αυτορυθμιζόμενο και Κινητό Μέσο (AKM) [21] και επαναλαμβανόμενο νευρωνικό δίκτυο [22], **η πρόβλεψη της εναπομένουσας ωφέλιμης ζωής του κυλίνδρου μπορεί να πραγματοποιηθεί [19].**

Οι Mandic και Chambers [22] μελέτησαν την εξέλιξη της ρίψης και χρησιμοποίησαν ένα **μοντέλο βασισμένο στη φυσική**. Τα δύο βασικά στοιχεία αναγνωρίζονται ως μοντέλο διάδοσης του ιχθύος. Ο πρώτος είναι ο προσδιορισμός των δυναμικών

φορτίων και των τάσεων (χρησιμοποιώντας αριθμητικές προσεγγίσεις) που συμβαίνουν στο υλικό καθώς ένα κυλιόμενο στοιχείο περνάει πάνω από το σχιστόλιθο και το άλλο είναι η ανάπτυξη μιας μεθόδου που σχετίζεται με αυτό το τοπικό πεδίο τάσης με τις ζημιές που συσσωρεύονται στο υλικό. Με βάση τις πληροφορίες για το άγχος, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος της μηχανικής βλάβης για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάδοσης του ιχθύος. Μειωμένο Μοντέλο Παραγγελίας (ΜΜΠ) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ποσοστού απομάκρυνσης υλικού και η διαγνωστική ανατροφοδότηση χρησιμοποιείται για την αυτο-προσαρμογή και τη μείωση της αβεβαιότητας πρόβλεψης. Τα αποτελέσματα επαληθεύτηκαν τόσο σε ρουλεμάν υποκλίμακα όσο και σε ρουλεμάν κινητήρων πλήρους κλίμακας και κατέδειξαν ότι **η διάδοση των πυρομαχικών μπορεί να προβλεφθεί με μεγάλη εμπιστοσύνη**. Με βάση τη φυσική, το μοντέλο αυτό προσαρμόζεται εύκολα στις περισσότερες εφαρμογές ρουλεμάν.

Ο Kanakar et al. [23] παρουσίασε μια μεθοδολογία για τη διάγνωση σφαλμάτων με έδρανα κυλίνδρων με τη χρήση μετασχηματισμού συνεχούς κύματος (ΜΣΚ). Χρησιμοποιήθηκαν τρεις τεχνικές εκμάθησης ταξινόμησης μηχανών, από τα οποία δύο είναι εποπτευόμενες τεχνικές εκμάθησης μηχανής, δηλ. Μηχανή Φορέα Υποστήριξης (ΜΦΥ), Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (ΤΝΔ) και ένα άλλο είναι μια μη εποπτευόμενη τεχνική εκμάθησης μηχανής, δηλαδή αυτο-οργάνωσης χαρτών (ΑΟΧ). Περαιτέρω, ο Kanakar [24] πρότεινε μια μεθοδολογία διάγνωσης σφαλμάτων για τα έδρανα κυλινδρικού στοιχείου, η οποία χρησιμοποιεί την αυτοσυσχέτιση των πρωτογενών σημάτων δόνησης για τη μείωση της διάστασης των δονήσεων με ελάχιστη απώλεια σημαντικού περιεχομένου συχνότητας. Παρατηρείται ότι η διάσταση του σήματος δόνησης μειώνεται στο 10% με αμελητέα απώλεια πληροφοριών.

Ο Goebel et al. [25] έχει προτείνει τη συγχώνευση ανεξάρτητων εκτιμήσεων από δύο θεμελιώδεις διαφορετικές μεθόδους για την εκτίμηση της υπολειπόμενης ζωής. Η **πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί το Βασισμένο στη φυσική (ΒΦ) μοντέλο** για την πρόβλεψη της μελλοντικής συνιστώμενης αντοχής και επιστρέφει μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της φέρουσας ωφέλιμης ζωής με τη βοήθεια ιστορικών και εκτιμώμενων μελλοντικών συνθηκών λειτουργίας. Σε αυτή τη μέθοδο, η αρχή της

μηχανικής βλάβης χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση των αλλαγών της μικροδομής του υλικού, συνεπώς, λαμβάνει υπόψη τις ιδιότητες των υλικών, τη γεωμετρία των εδράνων, την αλληλεπίδραση επιφάνειας, τη λίπανση και τις μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας. Η **άλλη μέθοδος χρησιμοποιεί ένα εμπειρικό μοντέλο** για να υπολογίσει την ταχύτητα διάδοσης σφαλμάτων με βάση την κατάσταση, χρησιμοποιώντας δεδομένα από πειράματα σε γνωστές συνθήκες και επίπεδο βλάβης εξαρτημάτων. Αυτές οι δύο προσεγγίσεις συντήκονται με βάση την παλινδρόμηση Dempster-Shafer για να παράγουν ένα αποτέλεσμα που είναι πιο ακριβές και πιο ισχυρό από οποιαδήποτε από τις δύο μεθόδους. Τα πειραματικά αποτελέσματα από τις δοκιμασίες εξέδρας, στα οποία ξεκίνησε η εκσκαφή σε ένα ρουλεμάν και η προσεκτικά παρακολουθούμενη ανάπτυξή της, είναι σχεδόν το ίδιο με εκείνο των προγνωστικών εκτιμήσεων του λογισμού.

Ο Janjarasjitt et al. [26] έχει χρησιμοποιήσει μια τροποποιημένη μορφή του ολοκληρωτικού συσχετισμού που αναπτύχθηκε από τους Grassberger και Procaccia. Τα δεδομένα των κραδασμών μηχανής που λαμβάνονται καθ 'όλη τη διάρκεια της δοκιμής της ζωής ενός ρουλεμάν, στη συνέχεια αναλύονται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ολοκλήρωσης μερικής συσχέτισης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι **ο εκτιμητής διαστάσεων όπως υπολογίζεται από τον αλγόριθμο μερικής συσχέτισης τείνει να αυξάνεται καθώς ο χρόνος εξελίσσεται και η ωφέλιμη υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του ρουλεμάν μειώνεται**. Επομένως, αν επιλεγεί ένα κατάλληλο κατώφλι του διασταλτικού εκθέτη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της Εναπομένουσας Χρήσιμης Ζωής (EXZ) του ρουλεμάν. Ωστόσο, η μεθοδολογία πρέπει να επικυρωθεί περαιτέρω μέσω περισσότερων πειραμάτων, μοντελοποίησης και υπολογιστικής εργασίας.

Ο Ghafari [27] στο διδακτορικό του έργο χρησιμοποίησε σήματα δονήσεων και τρεις δείκτες παρακολούθησης, δηλαδή την Κανονικοποιημένη Εντροπία Πληροφοριών (ΚΕΠ), Διάσταση Συσχετισμού (ΔS), και Μέγιστος κατά Προσέγγιση Συντελεστής Wavelet (ΜΠΣW), ως είσοδο του διαγνωστικού σχήματος. Η έξοδος του συστήματος αντιστοιχεί στο επίπεδο της υγείας του ρουλεμάν. Επαναλαμβανόμενα Νευρωνικά Δίκτυα (ΕΝΔ) και Προσαρμοστικό Σύστημα Νευρο-ασαφούς Εξαγωγής Συμπερασμάτων (ΠΣΝΕΣ) χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της

αποτελεσματικότητας της πρόβλεψης των εδράνων. Το συμπέρασμα ήταν ότι **μία φορά ένα ΠΣΝΕΣ σύστημα εκπαιδεύεται με τα δεδομένα δόνησης σε σχέση με τα ρουλεμάν**, το δίκτυο μπορεί να ανιχνεύσει με ακρίβεια τη συμπεριφορά διάδοσης ζημιών και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για να προβλέψει μελλοντικές καταστάσεις της ίδιας σειράς εδράνων υπό διαφορετικές συνθήκες ταχύτητας και φορτίου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών επιβεβαιώνουν ποσοστό επιτυχίας μεγαλύτερο από 98 τοις εκατό.

Για ακριβή εκτίμηση της υπολειμματικής ζωής των εδράνων, ο Kim et al. [28] πρότεινε ένα μοντέλο πρόγνωσης μηχανής βασισμένο στην εκτίμηση της κατάστασης της υγείας χρησιμοποιώντας τις Υποστηρικτικές Μηχανές Υποστήριξης (ΥΜΥ). Έλλειψη σφαλμάτων σε Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο Υψηλής Πίεσης (ΦΑΥΠ) αναλύθηκαν για να ληφθεί η διαδικασία αποικοδόμησης βλάβης της αποτυχίας του ρουλεμάν και να επικυρώσει τη σκοπιμότητα του προτεινόμενου μοντέλου. Ο Kanekar et al. [23, 29] έχει επίσης δείξει την αποτελεσματικότητα του (ΥΜΥ) για ταξινόμηση σφαλμάτων έδρασης. Ωστόσο, χρειάζονται ακόμα αποτελεσματικές τεχνικές εξαγωγής χαρακτηριστικών για μια ποικιλία βλαβών.

Εκτός από τα παραπάνω μοντέλα, έχει προταθεί ένα **υβριδικό μοντέλο** [30], για να εκτιμηθεί η υποβάθμιση της απόδοσης των εδράνων συνδυάζοντας τα οφέλη της Περιγραφής Υποβάθρου Υποστήριξης Δεδομένων (ΠΥΥΔ), με εξαιρετικό υπολογισμό και Fuzzy C-Means (FCM), έναν αλγόριθμο με εξαιρετικά εύλογα αποτελέσματα. Το κέντρο συσσωμάτωσης της κανονικής κατάστασης λαμβάνεται από το ΠΥΥΔ. Η υποβολή των δοκιμασμένων δεδομένων σε κανονική κατάσταση, η οποία υπολογίζεται, χρησιμοποιεί Fuzzy C-Means (FCM) αλγόριθμο με τελικά δεδομένα αστοχίας, ο οποίος αλγόριθμος ορίζεται ως δείκτης αποικοδόμησης. Διεξήχθη δοκιμή επιταχυνόμενης ζωής ρουλεμάν για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας και της ευρωστίας του προτεινόμενου υβριδικού μοντέλου.

Σε μια από τις πρόσφατες έρευνες [9], η χρήση του Mixture of Gaussians Hidden Markov Model (MoGHMM) προτάθηκε για την πρόγνωση των εδράνων. Τα εξαγόμενα χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται για να μάθουν διαφορετικά μοντέλα που καταγράφουν τη χρονική εξέλιξη της υποβάθμισης και επομένως της

κατάστασης της υγείας του συστήματος σε ένα βήμα off-line. Στο βήμα on-line, η διάγνωση και η πρόγνωση της αποτυχίας πραγματοποιούνται με την εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασης υγείας του περιουσιακού στοιχείου και της Εναπομένουσας Χρήσιμης Ζωής (EXZ) από τα μαθημένα μοντέλα. Ωστόσο, απαιτούνται μελλοντικά έργα για να συγκριθεί η προτεινόμενη μέθοδος με τα υπάρχοντα έργα χρησιμοποιώντας τα ίδια δεδομένα για να εκτιμηθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Επιπλέον, θα ήταν ενδιαφέρον να δοκιμαστεί η μέθοδος σε ένα πραγματικό βιομηχανικό σύστημα.

3^ο Κεφάλαιο: Δομή του ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος χαρτοποιητικής μηχανής και του γεωργικού μηχανολογικού εξοπλισμού- Μέθοδοι διάγνωσης βλαβών.

3.1 Λειτουργία των συστημάτων εδράνων της χαρτοποιητικής μηχανής [31] [32] [33]

3.1.1 Φθορά και συντήρηση

Τα έδρανα κύλισης αποτελούν εκείνο το μηχανολογικό εξάρτημα των βιομηχανικών εγκαταστάσεων, που δέχεται πιθανόν τις πιο μακρόχρονες και **έντονες καταπονήσεις**. Είναι φυσικό λοιπόν να υφίστανται μεγάλη μηχανική φθορά. Επομένως είναι σημαντική η προσέγγιση της διάρκειας ζωής τους και η ένταξη των διαδικασιών συντήρησής τους σε ιδιαίτερα προγράμματα διαγνωστικής συντήρησης.

Η διάρκεια ζωής ενός εδράνου διατυπώνεται και ως «δυναμική ικανότητα έδρασης» και είναι ο αριθμός των περιστροφών, ή οι ώρες λειτουργίας που αντέχει το έδρανο χωρίς ένδειξη μιας καταπόνησης του υλικού κατασκευής είτε στους δακτυλίους, είτε στους δίσκους, είτε στα σώματα κύλισης. Η καταπόνηση του υλικού μπορεί να φανεί στην αρχή με μικρές σχισμές, οι οποίες αργότερα μπορούν να φτάσουν σε θρυμματισμούς. Για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής ενός εδράνου καθορίζεται ένας συντελεστής έδρασης. Ο συντελεστής αυτός ορίζεται σαν η ισοδύναμη δύναμη φόρτισης, κατά την οποία το 90% όλων των εδράνων φτάνουν σε μια διάρκεια ζωής του ενός εκατομμυρίου περιστροφών.

Ο συντελεστής έδρασης μπορεί να έχει διαφορετικές τιμές για περιπτώσεις λειτουργίας που έχουν όμοιες φορτίσεις. Για παράδειγμα το ίδιο δυναμικό σύστημα όταν λειτουργεί σε πολύ μεγαλύτερη θερμοκρασία επηρεάζει αρνητικά το δυναμικό

συντελεστή έδρασης, παρ' όλο που τα φορτία δυνάμεων και ροπών παραμένουν τα ίδια.

Ένα άλλο πρόβλημα συντήρησης των ρουλεμάν προκύπτει από την καταπόνησή τους σε **διάβρωση**. Τα ρουλεμάν χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία γκάμα μηχανισμών σε βιομηχανικές παραγωγικές διαδικασίες. Για το λόγο αυτό βρίσκονται σε επαφή με μια μεγάλη γκάμα ρευστών, τα οποία έχουν λιγότερο ή περισσότερο διαβρωτικές ιδιότητες, όπως το νερό, τα οξέα, οι βάσεις και διάφορα αέρια. Οι κατασκευαστές των ρουλεμάν έχουν εξοπλίσει τα σύγχρονα ρουλεμάν με μηχανισμούς στεγανοποίησής τους από τα διαχειριζόμενα στη παραγωγική διαδικασία ρευστά, ωστόσο ορισμένα από αυτά είναι ιδιαίτερα δραστικά και έτσι είναι αναγκαία η λήψη επιπλέον μέτρων. Επειδή στις περιπτώσεις αυτές τα ρουλεμάν υφίστανται μια σύνθετη καταπόνηση μηχανική και χημική, τα μέτρα αυτά αφορούν στη χρησιμοποίηση ειδικών υλικών κατά την κατασκευή των ρουλεμάν, στην κατάλληλη μηχανική προετοιμασία των επιφανειών καθώς επίσης και στη χρησιμοποίηση εξελιγμένων λιπαντικών. Οι συνηθέστερες περιπτώσεις βιομηχανικής παραγωγής, όπου απαιτείται η προστασία των εδράνων κύλισης από διάβρωση, συναντώνται στη χημική βιομηχανία και τη βιομηχανία τροφίμων, στη χαλυβουργία καθώς και στην βιομηχανία κατασκευής ημιαγωγών.

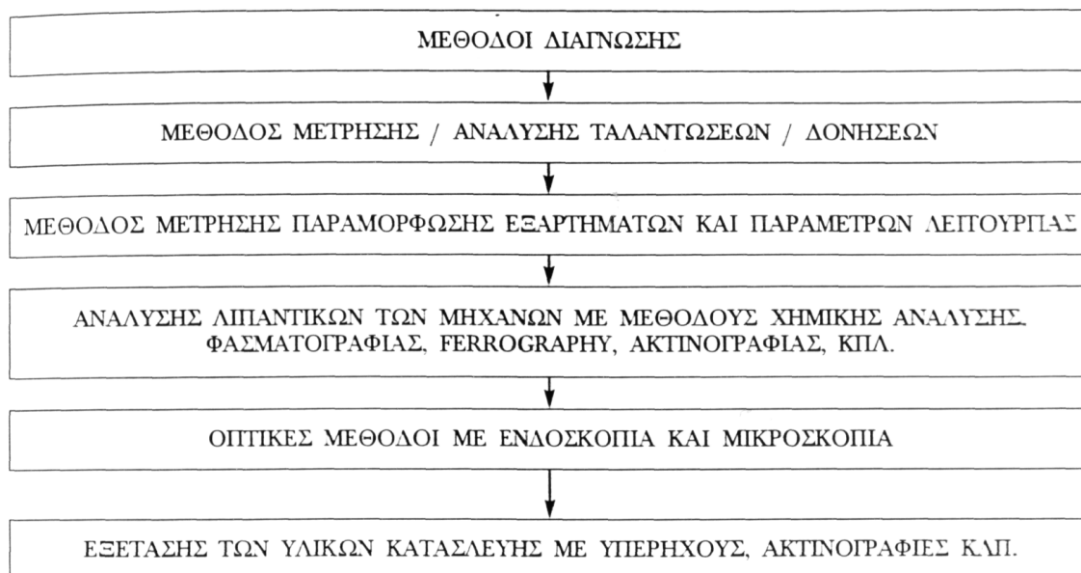
Για όλους τους παραπάνω λόγους είναι σκόπιμο να εντάσσεται η συντήρηση των ρουλεμάν μιας βιομηχανικής μονάδας σε ένα πρόγραμμα διαγνωστικής συντήρησης. Η διαγνωστική συντήρηση των ρουλεμάν εξασφαλίζει την λειτουργία των μηχανημάτων της παραγωγής και αποτελεί σημαντική διαδικασία για τις περιπτώσεις των γραμμών παραγωγής, όπου η ζημιά ενός ρουλεμάν μπορεί να προκαλέσει διακοπή όλης της γραμμής παραγωγής με συνέπεια οικονομική για την εταιρία.

3.2 Προληπτική συντήρηση και έλεγχος μηχανών - μέτρηση δονήσεων και κραδασμών

3.2.1 Αναφορά στις μεθόδους διάγνωσης [34]

Στην εικόνα 1 φαίνονται διάφοροι μέθοδοι διάγνωσης βλαβών μηχανών. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από το είδος των μηχανών, το ποσό που απαιτείται για την αγορά του διαγνωστικού εξοπλισμού, και από την αξιοπιστία και αποδοτική λειτουργία της διαγνωστικής μεθόδου.

Η μέθοδος μέτρησης/ανάλυσης ταλαντώσεων/δονήσεων είναι η πιο αποδοτική, εύκολη, αξιόπιστη και χαμηλού κόστους, που οδηγεί στην ασφαλή προληπτική διάγνωση βλαβών των μηχανών, πρόβλεψη του χρόνου αντικατάστασης φθαρμένων εξαρτημάτων, έγκαιρη εντόπιση ξαφνικών ζημιών π.χ. ραϊσματα γραναζιών, ρουλεμάν, έδρανων ολίσθησης (κουζινέτα), εντόπιση κακής ζυγοστάθμισης, εντόπισης κάμψης αξόνων κλπ.



Εικόνα 1 Μέθοδοι διάγνωσης βλαβών μηχανών

Η μέθοδος μέτρησης θορύβου μηχανών είναι μια βοηθητική μέθοδος, που πολλά διαγνωστικά όργανα χρησιμοποιούν παράλληλα με την μέτρηση ταλαντώσεων.

Η μέθοδος μέτρησης παραμέτρων εξαρτημάτων και παραμέτρων λειτουργίας όπως εκκεντρικότητας αξόνων /περιστρεφόμενων μαζών, μετρήσεις θερμοκρασίας σε διάφορα μέρη των μηχανών, πιέσεις λιπαντικών κλπ. Πολλά διαγνωστικά όργανα εκτελούν επίσης τις μετρήσεις αυτές. **Η μέθοδος όμως αυτή είναι βοηθητική.**

Η μέθοδος ανάλυσης λιπαντικών είναι παλιά τεχνολογία , ακριβή στην πράξη και δεν έχει τα πλεονεκτήματα της μεθόδου μέτρησης/ανάλυσης ταλαντώσεων/ δονήσεων, όπου δεν χρησιμοποιείται πια.

Επίσης, οι οπτικές μέθοδοι με ενδοσκοπία και μικροσκοπία είναι βοηθητικές μέθοδοι και δεν παρέχουν τα πλεονεκτήματα της μεθόδου μέτρησης ταλαντώσεων. Τέλος, η μέθοδος εξέτασης των υλικών κατασκευής των μηχανών με υπέρηχους, ακτινογραφίες κλπ. είναι βοηθητική μέθοδος αλλά δεν έχει τα πλεονεκτήματα της μεθόδου μέτρησης ταλαντώσεων.

3.3 Μέτρηση μηχανικών ταλαντώσεων

3.3.1 Μετρήσεις κατάστασης σε έδρανα κύλισης

Είναι τα πιο σημαντικά εξαρτήματα περιστρεφόμενων μηχανών και ο χρόνος ζωής τους είναι περιορισμένος και εξαρτάται από ένα αριθμό παραμέτρων που φαίνονται στον πίνακα 3.

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΤΗΝ ΧΡΗΣΗ
Κατασκευή	Ανομοιογένεια στα υλικά κατασκευής, κακές ανοχές κατασκευής
Αποθήκευση/Μεταφορά	Κακό πακετάρισμα και κραδασμοί κατά την μεταφορά
Εγκατάσταση	Παραμόρφωσης, κακός τρόπος φόρτισης, κακές ανοχές, σφάλματα ευθυγράμμισης
Λειτουργία	Υπερφόρτιση, κακή λίπανση, σκόνη, παρουσία χημικών αερίων, υγρασία, υπερθέρμανση

Πίνακας 3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ζωή των εδράνων κύλισης.

Με βάση το χρόνο οι παράγοντες αυτοί οδηγούν στην καταστροφή των εδράνων κύλισης. Τα αίτια της καταστροφής είναι δύο ειδών. Αναμενόμενα και μη αναμενόμενα, τα οποία φαίνονται στον πίνακα 4.

ΑΙΤΙΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΠΟΥ ΣΥΜΒΑΙΝΕΙ %
ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΑ	51%
Φθορά	25%
Μακροχρόνιος λειτουργία	18%
Διάβρωση	8%
ΜΗ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΑ	49%
Παραμόρφωση	14%
Σπασίματα	12%
Ρωγμές	12%
Υπερθέρμανση	11%

Πίνακας 4 Αίτια καταστροφής εδράνων κύλισης σε ποσοστά %.

Γενικά, πληροφορίες για τα αναπτυσσόμενα αίτια καταστροφής και την ελάττωση της ζωής των εδράνων κύλισης λαμβάνονται μόνον με ειδικές μετρήσεις. Οι βλάβες και οι καταστροφές είναι μερικές φορές μη αναμενόμενες. Εάν δεν τις αντιληφθούμε εγκαίρως, μπορούν να οδηγήσουν στις εξής βλάβες:

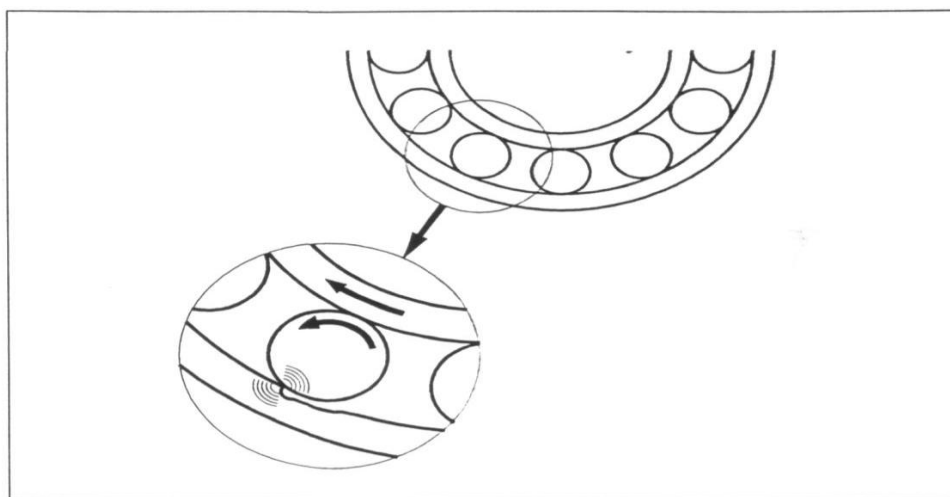
- Κακή λειτουργία
- Ζημιές στους εξωτερικούς και εσωτερικούς δακτυλίους
- Παραμόρφωση του άξονα
- Σπάσιμο της ζεύξης και πιθανόν καταστροφή των τυλιγμάτων της μηχανής.
- Βλάβη σε άλλα λειτουργικά εξαρτήματα και στο περίβλημα της μηχανής.
- Ανάφλεξης του λιπαντικού
- Εξωτερική φωτιά.

Για κάθε περίπτωση βλάβης η μηχανή πρέπει να τεθεί εκτός λειτουργίας, να αποσυναρμολογηθεί, να ξανά αντικατασταθούν τα κατεστραμμένα εξαρτήματα και να συναρμολογηθεί ξανά.

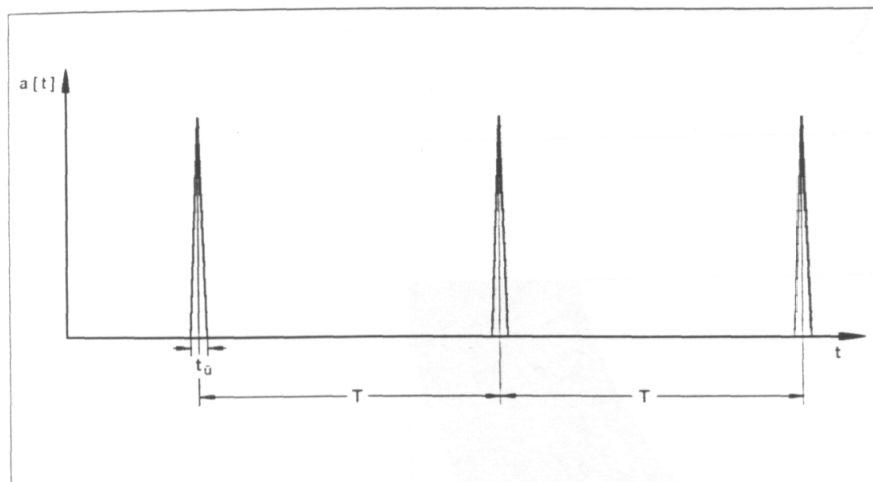
Με τις διαγνωστικές μεθόδους ανάλυσης των ταλαντώσεων η κατάσταση των εδράνων κύλισης μπορεί να αξιολογηθεί. Έτσι, μπορεί να γίνει πρόγνωση του

χρόνου ζωής των εδράνων, πρόγνωση βλαβών και έτσι να αποφευχθεί η στάση λειτουργίας των μηχανών.

Βλάβες δημιουργούνται στα έδρανα κύλισης λόγω ρωγμών των υλικών, ρωγμών στους δακτυλίους των εδράνων, ρωγμών και σπασίματα στις μπίλιες ή κυλινδρικά στοιχεία όπως φαίνεται στην εικόνα 1. Μεταβολές στην γεωμετρία των εδράνων δημιουργούν παλμούς κτυπημάτων, όταν οι κινούμενες μπίλιες ή κύλινδροι έρχονται σε επαφή με τις κατεστραμμένες επιφάνειες. Οι περιοδικοί αυτοί παλμοί δημιουργούν μηχανικές ταλαντώσεις και ηχητικούς παλμούς, που διαδίδονται μέσω του εξωτερικού δακτυλίου του εδράνου προς τα έξω. Οι παλμοί αυτοί ονομάζονται συνήθως "shock impulses". Ένα τυπικό παράδειγμα παλμών κρούσεως φαίνεται στην εικόνα 2.



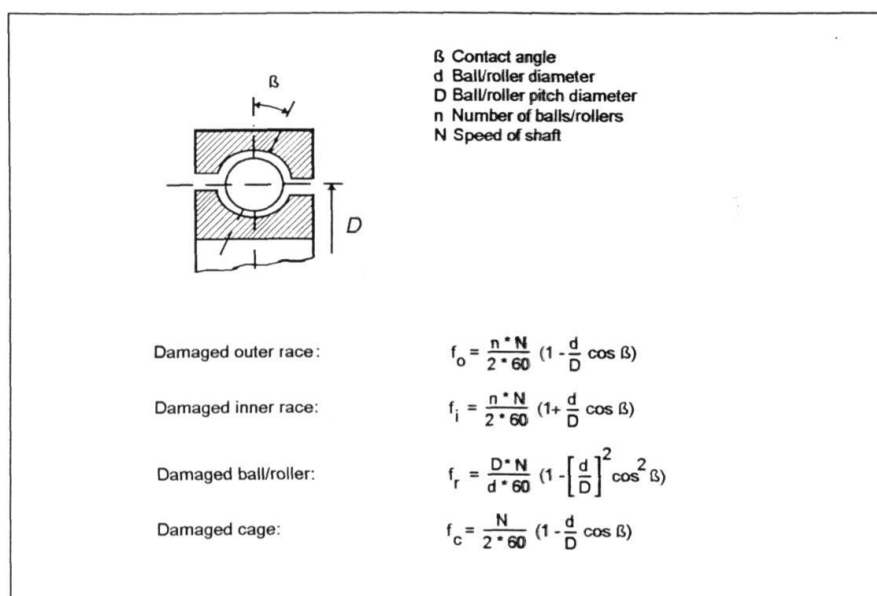
Εικόνα 2 Παλμοί "shock" που συμβαίνουν όταν οι μπίλιες κτυπούν φθαρμένα σημεία, κυρίως του εξωτερικού δακτυλίου των εδράνων [34].



Εικόνα 3 Οι παλμοί κρούσης.

Οι παλμοί κρούσης "shock" όπως φαίνονται παραπάνω στην εικόνα 2 έχουν υψηλό πλάτος και μικρό εύρος (tu) συγκρινόμενα με τη χρονική απόσταση των παλμών (T). Το πλάτος των παλμών είναι ο δείκτης της ισχύος της κρούσης και εξαρτάται από την ταχύτητα και το φορτίο του ρουλεμάν. Η συχνότητα καταστροφής προσδιορίζεται από τη γεωμετρία του ρουλεμάν, τον τρόπο συναρμολόγησής του και την ταχύτητα του άξονα.

Επομένως, παρατηρούμε από την εικόνα 4 ότι η αλληλεξάρτηση των παραμέτρων αυτών δίδεται από τις εξισώσεις αυτές και υπολογίζεται για ένα τυπικό έδρανο με ταχύτητα 3000 rpm όπως φαίνεται στην εικόνα 5. Η υπάρχουσα κατάσταση καταστροφής δημιουργεί 4 συχνότητες όπου το εύρος του παλμού και τη περίοδο του για μια τυπική καταστροφή τα είδαμε στην εικόνα 3.



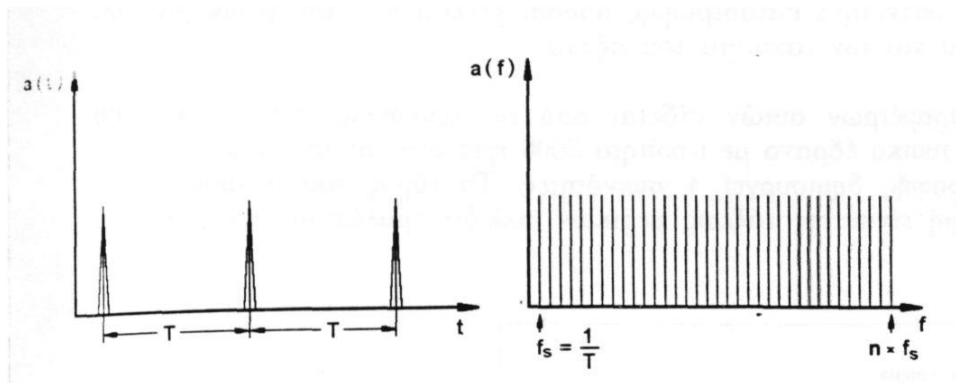
Εικόνα 4 Συχνότητες καταστροφής σε ένα έδρανο κύλισης [34].

Roller bearing type SKF 6211

Dimensions	Damage frequencies
$D = 77,5 \text{ mm}$	$f_o = N/60 * 4,1 = 205 \text{ Hz}$
$d = 14,3 \text{ mm}$	$f_i = N/60 * 5,9 = 295 \text{ Hz}$
$n = 10$	$f_r = N/60 * 5,2 = 260 \text{ Hz}$
$\beta = 0$	$f_c = N/60 * 0,4 = 20 \text{ Hz}$

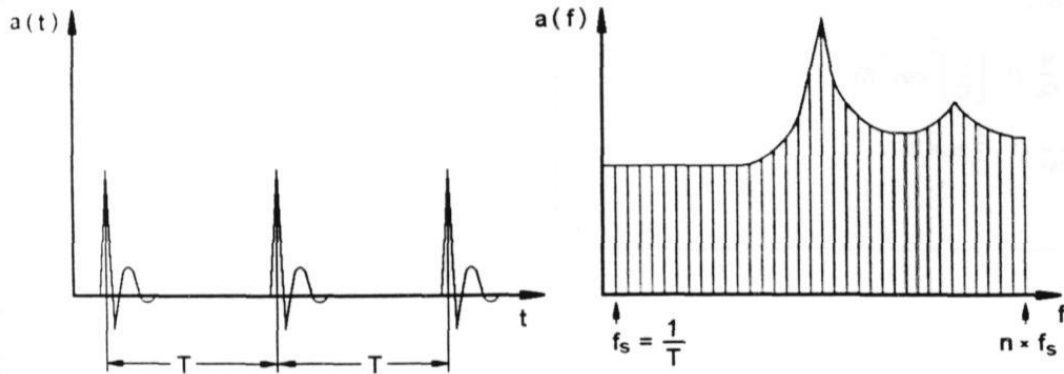
Εικόνα 5 Πρακτικό παράδειγμα συχνότητων καταστροφής ενός εδράνου κύλισης SKF 6211 [34].

Οι συχνότητες καταστροφής φθάνουν και υπερβαίνουν τα 100 kHz. Το φάσμα των παλμών κρούσης φαίνονται στην εικόνα 5.



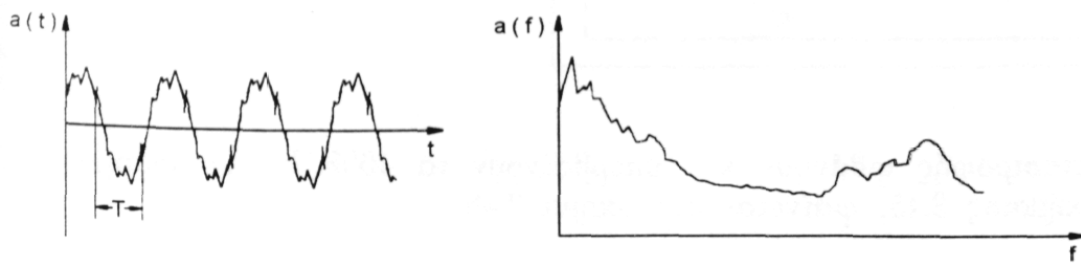
Εικόνα 6 Οι παλμοί κρούσης του εδράνου (αριστερά) και το φάσμα αυτών (δεξιά). f_s = συχνότητα καταστροφής, T = χρόνος μεταξύ δυο παλμών.

Οι συχνότητες συντονισμού του ρουλεμάν και της φωλιάς του δημιουργούν μεταβολές στους παλμούς κρούσης και στο φάσμα συχνοτήτων του. Οι παλμοί στον εξωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν και στη φωλιά του φαίνονται στην εικόνα 7.



Εικόνα 7 Οι παλμοί κρούσης μετά τη μετάδοσή των στον εξωτερικό δακτύλιο και στη φωλιά του εδράνου.

Οι παλμοί κρούσης προστίθενται στο σήμα ταλαντώσεων που έχει πολύ υψηλότερο πλάτος. Αυτές οι ταλαντώσεις δημιουργούνται π.χ. από κακή ζυγοστάθμιση του περιστρεφόμενου άξονος, συχνότητες σύμπλεξης γραναζιών, ηλεκτρομαγνητικές ταλαντώσεις ενός ηλεκτρικού κινητήρα, μηχανικές κρούσεις και άλλους ενοχλητικούς παράγοντες. Έτσι, το σήμα ταλαντώσεων στην επιφάνεια μιας μηχανής έχει μορφή όπως δείχνει η εικόνα 8.

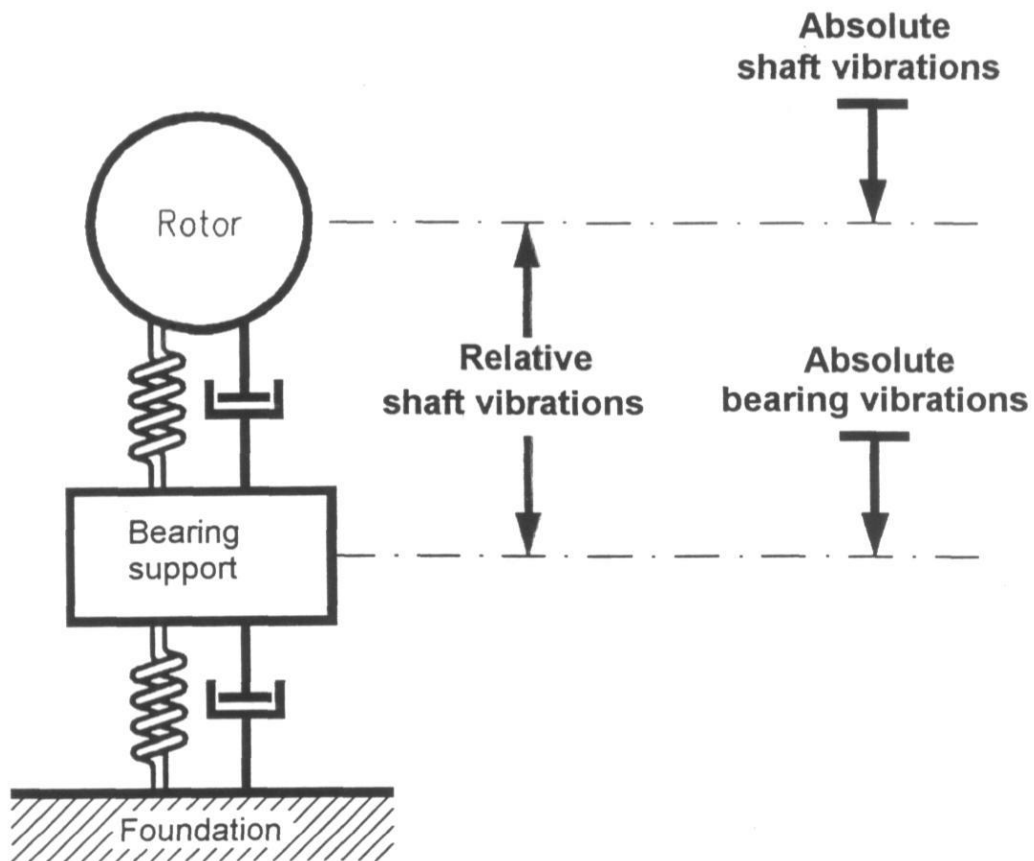


Εικόνα 8 Παλμοί κρούσης στο πλάτος των ταλαντώσεων μιας μηχανής (αριστερά) –
Δεξιά είναι η φασματική ανάλυση αυτών.

3.4 Μέτρηση μηχανικών ταλαντώσεων [34]

3.4.1 Τύποι ταλαντώσεων στις μηχανές

Οι ταλαντώσεις που παράγονται στις μηχανές προέρχονται από περιστροφικές ή παλινδρομικές κινήσεις. Κακή ζυγοστάθμιση σε μια μηχανή επάγει ταλαντώσεις στα μέρη της μηχανής. Οι φυγοκεντρικές δυνάμεις που δημιουργούνται από κακή ζυγοστάθμιση δημιουργούν και άλλες δυνάμεις στους άξονες όπως μαγνητικές και υδραυλικές, που κάνουν τους άξονες να δονούνται. Αυτές οι δυνάμεις και ταλαντώσεις μεταφέρονται από τα έδρανα κύλισης (ρουλεμάν), στις βάσεις αυτών (Bearing supports). Επίσης, μεταφέρονται από τα λιπαντικά των κουζινέτων (έδρανα ολίσθησης), στις φωλιές των κουζινέτων. Όλες αυτές οι δυνάμεις και ταλαντώσεις μεταφέρονται και στις βάσεις των μηχανών (foundations) και στο εξωτερικό κέλυφος των μηχανών.



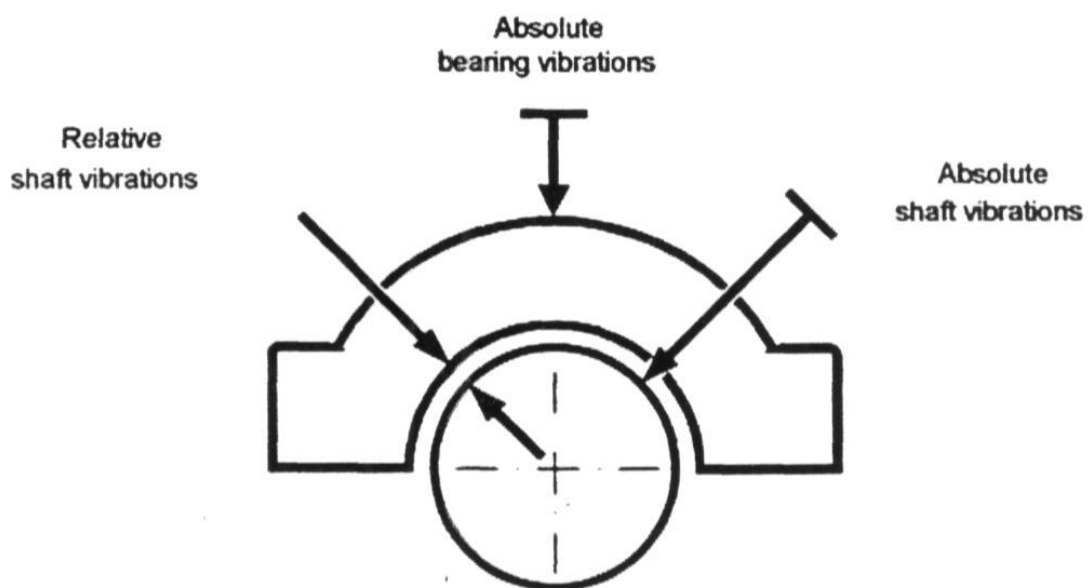
Εικόνα 9 Τύποι ταλαντώσεων στις μηχανές [34].

Οι δονήσεις που μεταδίδονται εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους. Οι πιο σημαντικές είναι η κατάσταση των λιπαντικών, τα έδρανα και οι βάσεις τους, η μάζα του άξονα. Για να καταλήξουμε αν πρέπει να αξιολογήσουμε τις ταλαντώσεις του άξονα ή των εδράνων πρέπει να λάβουμε υπόψη τους εξής κανόνες:

- Κανόνας 1 : Πρέπει να επιλέξουμε τη μέτρηση ταλάντωσης που μας δίνει περισσότερες πληροφορίες για την κατάσταση της μηχανής.
- Κανόνας 2 : Οι περισσότερες πληροφορίες παρέχονται με μέτρηση των εξής μεγεθών :
 - Τη σχετική τιμή πλάτους ταλάντωσης σε μηχανές που έχουν έδρανα ολίσθησης (κουζινέτα).
 - Την απόλυτο τιμή πλάτους ταλάντωσης σε μηχανές που έχουν έδρανα κύλισης (ρουλεμάν).

Υπάρχουν τρεις τύποι ταλαντώσεων (εικόνες 9 και 10) που μπορούν να μετρηθούν σε μηχανές:

- Απόλυτη τιμή ταλαντώσεων στα έδρανα (Absolute bearing vibration). Αυτό σημαίνει ταλαντώσεις του κελύφους του εδράνου και της φωλιάς αυτού με αναφορά ένα σημείο στην μηχανή.
- Σχετική ταλάντωση άξονα (Relative Shaft vibration). Αυτό σημαίνει, ταλαντώσεις του άξονα σε σχέση με την φωλιά του εδράνου.
- Απόλυτο τιμή ταλαντώσεων στον άξονα (Absolute shaft vibration). Αυτό σημαίνει, ταλαντώσεις του άξονα σε αναφορά ένα σημείο της μηχανής



Εικόνα 10 Οι τρεις τύποι δονήσεων και τα σημεία μέτρησής τους σε ένα έδρανο ολίσθησης

3.5 Προοπτικές Εφαρμογών της μετρητικής διάταξης στη βιομηχανία

Σαν πλεονέκτημα, που θα μπορούσε να προκύψει από την εφαρμογή των συστημάτων διάγνωσης σε ένα εργοστάσιο Χαρτοποιίας, είναι ότι η βλάβη σε έδρανα κινητήρων απαιτεί έως και δύο μέρες για να εντοπιστεί και να διορθωθεί. Τα διαφυγόντα κέρδη από μια τόσο μακρά διακοπή της παραγωγής είναι τεράστια.

Με τη χρήση όμως μετρικών οργάνων, που θα μπορούσαν να εγκατασταθούν μόνιμα σε όλους τους μεγάλους κινητήρες ενός εργοστασίου, το σφάλμα θα μπορούσε να ανιχνεύεται και να εντοπίζεται έγκαιρα στο αρχικό στάδιο από την ανάλυση των κραδασμών του κινητήρα και ο χρόνος διακοπής της λειτουργίας για την επισκευή θα μειωνόταν στις δύο έως τρεις μόνο ώρες. Με τη χρήση τέτοιων διαγνωστικών συστημάτων το εργοστάσιο θα μπορούσε να ελαχιστοποιήσει τις διακοπές παραγωγής.

3.6 Προηγμένες μέθοδοι διάγνωσης βλαβών γεωργικού μηχανολογικού εξοπλισμού

Ο γεωργικός μηχανολογικός εξοπλισμός είναι κατά κύριο λόγο οι γεωργικοί ελκυστήρες οι οποίοι αποτελούν το βασικότερο εργαλείο στην εκμηχάνιση της γεωργίας, καθώς και όλα τα άλλα αυτοκινούμενα γεωργικά μηχανήματα. Επίσης, εννοούμε όλες τις μηχανές παραγωγής ή και επεξεργασίας προϊόντων, τους γερανούς που χρησιμοποιούνται στις γεωργοκτηνοτροφικές εγκαταστάσεις και που έχουν ως λειτουργικά μέρη, ηλεκτρικούς κινητήρες, συστήματα μετάδοσης ισχύος, μάντες κίνησης και πλήθος άλλων δομικών στοιχείων. Ένα από τα βασικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι παραγωγοί είναι η σχετικά μεγάλη δαπάνη που απαιτείται για την επισκευή και συντήρηση του γεωργικού μηχανολογικού εξοπλισμού τους. Εδώ δίνεται έμφαση στην εφαρμογή προηγμένων μεθόδων πρόγνωσης και διάγνωσης βλαβών με τις οποίες μπορούμε να επιτύχουμε ομαλή λειτουργία του χρόνου ζωής των μηχανών, αποφυγή καταστρεπτικών βλαβών και βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων.

3.7 Μέθοδοι μέτρησης παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος μηχανικής μετάδοσης της κίνησης

Η μεταφορά της περιστροφικής κίνησης από την πηγή ισχύος προς τα άλλα σημεία του γεωργικού ελκυστήρα πραγματοποιείται με μηχανισμούς, όπως ο συμπλέκτης.

Οι μηχανισμοί αυτοί περιλαμβάνουν οδοντωτούς τροχούς, άξονες, έδρανα, συνδέσμους κ.ά.

Οι οδοντωτοί τροχοί, είναι στοιχεία μηχανών που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση της περιστροφικής κίνησης και τη μεταφορά της ισχύος μέσω διαδοχικής εμπλοκής συνεργαζόμενων οδόντων. Οι οδόντες αυτοί είναι σχηματισμοί αλληπάλληλων εσοχών και προεξοχών στην περιφέρεια ενός οδοντωτού τροχού, τέτοιες ώστε να είναι δυνατή η συνεργασία της εσοχής του ενός τροχού με την προεξοχή του συνεργαζόμενου οδοντωτού τροχού και κατασκευάζονται με διαφορετικά προφίλ κατατομών, όπως: της εξελιγμένης, της ορθοκυκλοειδούς, της επικυκλοειδούς, της περικυκλοειδούς και της υποκυκλοειδούς καμπύλης, ή τόξου κύκλου, ή ακόμα και σπείρας. Συνηθέστερη μεταξύ αυτών είναι η κατατομή της εξελιγμένης, η οποία είναι η καμπύλη εκείνη που διαγράφει ένα σημείο ευθείας κυλιόμενης χωρίς ολίσθηση επί κύκλου.

Μία από τις σημαντικότερες βλάβες που παρουσιάζονται στους οδοντωτούς τροχούς είναι αυτή της κόπωσης ή γήρανσης του υλικού. Επίσης, δεν είναι τυχαίο πως σε κάποιες περιπτώσεις, ιδιαίτερα σε οδοντωτούς τροχούς που έχουν εργαστεί για πολλές ώρες, η περιοχή κοντά στη διάμετρο του αρχικού κύκλου εμφανίζεται να είναι με χρώμα "μελανό".

Οι κυριότερες αιτίες που προκαλούν τις βλάβες στους οδοντωτούς τροχούς συνοψίζονται παρακάτω (Τριάντης, 2008):

- Η υπερφόρτιση των κατατομών είναι το αποτέλεσμα κρουστικών φορτίων. Ως αποτέλεσμα της υπερφόρτισης έχουμε τη δημιουργία ραβδώσεων επί των κατατομών του οδοντωτού τροχού που απογυμνώνουν τον οδόντα.
- Η υπερβολική ταχύτητα περιστροφής (πέραν του επιτρεπτού): Το αίτιο αυτό ισχύει για μηχανισμούς οι οποίοι δεν έχουν συστήματα μέτρησης και ελέγχου της ταχύτητας. Οι οδοντωτοί τροχοί λοιπόν, είναι πιθανό να εργάζονται σε στροφές μεγαλύτερες του επιτρεπτού ορίου.
- Τα ξένα σωματίδια: Η ύπαρξη ξένων σωματιδίων στις συνεργαζόμενες κατατομές δημιουργεί επαφή στερεού με στερεό, η οποία προκαλεί τοπική συγκόλληση που πρέπει να αποφεύγεται.

- Η ακατάλληλη θερμική κατεργασία: Οι οδόντες συνήθως υφίστανται επιφανειακή σκλήρυνση, η οποία όμως θα είναι ακατάλληλη αν το πάχος σκληρύνσεως προκύψει ανομοιόμορφο επί της επιφάνειας των οδόντων του τροχού.
- Η ακατάλληλη λίπανση στις οδοντώσεις: Γενικά στους οδοντωτούς τροχούς συνίσταται η χρήση λιπαντικού κατάλληλου για υψηλές πιέσεις, διότι η επαφή των κατατομών είναι συνήθως μόνο γραμμική. Το σύστημα λιπάνσεως, θα πρέπει να μπορεί να λιπαίνει όλες τις θέσεις εργασίας, το δε λιπαντικό θα πρέπει να παραμένει επί της κατατομής του οδόντος μέχρι τη στιγμή της επαφής των κατατομών. Μέσα από το λιπαντικό μεταφέρονται τα ξένα σωματίδια. Είναι απαραίτητο, το λιπαντικό να φιλτράρεται και να είναι απαλλαγμένο από οιαδήποτε πρόσμιξη που αποτελεί απειλή για τους οδοντωτούς τροχούς.
- Η ακατάλληλη κατασκευή: Οι κατατομές των δοντιών πρέπει να έχουν κατασκευασθεί με ακρίβεια, οι δε πόδες των οδόντων πρέπει να είναι οι προβλεπόμενοι.
- Η ακατάλληλη συναρμολόγηση: Οι περισσότερες των περιπτώσεων που έχουν σχέση με την κακή συναρμολόγηση των οδοντωτών τροχών είναι: η χαλαρή πρόσδεση των τροχών στους άξονες, των αξόνων στα έδρανα, των εδράνων στο κέλυφος και η κακή ευθυγράμμιση.

Το άσχημο σχέδιο μελέτης: Στην κατασκευή των οδοντωτών τροχών, ο μελετητής θα πρέπει να ακολουθήσει την καλύτερη διαθέσιμη τεχνική για να εφοδιάσει τους τροχούς με ακριβή και κατάλληλα μεγέθη, όπως διάμετρο αρχικού κύκλου, πλάτος, υλικό και επιφανειακές κατεργασίες.

Τα έδρανα κύλισης (ρουλεμάν) είναι βασικά δομικά στοιχεία των μηχανών ή των μηχανισμών, σχεδιασμένα να μεταφέρουν αξονικό και/ή ακτινικό φορτίο, ελαχιστοποιώντας την περιστροφική τριβή με την τοποθέτηση σφαιρικών ή κυλινδρικών στοιχείων μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών δακτυλίων των εδράνων. Χρησιμοποιούνται ευρέως στον γεωργικό μηχανολογικό εξοπλισμό όπως σε ηλεκτρικούς κινητήρες, αντλίες και κιβώτια ταχυτήτων.

Τα έδρανα κύλισης έχουν τέσσερα βασικά στοιχεία: την εσωτερική επιφάνεια κύλισης, την εξωτερική επιφάνεια κύλισης, τα στοιχεία κύλισης και τον κλωβό ή διαχωριστή. Η εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια κύλισης καθώς και τα στοιχεία κύλισης υποστηρίζουν το φορτίο ενώ ο κλωβός διαχωρίζει τα γειτονικά στοιχεία κύλισης προκειμένου να αποφευχθεί η μεταξύ τους τριβή.

Η διάρκεια ζωής ενός εδράνου μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον αριθμό των περιστροφών του, ή τις ώρες λειτουργίας του, χωρίς το έδρανο να εμφανίζει καμία ένδειξη κόπωσης του υλικού κατασκευής. Η κόπωση του υλικού μπορεί να παρουσιαστεί στην αρχή με μορφή μικρών ρωγμών, οι οποίες αργότερα είναι πιθανόν να οδηγήσουν σε θρυμματισμούς. Έχει αποδειχθεί ότι έδρανα ίδιου μεγέθους κατασκευής και υλικού έχουν διαφορετική διάρκεια ζωής ακόμη και όταν λειτουργούν κάτω από ίδιες συνθήκες λειτουργίας. Σημαντικές φάσεις του κύκλου ζωής ενός εδράνου, οι οποίες έχουν αντίκτυπο στη διάρκεια λειτουργίας του είναι η τοποθέτηση, η λίπανση, η ευθυγράμμιση και η παρακολούθηση εν ώρα λειτουργίας. Οι φάσεις του κύκλου ζωής του εδράνου είναι πολύ σημαντικές για να επιτύχουμε τη μέγιστη διάρκεια λειτουργίας του.

Κατά τη λειτουργία των εδράνων μπορεί να παρουσιαστούν βλάβες που οφείλονται σε πολλούς και διαφορετικούς παράγοντες, όπως: υπερβολική φόρτιση, υπερθέρμανση, Brinelling, θρυμματισμός, ρύπανση, κακή λίπανση, διάβρωση, και κακή ευθυγράμμιση.

Η υπερβολική φόρτιση προκαλεί μόνιμες βλάβες στα έδρανα. Η σφικτή συναρμογή, και η ακατάλληλη φόρτιση επιφέρουν την πρόωρη κόπωση και τη φθορά των εδράνων.

Οι υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν αποχρωματισμό του υλικού των δακτυλίων και των σφαιρών. Τα σημάδια Brinell εμφανίζονται στα έδρανα κύλισης τα οποία έχουν τοποθετηθεί λανθασμένα ή έχουν υποστεί εξαιρετικά μεγάλη κρουστική καταπόνηση η οποία υπερβαίνει το ελαστικό όριο του υλικού των δακτυλίων.

Ο θρυμματισμός μπορεί να λάβει χώρα στον εσωτερικό δακτύλιο, στον εξωτερικό δακτύλιο, ή στις σφαίρες. Η φθορά αυτή είναι προοδευτική και εξαπλώνεται σε

ολόκληρη την επιφάνεια εργασίας. Συνοδεύεται από σημαντική αύξηση των κρουστικών παλμών.

Η ρύπανση είναι μία από τις κύριες αιτίες αποτυχίας των εδράνων. Τα συμπτώματα της ρύπανσης είναι υψηλοί κρουστικοί παλμοί και πρόωρη φθορά.

Η κακή ευθυγράμμιση μπορεί να ανιχνευθεί στον οδηγό (αυλάκι) του μη περιστρεφόμενου δακτυλίου από ένα μονοπάτι φθοράς το οποίο δεν είναι παράλληλο με τις ακμές της τροχιάς.

4^ο Κεφάλαιο: IEEE PHM 2012 Προγνωστική πρόκληση

Περίγραμμα, Πειράματα, Βαθμολόγηση αποτελεσμάτων

4.1 Επισκόπηση της IEEE PHM 2012 Προγνωστικής πρόκλησης

4.1.1 Η πρόγνωση της διάρκειας ζωής των εδράνων (ρουλεμάν)

Το IEEE PHM 2012 Data Challenge οργανώθηκε από την IEEE Reliability Society και το ινστιτούτο FEMTO-ST. Αυτή η πρόκληση εστιάζει στην εκτίμηση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής (RUL) των ρουλεμάν. Είναι ένα κρίσιμο πρόβλημα από την στιγμή που οι περισσότερες βλάβες των μηχανών με κινούμενα μέρη είναι σχετιζόμενες με τα ρουλεμάν επηρεάζοντας τη διαθεσιμότητα, την ασφάλεια, το κόστος απόδοσης των μηχανικών συστημάτων και συσκευών στην βιομηχανία όπως ενέργεια και μεταφορές.

4.1.2 Challenge datasets

Τα PHM challenge datasets δόθηκαν από το ινστιτούτο FEMTO-ST (Besançon - France, <http://www.femto-st.fr/>). Τα πειράματα διεξήχθησαν σε μια εργαστηριακή πλατφόρμα πειραμάτων (PRONOSTIA) που επιτρέπει την επιτάχυνση της φθοράς των ρουλεμάν κάτω από σταθερές ή μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας καθώς συλλέγονται ταυτόχρονα στοιχεία της κατάστασης των ρουλεμάν (περιστροφική ταχύτητα, εφαρμοζόμενη δύναμη, θερμοκρασία, δονήσεις).

Όσον αφορά την PHM Challenge,, ελήφθησαν υπόψη δεδομένα που αντιπροσωπεύουν 3 διαφορετικά φορτία (ταχύτητα περιστροφής και δύναμη φορτίου). Οι συμμετέχοντες έλαβαν 6 σετ στοιχείων έτσι ώστε να φτιάξουν τα δικά τους προγνωστικά μοντέλα και τους ζητήθηκε να υπολογίσουν με ακρίβεια τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής (RUL) από 11 ρουλεμάν. Τα στοιχεία παρακολούθησης από τα 11 ρουλεμάν της δοκιμασίας κόπηκαν έτσι ώστε οι συμμετέχοντες να μπορούν να προβλέψουν τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής και έτσι να κάνουν υπολογισμούς για τον (RUL). Επίσης δεν δόθηκε καμία λεπτομέρεια σχετικά με το είδος της βλάβης που θα λάβει χώρα.

Τα σετ στοιχείων πρόκλησης χαρακτηρίστηκαν από μικρό αριθμό στοιχείων εκπαίδευσης και από υψηλή ποικιλία διάρκειας των πειραμάτων (από 1 έως 7 ώρες). Έτσι το να κάνεις καλές εκτιμήσεις ήταν σχετικά δύσκολο και ενώ έκανε την πρόκληση πιο συναρπαστική.

4.1.3 Αναγνώριση

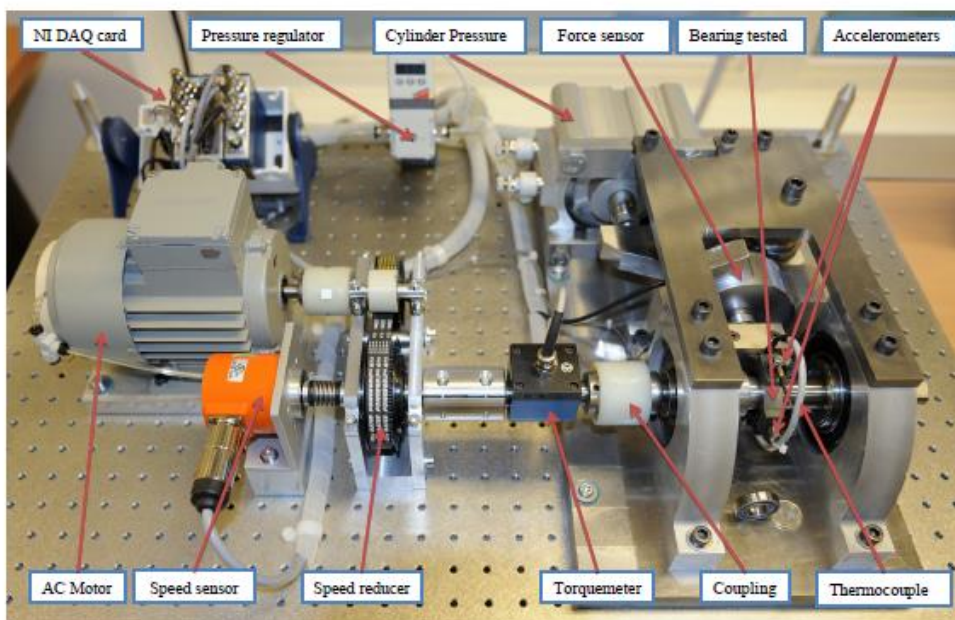
Τα σετ των δεδομένων ή στοιχείων είναι διαθέσιμα στο ευρύ κοινό. Οι δημοσιεύσεις που περιλαμβάνουν αυτές τις βάσεις δεδομένων θα πρέπει να αναφέρουν τα ακόλουθα:

Patrick Nectoux, Rafael Gouriveau, Kamal Medjaher, Emmanuel Ramasso, Brigitte Morello, Noureddine Zerhouni, Christophe Varnier. PRONOSTIA: An Experimental Platform for Bearings Accelerated Life Test. IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, Denver, CO, USA, 2012.

4.2 Η πλατφόρμα PRONOSTIA

4.2.1 Περιγραφικά

Η PRONOSTIA είναι μια πειραματική πλατφόρμα (εικ. 11) ειδικά για τον έλεγχο και την επιβεβαίωση της μη σωστής ανίχνευσης της βλάβης, της πρόγνωσης και διάγνωσης της κατάστασης των ρουλεμάν. Η πλατφόρμα έχει σχεδιαστεί και υλοποιηθεί στο τμήμα AS2M του Ινστιτούτου FEMTO-ST. Ο κύριος σκοπός της PRONOSTIA είναι να παρέχει πραγματικά πειραματικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν την υποβάθμιση της κατάστασης των σφαιρικών ρουλεμάν κατά την διάρκεια του ωφέλιμου χρόνου λειτουργίας τους (μέχρι δηλαδή και την ολική αστοχία αυτών).



Εικόνα 11 PRONOSTIA

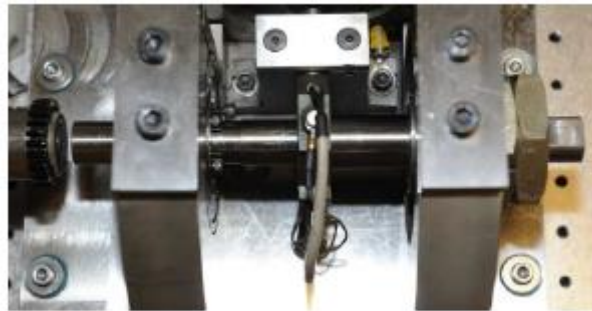
Αυτή η πειραματική πλατφόρμα επιτρέπει την διεξαγωγή της υποβάθμισης της απόδοσης των ρουλεμάν μέσα σε λίγες ώρες. Επίσης, σε σχέση με άλλες συσκευές ελέγχου ρουλεμάν που προτείνονται σε βιβλιογραφίες, τα στοιχεία που λαμβάνονται από την PRONOSTIA είναι διαφορετικά με την έννοια ότι αντιστοιχούν σε πιο κανονικές καταστάσεις επιδείνωσης των ρουλεμάν. Αυτό σημαίνει ότι τα ελαττώματα δεν προκαλούνται οικειοθελώς έτσι σε κάθε επιδείνωση της κατάστασης περιέχονται σχεδόν όλοι οι τύποι των ελαττωμάτων (σφαιρίδια, δακτυλίδια και φωλιές). Επιπλέον, αν και τα δεδομένα που δόθηκαν στον προηγούμενο διαγωνισμό αφορούσαν σταθερές συνθήκες λειτουργίας για κάθε πείραμα που πραγματοποιήθηκε. Αυτός ο σχεδιασμός της PRONOSTIA δίνει την δυνατότητα να παραχθούν δεδομένα της επιδείνωσης της κατάστασης των ρουλεμάν κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Η PRONOSTIA αποτελείται από τρία κύρια μέρη: **το περιστρεφόμενο μέρος, το μέρος που δημιουργείται η υποβάθμιση της απόδοσης του ρουλεμάν (μέσω μιας ακτινικής δύναμης που εφαρμόζεται στο προς έλεγχο ρουλεμάν) και το μέρος που γίνονται οι μετρήσεις.** Όλα αυτά θα περιγραφούν παρακάτω.

4.2.2 Περιστρεφόμενο Μέρος

Αυτό το μέρος περιλαμβάνει το ασύγχρονο κινητήρα με το μειωτήρα στροφών και τους δύο άξονες: Ο πρώτος είναι κοντά στον κινητήρα (μοτέρ) και ο δεύτερος είναι τοποθετημένος από την πλευρά που βρίσκεται ο κωδικοποιητής σταδιακής αύξησης. Το μοτέρ έχει δύναμη που αντιστοιχεί σε 250 W και μεταφέρει την περιστροφική κίνηση μέσω ενός μειωτήρα στροφών, ο οποίος επιτρέπει στο μοτέρ να φθάσει τις 2830 rpm, έτσι μπορεί να μεταφέρει την ροπή ενώ διατηρεί την ταχύτητα του δεύτερου άξονα στις 2000 rpm. Σταθεροί σύνδεσμοι χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν την περιστροφική κίνηση του άξονα που παράγεται από το μοτέρ προς τον άξονα που στηρίζει το ρουλεμάν.

Ο άξονας που στηρίζει το ρουλεμάν (εικ 12.) περνάει μέσα από τον εσωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν. Αυτό παραμένει σταθερό στον άξονα με την βοήθεια ενός στηρίγματος από την δεξιά πλευρά του και ενός δακτυλιδιού ασφαλείας με

σπείρωμα από την αριστερή πλευρά. Ο άξονας ο οποίος είναι κατασκευασμένος από ένα κομμάτι συγκρατείται με τη βοήθεια δύο μπλοκ μαξιλαριού και τα μεγάλα γρανάζια τους. Δύο σφικτήρες επιτρέπουν τη διαμήκη φραγή του άξονα μεταξύ των δύο μπλοκ στήριξης. Μια μηχανή που ελέγχεται από χειριστή επιτρέπει σε αυτόν να εφαρμόσει την ταχύτητα που επιθυμεί, να αλλάξει την φορά περιστροφής του μοτέρ και να προκαθορίσει τις τιμές των παραμέτρων παρακολούθησης όπως την στιγμιαία τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας σε ποσοστά σε σχέση με την μέγιστη θερμοκρασία κατά την λειτουργία.

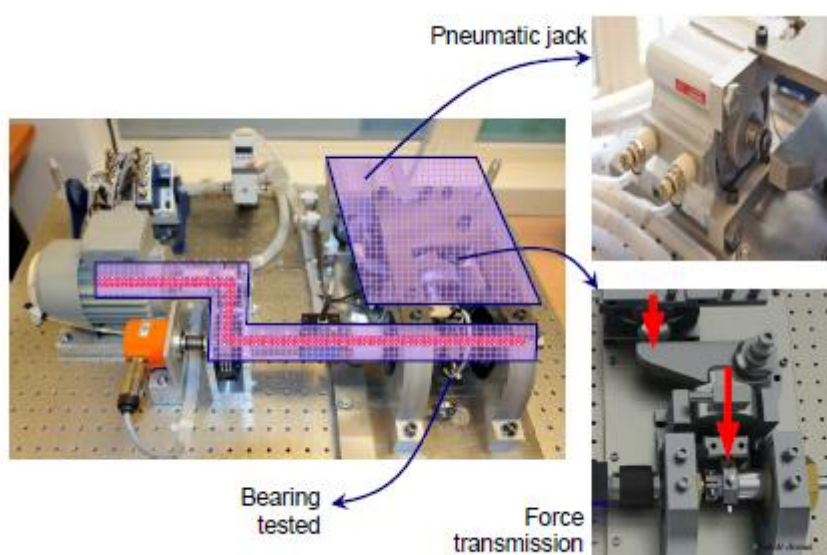


Εικόνα 12 Φέρουσα στήριξη άξονα

4.2.3 Μέρος φόρτισης

Τα εξαρτήματα αυτού του μέρους περιλαμβάνονται σε μια βάση αλουμινίου που είναι απομονωμένη από το μέρος μέτρησης με την χρήση ενός λεπτού πολυμερούς υλικού. Η αλουμιένια βάση συγκρατεί ένα γρύλο πεπιεσμένου αέρα, έναν κάθετο άξονα μαζί με τον μοχλό βραχίονά του, έναν αισθητήρα δύναμης, ένα δακτύλιο συγκράτησης του προς έλεγχο ρουλεμάν, ένα υποστηρικτικό άξονα του προς έλεγχο ρουλεμάν καθώς και δύο κουζινέτα βάσεως μαζί με τα μεγάλα ρουλεμάν τους. Η δύναμη που αρχικώς δημιουργείται από τον γρύλο πεπιεσμένου αέρα

ενισχύεται από τον μοχλό βραχίονα και τελικώς με έμμεσο τρόπο εφαρμόζεται στον εξωτερικό δακτύλιο του προς έλεγχο ρουλεμάν μέσω του δαχτυλιδιού συγκράτησης (εικ 13). Το μέρος φόρτισης αποτελεί την καρδιά όλου του συστήματος. Στην πραγματικότητα η ακτινική δύναμη μειώνει την διάρκεια ζωής του ρουλεμάν με το να εφαρμόζεται η μέγιστη επιτρεπόμενη δύναμη φόρτισης που είναι 4000 N (κατά παράρτημα A3). Αυτό το φορτίο δημιουργείται από ένα έμβολο που βρίσκεται στον γρύλο πεπιεσμένου αέρα όπου η παρεχόμενη πίεση δίνεται από ένα ψηφιακό ηλεκτρο-πνευματικό ρυθμιστή.



Εικόνα 13 Λεπτομέρειες του τμήματος φόρτωσης

4.2.4 Μετρήσεις

Οι συνθήκες λειτουργίας καθορίζονται από στιγμιαίες μετρήσεις της ακτινικής δύναμης που εφαρμόζονται στο ρουλεμάν από την ταχύτητα περιστροφής του άξονα που στηρίζει το ρουλεμάν και από την επιβληθείσα ροπή στο ρουλεμάν. Κάθε μια από αυτές τις τρεις αναλογικές μετρήσεις λαμβάνονται σε μια συχνότητα ίση με 100 Hz. Ο χαρακτηρισμός της υποβάθμισης της κατάστασης του ρουλεμάν βασίζεται σε δυο τύπους αισθητήρων δεδομένων: **δόνησης και θερμοκρασίας** (εικ 14). Οι αισθητήρες δόνησης (παράρτημα A2) αποτελούνται από δυο

μικροσκοπικούς μετρητές επιτάχυνσης που τοποθετούνται σε γωνία 90 μοιρών ο ένας με τον άλλο. Ο πρώτος τοποθετείται στον κάθετο άξονα και ο δεύτερος στον οριζόντιο άξονα. Οι δυο αυτοί μετρητές επιτάχυνσης είναι ακτινικά τοποθετημένοι σε σχέση με τον εξωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν. Ο αισθητήρας θερμοκρασίας (παράρτημα A3) είναι ένας RTD (Ανιχνευτής Θερμοκρασίας με Αντίσταση) με το στοιχείο ανίχνευσης πλατίνα PT100 (1/3 DIN class) το οποίο τοποθετείται μέσα από μια κλειστή οπή στον εξωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν. Οι μετρήσεις επιταχύνσεως δειγματίζονται σε συχνότητα 25.6 kHz ενώ της θερμοκρασίας στα 0.1 Hz.



Εικόνα 14 Μέρος μέτρησης: επιταχυνσιόμετρα και αισθητήρας θερμοκρασίας

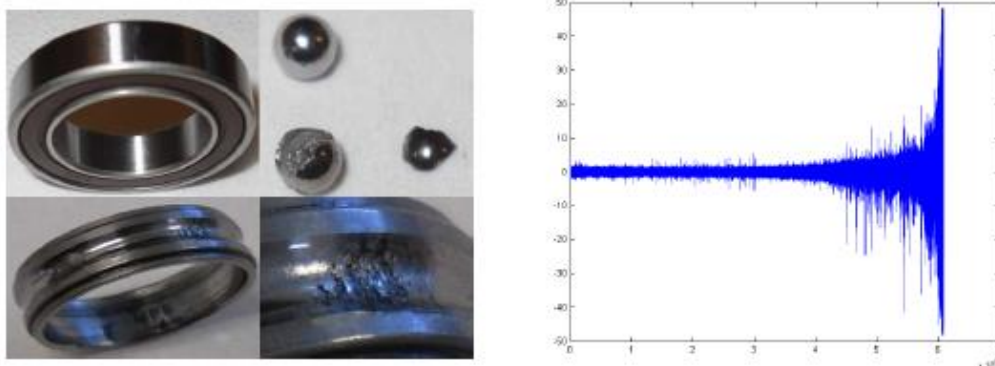
4.3 Πειραματικό σετ δεδομένων για το IEEE PHM 2012 challenge

4.3.1 Υποβάθμιση της κατάστασης των ρουλεμάν: πειράματα μέχρι την αστοχία

Η πλατφόρμα PRONOSTIA δίνει τη δυνατότητα να διεξαχθούν πειράματα μέχρι την αστοχία. Για να μειωθεί η εξάπλωση της φθοράς (καταστροφής) σε όλη την πλατφόρμα καθώς και για λόγους ασφάλειας, το πείραμα σταμάτησε όταν το εύρος του σήματος δόνησης ξεπέρασε τα 20 κιλά.

Η εικόνα 15 δείχνει ένα παράδειγμα το τι καθένας μπορεί να παρατηρήσει σε ένα σφαιροειδής ρουλεμάν πριν και μετά το πείραμα, καθώς και απεικόνιση

ακατέργαστου σήματος δόνησης κατά την διάρκεια του πειράματος. Να σημειωθεί ότι η απεικόνιση της υποβάθμισης της κατάστασης του ρουλεμάν δίνει πολύ μεγάλες διαφορές στην συμπεριφορά κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος μέχρι και την αστοχία.



Εικόνα 15 Κανονική και υποβαθμισμένη ένδειξη ρουλεμάν και δόνησης από ένα πείραμα

4.3.2 ΣΕΤ δεδομένων challenge

Σχετικά με το PHM challenge, δεδομένα που αντιπροσωπεύουν τρία (3) διαφορετικά είδη φορτίων λήφθησαν υπόψη:

Πρώτη συνθήκη λειτουργίας: 1800 rpm και 4000 N.

Δεύτερη συνθήκη λειτουργίας: 1650 rpm και 4200 N.

Τρίτη συνθήκη λειτουργίας: 1500 rpm και 5000 N.

Στους συμμετέχοντες δόθηκαν 6 σετ δεδομένων μέχρι την τελική αστοχία για να δημιουργήσουν τα προγνωστικά μοντέλα και τους ζητήθηκε να υπολογίσουν τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής RUL για 11 επιπλέον ρουλεμάν. Σήματα δόνησης και θερμοκρασίας συλλέχτηκαν κατά την διάρκεια αυτών των πειραμάτων. Τα δεδομένα από την παρακολούθηση των 11 ρουλεμάν δεν τους δόθηκαν στο σύνολό τους έτσι ώστε οι συμμετέχοντες να προβλέψουν τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής, συνεπώς να εκτιμήσουν τον RUL. Επίσης δεν δόθηκε καμία άλλη διευκρίνιση σχετικά με τον τύπο

της αστοχίας που θα λάμβανε χώρα (τίποτα δεν έγινε γνωστό σχετικά με την φύση και την προέλευση της υποβάθμισης της κατάστασης : σφαιρίδια, εσωτερικοί ή εξωτερικοί δακτύλιοι, φωλιά ...). Το σετ με τα δεδομένα εκμάθησης ήταν αρκετά μικρό ενώ το εύρος της διάρκειας ζωής όλων των ρουλεμάν ήταν πολύ μεγάλο (από 1 ώρα έως 7 ώρες). Έτσι το να κάνεις σωστούς υπολογισμούς ήταν πραγματικό δύσκολο και αυτό έκανε την έρευνα πιο συναρπαστική.

Datasets	Operating Conditions		
	Conditions 1	Conditions 2	Conditions 3
Learning set	Bearing1_1	Bearing2_1	Bearing3_1
	Bearing1_2	Bearing2_2	Bearing3_2
Test set	Bearing1_3	Bearing2_3	Bearing3_3
	Bearing1_4	Bearing2_4	
	Bearing1_5	Bearing2_5	
	Bearing1_6	Bearing2_6	
	Bearing1_7	Bearing2_7	

Πίνακας 2 Δεδομένα της Προγνωστικής Πρόκλησης του IEEE 2012

Σημείωση 1: Για την έρευνα ο RUL ορίσθηκε ως ο χρόνος που το επιταχυντόμετρο θα ξεπεράσει τα 20g.

Σημείωση 2: Τα θεωρητικά μοντέλα που βασίστηκαν στην συχνότητα για να ανιχνεύσουν τις φθορές των ρουλεμάν (όπως στους εσωτερικούς, εξωτερικούς δακτυλίους και στις φωλιές) δεν δούλεψαν. Πράγματι οι αποτυπώσεις της συχνότητας είναι δύσκολο να συλληθθούν εξαιτίας του ότι η υποβάθμιση της κατάστασης που αφορούν όλα τα εξαρτήματα του προς έλεγχου ρουλεμάν μπορεί να συμβεί την ίδια ώρα.

Σημείωση 3: Οι μέχρι τώρα νόμοι της αξιοπιστίας των ρουλεμάν που δίνουν τον χρόνο ζωής, όπως ο LIO δεν δίνει τα ίδια αποτελέσματα όπως αυτά που

αποκτήθηκαν από τα πειράματα (ο θεωρητικός υπολογιζόμενος χρόνος ζωής είναι διαφορετικός από αυτόν που δίδεται από τα πειράματα).

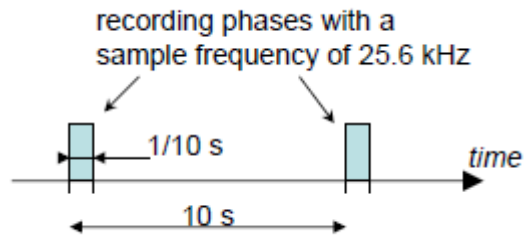
Σημείωση 4: Για περισσότερη δικαιοσύνη κατά τη διάρκεια του διαγωνισμού, κανένα μέλος από το FEMTO-ST δεν έλαβε μέρος σε αυτήν την έρευνα.

4.4 Οργάνωση των δεδομένων

4.4.1 Χαρακτηριστικά λήψης δεδομένων

Τα σετ δεδομένων εκμάθησης και τα σετ δεδομένων από ελέγχους δόθηκαν σε συμπιεζόμενα αρχεία «7z». Το κάθε ένα από αυτά περιλαμβάνει ASCII αρχεία δόνησης που καλούνται «acc_XXXX.csv» και ASCII αρχεία θερμοκρασίας που ονομάζονται «temp_XXXX.csv». Οι παράμετροι των δεδομένων απόκτησης δίδονται παρακάτω και θα πρέπει να μελετηθούν προσεχτικά.

- **Δεδομένα Δόνησης (Οριζόντιας και κάθετης).**
- Συχνότητα δειγματοληψίας: 25.6 kHz
- Καταγραφές: 2560 δείγματα (i.e. 1/10 s) καταγράφονται κάθε 10 sec (εικ. 16)
- **Δεδομένα Θερμοκρασίας**
- Συχνότητα δειγματοληψίας: 10 Hz
- Καταγραφές: 600 δείγματα καταγράφονται κάθε λεπτό.



Εικόνα 16 Εικόνα παραμέτρων απόκτησης για σήματα δόνησης

4.4.2 Αρχεία ASCII

Για κάθε ASCII αρχείο, τα δεδομένα ταξινομούνται όπως απεικονίζονται στον πίνακα 6:

Column	1	2	3	4	5	6
Vibr. signal	Hour	Minute	Second	μ -second	Horiz. accel.	vert. accel.
Temp. signal	Hour	Minute	Second	0.x second	Rtd sensor	

Πίνακας 3 Σύνταξη δεδομένων εντός των πλαισίων ASCII

Χαρακτηριστικά από τα πειράματα της εκμάθησης και του ελέγχου δίδονται στα παραρτήματα A4 και A5.

4.5 Βαθμολογία αποτελεσμάτων και συμμετέχοντες με την υψηλότερη βαθμολογία

4.5.1 Βαθμολογία αποτελεσμάτων

Οι ομάδες βαθμολογήθηκαν βασιζόμενοι στα αποτελέσματα RUL τα οποία μετατράπηκαν σε ποσοστά σφάλματος στην πρόβλεψη. Να σημειωθεί ότι RUL_i και

ActRUL_i αντίστοιχα ως ο υπολειπόμενος ωφέλιμος χρόνος ζωής του ρουλεμάν όπως υπολογίσθηκε από έναν συμμετέχοντα και ως actual RUL ο υπολειπόμενος πραγματικός χρόνος ζωής όπως υπολογίσθηκε (όπου $i \in [1; 11]$ ορίζει στον πίνακα 7 για τα ρουλεμάν που ελέγχονται). Το ποσοστό σφάλματος i ορίζεται από:

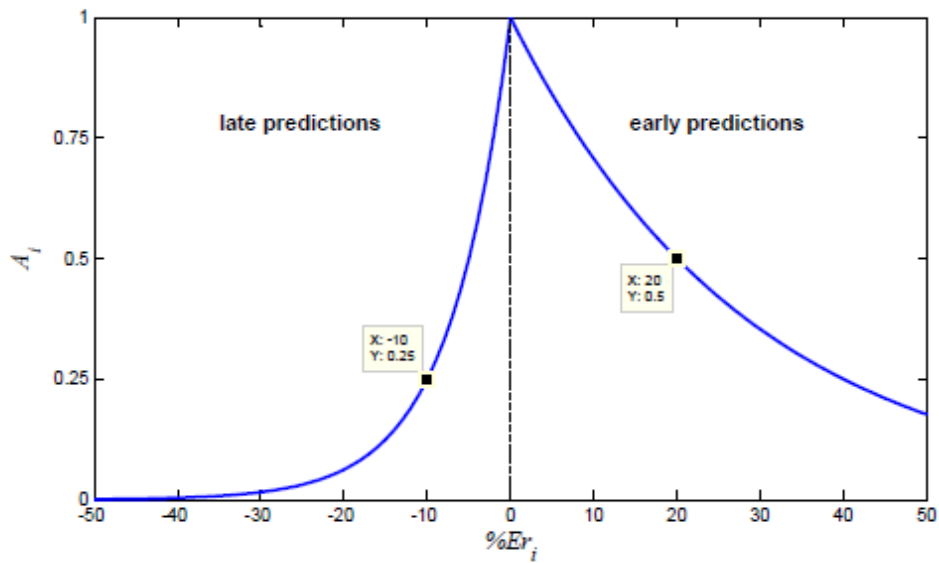
$$\%Er_i = 100 \times \frac{ActRUL_i - \widehat{RUL}_i}{ActRUL_i}$$

Οι υποεκτιμήσεις και οι υπερεκτιμήσεις δεν εξετάζονται με τον ίδιο τρόπο: καλή απόδοση της εκτίμησης σχετίζεται με έγκαιρες διαγνώσεις του RUL (π.χ. περιπτώσεις όπου $\%Er_i > 0$), με συμπεράσματα για τις πρόωρες αλλαγές των ρουλεμάν και πιο σοβαρά συμπεράσματα για τον υπολογισμό του RUL που εκτιμούν την υπέρβαση του RUL στα επιμέρους εξαρτήματα (π.χ. περιπτώσεις που $\%Er_i < 0$). Η ακρίβεια της βαθμολογίας του υπολογισμού του RUL για τον παράγοντα I ορίζεται ως ακολούθως. Η εικόνα 17 απεικονίζει την ανάπτυξη της συνάρτησης της βαθμολογίας

$$A_i = \begin{cases} \exp^{-\ln(0.5) \cdot (Er_i/5)} & \text{if } Er_i \leq 0 \\ \exp^{+\ln(0.5) \cdot (Er_i/20)} & \text{if } Er_i > 0 \end{cases}$$

Η ειδική βαθμολογία όλων των εκτιμήσεων του RUL έχει ορισθεί ως η μέση τιμή όλων των βαθμολογιών των πειραμάτων:

$$Score = \frac{1}{11} \sum_{i=1}^{11} (A_i)$$



Εικόνα 17 Λειτουργία βαθμολόγησης μιας εκτίμησης RUL σύμφωνα με το ποσοστό σφάλματός της

4.5.2 Πραγματικός RUL για να υπολογισθεί

Test set	Actual RUL
Bearing1_3	5730 s
Bearing1_4	339 s
Bearing1_5	1610 s
Bearing1_6	1460 s
Bearing1_7	7570 s
Bearing2_3	7530 s
Bearing2_4	1390 s
Bearing2_5	3090 s
Bearing2_6	1290 s
Bearing2_7	580 s
Bearing3_3	820 s

Πίνακας 4 Πραγματικοί κανόνες που πρέπει να εκτιμηθούν

5^ο Κεφάλαιο: Νέα προσέγγιση πρόγνωσης

5.1 Μια νέα προσέγγιση πρόγνωσης για ρουλεμάν με βάση την μείωση της εντροπίας και σύγκριση της με υπάρχουσες μεθόδους.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί περιγράφεται η εργασία των Seokgo Kim, Sungho Park, Ju-Won Kim, Junghwa Han, Dawn An, Nam Ho Kim, Joo-Ho Choi οι οποίοι παρουσιάζουν την μέθοδο για την πρόγνωση των ρουλεμάν με βάση την ενεργειακή εντροπία στην οποία υπολογίζεται η κανονικοποιημένη ενέργεια στο φάσμα συχνοτήτων κατά τη διάρκεια των κύκλων και επιλέγεται η ζώνη συχνοτήτων που δείχνει μεγαλύτερη μείωση σε σχέση με τις άλλες και η εντροπία υπολογίζεται ως χαρακτηριστικό γνώρισμα. Η προτεινόμενη ενεργειακή εντροπία δείχνει την ομαλή και σταθερή μείωση των κύκλων που μπορεί να αντιπροσωπεύει το βαθμό πρόκλησης βλάβης. Προκειμένου να παρουσιαστεί αυτό το πλεονέκτημα, εξετάζονται και συγκρίνονται τέσσερα παραδοσιακά χαρακτηριστικά - RMS, kurtosis, MAS kurtosis and envelope και το νέο χαρακτηριστικό γνώρισμα - ενεργειακή εντροπία χρησιμοποιώντας τις τρεις περιπτώσεις δεδομένων: FEMTO, IMS και LOCAL.

Το ρουλεμάν είναι ένα από τα πιο σημαντικά συστατικά των περιστρεφόμενων μηχανημάτων επειδή μπορεί να προκαλέσει καταστροφική βλάβη σε ολόκληρο το σύστημα όταν δεν συντηρείται σωστά. Προκειμένου να αποφευχθούν οι αστοχίες κατά την επέκταση της χρήσης του κατά τη διάρκεια ζωής του ρουλεμάν, έχουν γίνει πολλές έρευνες υπό την επωνυμία της προγνωστικής και διαχείρισης της υγείας (PHM), που περιλαμβάνει την απόκτηση δεδομένων από τον αισθητήρα, την εξαγωγή χαρακτηριστικών μέσω επεξεργασίας σημάτων και τη διάγνωση σφαλμάτων ή την πρόβλεψη αποτυχίας για τη λήψη απόφασης σχετικά με τη συντήρηση.

Μέχρι σήμερα, έχουν πραγματοποιηθεί οι περισσότερες μελέτες που εκτιμούν τη σοβαρότητα της βλάβης κατά την τρέχουσα περίοδο λειτουργίας, η οποία είναι χρήσιμη για άμεση διακοπή για αποφυγή βλαβών. Από την άλλη πλευρά, η θεωρία των προγνωστικών είναι πολύ μικρότερη, η οποία είναι να προβλεφτεί το πόσο σύντομα η αποτυχία θα πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο της μελλοντικής ενέργειας, η οποία απαιτεί τη μοντελοποίηση της εξέλιξης της βλάβης και την εγγενή αβεβαιότητα για μακροπρόθεσμη πρόβλεψη. Σε σύγκριση με τα διαγνωστικά, τα προγνωστικά παρέχουν πολύ περισσότερα πλεονεκτήματα ώστε να επιτρέπουν την πλήρη λειτουργία του, ενώ παράλληλα επιτρέπουν την προετοιμασία της συντήρησης. Με αυτή την έννοια, η **πρόγνωση** είναι μια νέα υποσχόμενη περιοχή, η οποία πρέπει να διερευνηθεί με μεγαλύτερο βάθος.

Στα προγνωστικά των ρουλεμάν, η συνηθέστερη πρακτική είναι η χρήση του αισθητήρα δόνησης που μετρά την επιτάχυνση. Η πρόκληση αυτής της μεθόδου είναι ότι τα δεδομένα ενός ακατέργαστου αισθητήρα δεν είναι συνεπή όσον αφορά το πρότυπο αποικοδόμησης και το τέλος ζωής τους, ακόμη και αν είναι από τα ίδια τα ρουλεμάν. Επίσης, σπάνια παρουσιάζουν πληροφορίες υποβάθμισης, εκτός από το τέλος της ζωής τους. Ως εκ τούτου, πολλές μελέτες έχουν αφιερωθεί στην εύρεση κατάλληλων χαρακτηριστικών που μπορούν να αναγνωρίσουν την αρχική βλάβη και να παρακολουθήσουν την τάση με την πάροδο του χρόνου καθώς αναπτύσσεται το σφάλμα.

Παραδοσιακά, τα χαρακτηριστικά έχουν ταξινομηθεί σε **δύο ομάδες**: πεδίο χρόνου και χαρακτηριστικά στον τομέα των συχνοτήτων.

Μεταξύ αυτών, τα παραδοσιακά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται συχνά στη βιβλιογραφία είναι η μέση τετραγωνική ρίζα (RMS) και η κύρτωση στο χρονικό πεδίο και η φασματική κύρτωση και ανάλυση περιβάλλουσας στην περιοχή συχνοτήτων (Yan et al., 2008 & Siegel et al., 2011). Ο Siegel et al (2011) μελέτησε τα προγνωστικά του ρουλεμάν ψύξης λαδιού ελικοπτέρου, εξάγοντας και τείνοντας αυτά τα χαρακτηριστικά χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που παρέχονται από την Impact Technologies. Sutrisno et al (2012) και Wang et. al (2012) έχουν μελετήσει τα πειραματικά δεδομένα του FEMTO για τον ανταγωνισμό πρόκλησης δεδομένων IEEE

2012 PHM, στην οποία εφαρμόστηκαν η κύρτωση Moving Average Spectral (MAS) και η ανάλυση περιβάλλουσας αντίστοιχα.

Ο Siew et.al (2015) χρησιμοποίησε τα δεδομένα από τον εξομοιωτή προγνωστικών ρουλεμάν που παρέχεται από το SpectraQuest, για να μελετήσει τις τάσεις των σφαλμάτων χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους RMS, κύρτωσης και περιβάλλουσας. Ο Randall et al (2011) έχει αναφέρει στο εκπαιδευτικό του έγγραφο τις λεπτομέρειες ορισμένων βασικών τεχνικών που είναι απαραίτητες για την πλειοψηφία των διαγνωστικών ρουλεμάν, η οποία περιλαμβάνει τη φασματική κύρτωση και την ανάλυση περιβάλλουσας. Επίσης, εφάρμοσε τις τεχνικές στις **τρεις** περιπτώσεις που κυμαίνονται από το ρουλεμάν υψηλής ταχύτητας για τον κινητήρα στροβίλων έως το κύριο ρουλεμάν χαμηλής ταχύτητας σε έναν πύργο ραντάρ. Τα αποτελέσματα σε αυτές τις μελέτες έχουν δείξει πολύτιμη ένδειξη ότι τα χαρακτηριστικά μπορούν να αντιπροσωπεύουν τη σοβαρότητα του σφάλματος με εύλογο βαθμό. Ωστόσο, έχουν ορισμένους περιορισμούς που καθιστούν τα χαρακτηριστικά λιγότερο χρήσιμα από τις προγνωστικές προοπτικές. Τα χαρακτηριστικά κυμαίνονται ουσιαστικά με την πάροδο του χρόνου ακόμη και μετά την απογύμνωση του σήματος ή δεν εμφανίζουν ένα ξεχωριστό πρότυπο υποβάθμισης στην αλλαγή τους κατά τους κύκλους ή δείχνουν μόνο την απότομη αύξηση κοντά στο τέλος της ζωής. Όλες αυτές οι πτυχές καθιστούν δύσκολη την εφαρμογή των χαρακτηριστικών στα προγνωστικά.

Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, οι συγγραφείς (An et al., 2016) πρότειναν πρόσφατα μια νέα μέθοδο χρησιμοποιώντας τη **μείωση της εντροπίας** η οποία είναι πιο κατάλληλη για τους σκοπούς της προγνωστικής. Η ιδέα βασίζεται στην παρατήρηση ότι η εντροπία μειώνεται σε συγκεκριμένες συχνότητες καθώς το σφάλμα εξελίσσεται. Ως **αποτέλεσμα** της εφαρμογής, διαπιστώθηκε ότι το χαρακτηριστικό γνώρισμα εντροπίας δείχνει ουσιαστική και ομαλή μείωση από το αρχικό στάδιο της εξέλιξης της βλάβης. Το **μειονέκτημα** είναι ότι είναι εμπειρικό με ελάχιστη φυσική κατανόηση. Σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζεται μια βελτιωμένη έκδοση που δείχνει καλύτερη απόδοση και παρέχει πιο φυσική ερμηνεία. Ο τελικός στόχος της πρόγνωσης είναι η πρόβλεψη της εναπομένουσας ωφέλιμης ζωής (RUL) χρησιμοποιώντας την τάση υποβάθμισης έως ότου επιτευχθεί το καθορισμένο όριο. Αυτό όμως δεν εξετάζεται σε αυτή τη μελέτη. Αντ' αυτού, γίνεται εστίαση μόνο στην

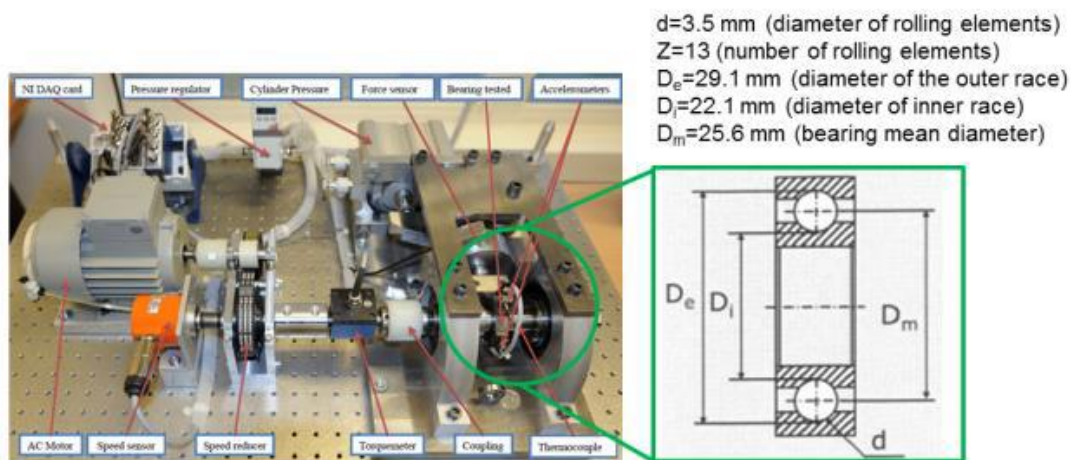
διερεύνηση του καλύτερου χαρακτηριστικού ενόψει των προγνωστικών επιδόσεων. Για το σκοπό αυτό, εξετάζονται τρεις περιπτώσεις πειραμάτων στα οποία είναι τα δεδομένα FEMTO που χρησιμοποιούνται στα (Sutrisno et al., 2012 & Wang et al., 2012), τα δεδομένα IMS που χρησιμοποιούνται στο (Qiu et al., 2006 & Caesarendra et al., 2010) και τα δεδομένα από τον τοπικό κατασκευαστή, τα οποία έγιναν κατά τη διάρκεια των επιταχυνόμενων δοκιμών ζωής τους. Για τα δεδομένα αυτά, εξετάζονται **τέσσερα** υπάρχοντα χαρακτηριστικά: RMS, κύρτωση, MAS κύρτωση και κορυφές περιβάλλουσας στις συχνότητες βλαβών, και συγκρίνονται με την προτεινόμενη μείωση της εντροπίας.

5.2 Περιγραφή Δεδομένων

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται τρεις περιπτώσεις πειραματικών δεδομένων που αναφέρονται ως FEMTO που δόθηκαν από τον διαγωνισμό διάσκεψης PHM το 2012, το IMS στο αποθετήριο προγνωστικών δεδομένων από το ερευνητικό κέντρο της NASA Ames και το LOCAL από έναν κατασκευαστή στην Κορέα. Σημειώστε ότι όλα τα δεδομένα προέρχονται από τις δοκιμές ζωής με σταθερή ταχύτητα και φορτίσεις που πραγματοποιούνται στο εργαστήριο αντί για τις πραγματικές λειτουργίες πεδίου. Επομένως, υπάρχει λιγότερη ανάγκη να αντιμετωπιστούν άλλες εκτιμήσεις, όπως η αποκοπή, η παρακολούθηση παραγγελιών ή ο συγχρονισμός με χρονικό διάστημα για να απομακρυνθεί η επιρροή από τη συχνότητα των άλλων στοιχείων ή από τις ταχύτητες διακύμανσης. Η διάρκεια ζωής των FEMTO και LOCAL είναι πολύ σύντομη, επειδή είναι κατασκευασμένες από επιταχυνόμενες δοκιμές ενώ τα δεδομένα IMS είναι μακρά και εκτείνονται σε 30-40 ημέρες, πράγμα που σημαίνει ότι το φορτίο είναι φυσιολογικό.

5.2.1 Δεδομένα FEMTO

Λεπτομερέστερη επεξήγηση των δεδομένων FEMTO και πειραματική διαμόρφωση δίνεται στην εικόνα 18. Τα σήματα των κραδασμών παρακολουθούνται κάτω από την ακτινική δύναμη που δίνεται σε οριζόντια κατεύθυνση και κάθετη κατεύθυνση από τους δύο αισθητήρες. Τα ακατέργαστα δεδομένα λαμβάνονται κατά τη διάρκεια 0.1 δευτερολέπτου με 25.6 kHz κάθε 10 δευτερόλεπτα, το οποίο παράγει 2560 δείγματα σε κάθε κύκλο. Οι συνθήκες λειτουργίας και ο αριθμός των δεδομένων παρατίθενται στον Πίνακα 8. Δύο σύνολα δεδομένων γίνονται υπό τρεις διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας αντίστοιχα. Με βάση τα ακατέργαστα σήματα, θεωρείται ότι υπάρχει βλάβη όταν η κατακόρυφη επιτάχυνση φθάνει τα 20g.



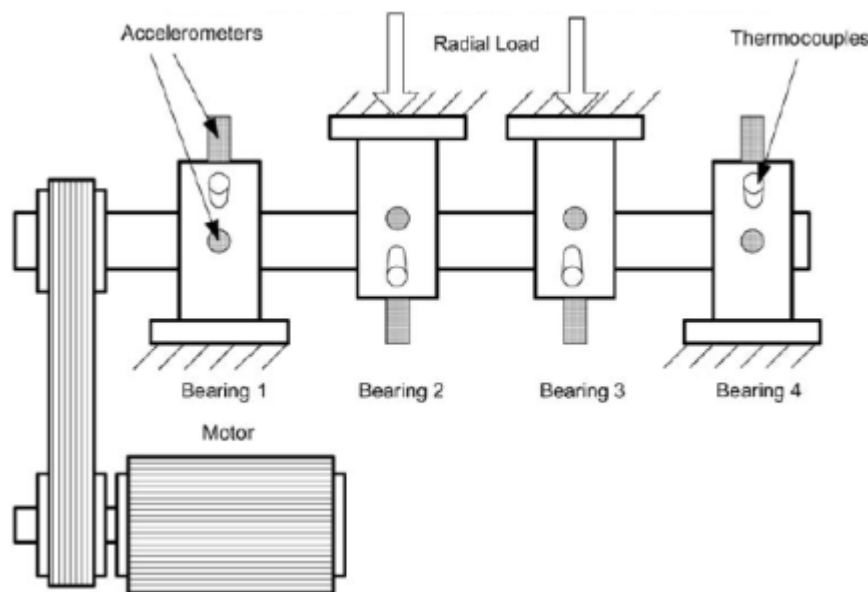
Εικόνα 18 Πλατφόρμα πειραματισμού

	Radial force	Rotating speed
Condition 1	4000 N	1800 rpm
Condition 2	4200 N	1650 rpm
Condition 3	5000 N	1500 rpm

Πίνακας 5 Πειραματική κατάσταση

5.2.2 Δεδομένα IMS

Τα δεδομένα μπορούν να μεταφορτωθούν από το «Σετ δεδομένων των ρουλεμάν», IMS, Πανεπιστήμιο του Cincinnati NASA Ames Prognostics Data Repository. Χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη στο (Qiu et al 2006 & Caesarendra et al., 2010). Τέσσερα ρουλεμάν διπλής σειράς (16 κυλίνδρων) τοποθετούνται σε έναν άξονα όπως φαίνεται στην εικόνα 16 και η ταχύτητα περιστροφής και το ακτινικό φορτίο είναι αντίστοιχα 2000 RPM και 6000 lbs. Από το επανειλημμένο πείραμα πραγματοποιούνται τρία σύνολα υπό την προϋπόθεση αυτή. Τα δεδομένα δόνησης συλλέχθηκαν κάθε 20 λεπτά με ρυθμό δειγματοληψίας 20 kHz και το μήκος των δεδομένων ήταν 20.480 σημεία. Η δοκιμή διεξήχθη επί 35 ημέρες μέχρις ότου βρέθηκε σημαντική ποσότητα μεταλλικών συντριμμάτων στο μαγνητικό βύσμα του δοκιμαστικού ρουλεμάν.

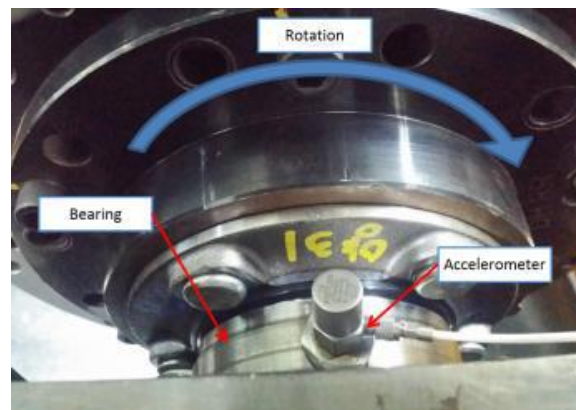


Εικόνα 19 Δοκιμαστικός εξοπλισμός

5.2.3 Τοπικά δεδομένα

Κάτω από τα συνδυασμένα φορτία με ακτινική κίνηση και ώση 617 και 370 kgf, τα ρουλεμάν λειτουργούν με 1000 rpm έως ότου το επίπεδο επιτάχυνσης φθάσει σε κάποια προκαθορισμένη τιμή. Το ρουλεμάν και ο εγκατεστημένος αισθητήρας φαίνονται στην εικόνα 20. Συλλέγονται τρία και ένα σύνολο δεδομένων με ρυθμό

δειγματοληψίας 8 kHz και 32 kHz αντίστοιχα. Σε όλα τα ελαττωματικά ρουλεμάν, οι τρόποι αστοχίας προκαλούν σκασίματα στις κοινές μπάλες. Όπως αναμένεται, ο χρόνος αστοχίας ποικίλει σημαντικά από 3,5 σε 11,2 ώρες, παρά το γεγονός ότι τα ίδια ρουλεμάν είναι υπό την ίδια κατάσταση φόρτωσης.



Εικόνα 20 Δοκιμαστική εξέδρα και εγκατεστημένος αισθητήρας

5.3 Υφιστάμενες προσεγγίσεις για προγνωστικά χαρακτηριστικά

Πριν από την εξαγωγή των χαρακτηριστικών πεδίου χρόνου, τα πρωτογενή δεδομένα περνούν από μια διαδικασία εξομάλυνσης με εκθετικό φίλτρο με παράγοντα $a = 0.9$ (Wang 2012). Στη συνέχεια, οι χρονικές σειρές RMS και κύρτωση σε κάθε κύκλο υπολογίζονται ως εξής.

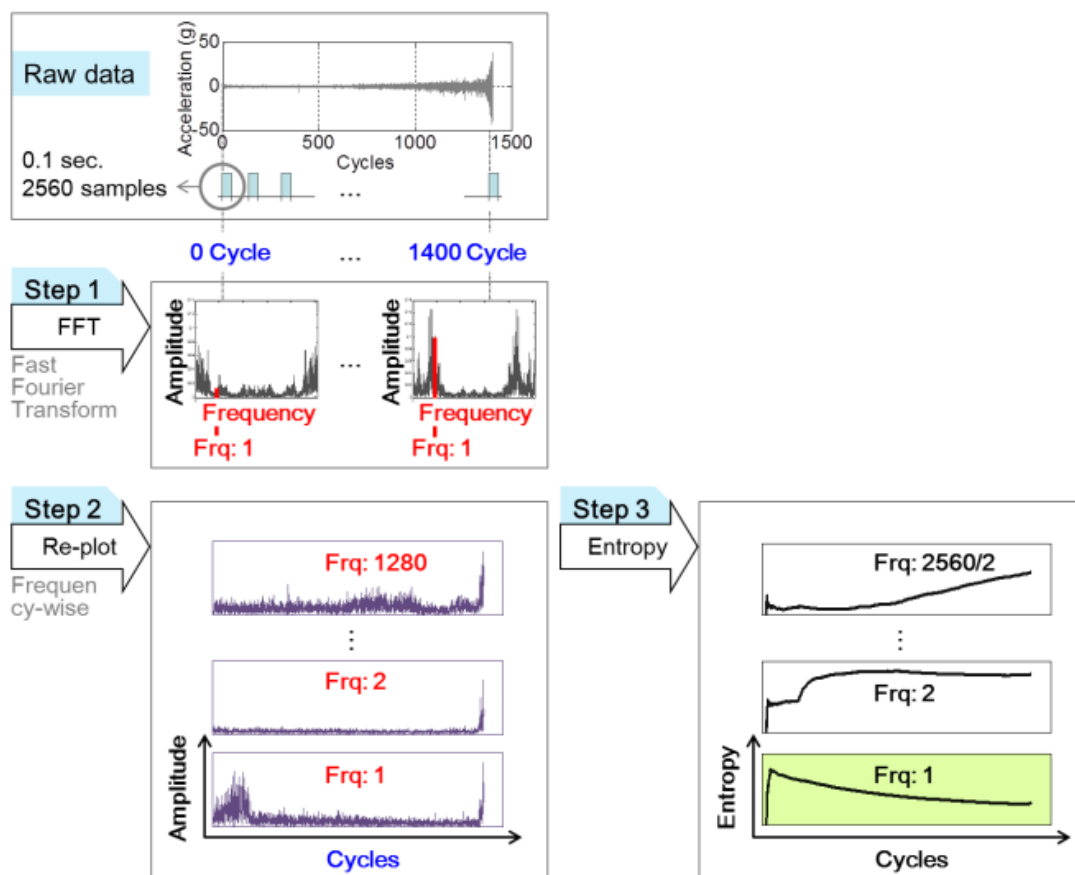
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$
$$Kurtosis = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4}$$

Κατ' αρχήν, επιτυγχάνεται η κύρτωση χρονοσειρών χρησιμοποιώντας ένα διηθημένο σήμα διέλευσης ζώνης σε μια δεδομένη περιοχή συχνοτήτων. Στη συνέχεια εφαρμόζεται φίλτρο μέσου με ένα συγκεκριμένο μέγεθος παραθύρου με την πάροδο του χρόνου. Η μονοτονικότητα της αυξανόμενης τάσης ποσοτικοποιείται με τον συντελεστή συσχέτισης του Spearman μεταξύ της έκτασης MAS και του χρόνου. Εάν η τιμή είναι κοντά στο 1, αντιπροσωπεύει την τέλεια μονότονη αύξηση με την πάροδο του χρόνου. Για να μεγιστοποιηθεί η μονοτονικότητα της τάσης, η περιοχή συχνοτήτων διαιρείται με ένα μικρό διάστημα στο φάσμα, υπολογίζεται ο συντελεστής σε κάθε διάστημα και προσδιορίζεται το βέλτιστο εύρος που μεγιστοποιεί τον συντελεστή. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η φασματική κύρτωση που αναφέρεται εδώ είναι διαφορετική από αυτή που αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Randall 2011). Η λέξη "φασματική" μπορεί να έχει εκχωρηθεί λόγω του φιλτραρίσματος της ζώνης διέλευσης του ακατέργαστου σήματος, το οποίο όμως δεν είναι η ίδια προσέγγιση. Η ανάλυση του περιβάλλουσας εξηγείται στην (Randall 2011, McInerney 2003). Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε πριν από 30 χρόνια και τώρα χρησιμοποιείται ως μέθοδος αναφοράς. Η διαδικασία είναι ότι το ακατέργαστο σήμα είναι φιλτράρισμα ζώνης σε μια ζώνη υψηλών συχνοτήτων στην οποία οι παλμοί σφάλματος ενισχύονται από δομικούς συντονισμούς. Στη συνέχεια αποδιαμορφώνεται το εύρος για να σχηματίσει το σήμα της περιβάλλουσας χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Hilbert. Το τελικό βήμα είναι η ανάλυση φάσματος του σήματος περιβάλλουσας για την εξαγωγή των επιθυμητών διαγνωστικών πληροφοριών στις συχνότητες σφαλμάτων ρουλεμάν (συχνότητα περάσματος μπάλας, συχνότητα περιστροφής κ.λπ.) και των αρμονικών της.

Το μειονέκτημα της ανάλυσης περιβάλλουσας είναι η δυσκολία στην επιλογή της ζώνης συχνοτήτων, η οποία είναι ένα από τα πιο κρίσιμα βήματα που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα. Σε σχέση με τα πολλά κριτήρια που προτάθηκαν για αυτό, η ζώνη που επιλέχθηκε προηγουμένως από τη μελέτη MAS kurtosis χρησιμοποιείται για την ανάλυση περιβάλλουσας.

5.4 Νέα προσέγγιση χρησιμοποιώντας την ENTROPY

Πρόσφατα, οι συγγραφείς έχουν αναπτύξει μια νέα προσέγγιση βασισμένη στη μείωση της εντροπίας σε συγκεκριμένες συχνότητες. Ενώ οι λεπτομέρειες δίνονται στο (An 2016), η διαδικασία συνοψίζεται εν συντομία εδώ για λόγους ευκολίας. Τα βήματα απεικονίζονται στην εικόνα 21, και συνοψίζεται ως εξής.



Εικόνα 21 Διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών εντροπίας

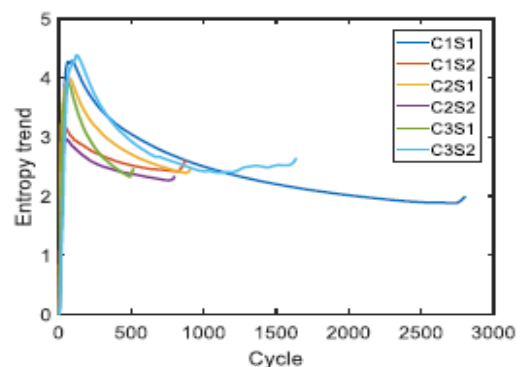
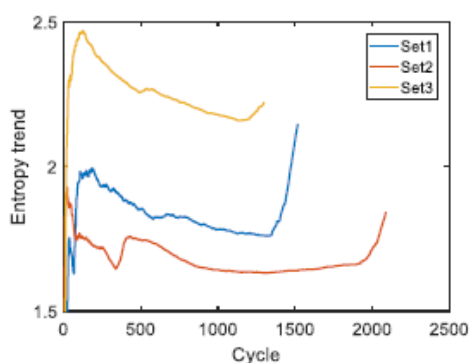
Βήμα 1: Μετατροπή των ακατέργαστων δεδομένων στο πεδίο χρόνου σε κάθε κύκλο σε τομέα συχνοτήτων χρησιμοποιώντας το FFT για να εξαχθούν τα πλάτη ως συνάρτηση της συχνότητας.

Βήμα 2: Επαναδιαμόρφωση των αποτελεσμάτων FFT με συχνότητα. Δηλαδή, η αλλαγή πλάτους δίδεται σε όρους κύκλων σε κάθε συχνότητα (π.χ. εικόνα 15), η οποία ονομάζεται εδώ συσχέτιση συχνότητας.

Βήμα 3: Υπολογισμός της εντροπίας χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση και επιλογή συγκεκριμένων συχνοτήτων που δείχνουν τη μείωση της εντροπίας (π.χ. εικ 18 μεταξύ των αποτελεσμάτων σε ολόκληρη τη συχνότητα.)

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i)$$

Μεταξύ των διαφόρων συχνοτήτων με μείωση της εντροπίας, επιλέγονται εκείνοι με τη μεγαλύτερη μείωση, και ο μέσος όρος λαμβάνεται και αυτό χρησιμοποιείται ως χαρακτηριστικό γνώρισμα. Η μέθοδος για τα δεδομένα FEMTO δίνεται στο Σχήμα 5 (a), στην οποία η καμπύλη παρουσιάζει ομαλή και βαθμιαία υποβάθμιση. Η μοναδικότητα αυτής της μεθόδου είναι αυτή η συμπεριφορά, την οποία οι συγγραφείς θεωρούν ότι μπορεί να αντιπροσωπεύει την πρόοδο βλάβης που εισάγεται από το αρχικό στάδιο των κύκλων. Εάν είναι εφικτό να οριστεί ένα κατάλληλο όριο για την αποτυχία σε αυτό, το RUL μπορεί να προβλεφθεί με πολύ μεγαλύτερη σαφήνεια από τις παραδοσιακές μεθόδους.



Εικόνα 22 Πρωτότυπη εντροπία για τις δύο περιπτώσεις: FEMTO και LOCAL δεδομένα

Η μέθοδος, ωστόσο, στερείται της φυσικής ερμηνείας γιατί αυτό αντιπροσωπεύει την εξέλιξη της βλάβης. Εκτός αυτού, δεν απέδειξε την μονοτονική υποβάθμιση για τις άλλες περιπτώσεις, όπως φαίνεται στην εικόνα 22 (δεξιά) για τα LOCAL δεδομένα με ρυθμό δειγματοληψίας 8K. Για να ξεπεραστεί αυτό, σε αυτή τη μελέτη αναπτύσσεται μια βελτιωμένη έκδοση, η οποία δείχνει καλύτερη απόδοση και επιτρέπει πιο φυσική ερμηνεία. Η διαδικασία περιγράφεται ως εξής.

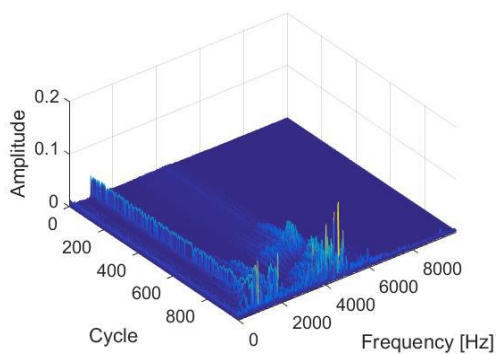
Βήμα 1: Μετατροπή των ακατέργαστων δεδομένων στο πεδίο χρόνου σε κάθε κύκλο σε τομέα συχνοτήτων χρησιμοποιώντας FFT και υπολογισμός της ενέργειας όπως στην ακόλουθη εξίσωση. Στη συνέχεια, σχεδιασμός της πλοκής 3-D με το ύψος να είναι το μέγεθος ενέργειας στον τομέα του κύκλου έναντι της συχνότητας. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 23 (1) για το σύνολο δεδομένων IMS 2, που φέρει 1.

$$E_f = A_f^2 \sum_{F>0} A_F^2$$

Βήμα 2: Επιλογή της ζώνης συχνοτήτων που περιλαμβάνει τη μέγιστη τιμή στην αρχική φάση, η οποία είναι περίπου 1000 Hz στο σχήμα. Ο λόγος για να γίνει αυτό επιλέγεται επειδή η κανονικοποιημένη ενέργεια σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων στην αρχική κατάσταση μειώνεται επειδή η ενεργειακή αξία αυξάνεται στις άλλες περιοχές συχνότητας εξαιτίας της δημιουργίας σφαλμάτων και της εξέλιξης. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 23 (2), το οποίο δείχνει τη σταθερή συμπεριφορά στην αρχικά φυσιολογική κατάσταση μέχρι τους 600 κύκλους, ακολουθούμενη από την αύξηση της ενέργειας στις άλλες περιοχές 3000 ~ 6000 Hz. Εξαιτίας αυτού μειώνεται η

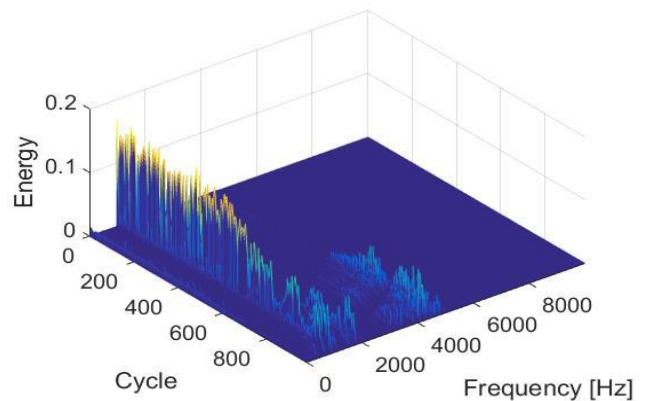
κανονικοποιημένη ενέργεια στα 1000 Hz, η οποία αντιπροσωπεύει το βαθμό της εξέλιξης της βλάβης.

Βήμα 3: Υπολογισμός των εντροπιών στην επιλεγμένη ζώνη συχνοτήτων όπως προτείνεται από το Βήμα 2, υπολογισμός του μέσου όρου και χρησιμοποίηση αυτού ως χαρακτηριστικό. Στην εικόνα 23(3), η καμπύλη χαρακτηριστικών παρουσιάζεται και πάλι για τα LOCAL δεδομένα με ρυθμό δειγματοληψίας 8K, που δείχνει τη συμπεριφορά της μονοτονικής μείωσης.



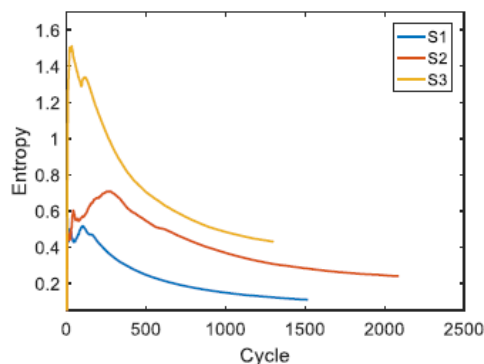
1. Τάση τάσης των δεδομένων

IMS (Set2, Bearing1)



2. Ενεργειακή τάση των δεδομένων

IMS (Set2, Bearing1)



3. Ενεργειακή εντροπία (LOCAL δεδομένα)

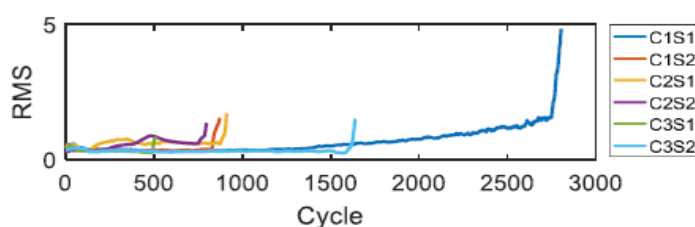
Εικόνα 23 Διαδικασία εξόρυξης εντροπίας από την τάση της ενέργειας

5.5 Αποτελέσματα

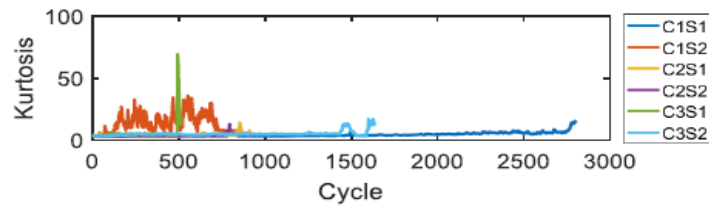
Προκειμένου να εξεταστεί η απόδοση τεσσάρων παραδοσιακών χαρακτηριστικών και η εντροπία της μεθόδου μας ποσοτικά από την προγνωστική άποψη, χρησιμοποιείται ο συντελεστής συσχέτισης του Spearman που αναφέρθηκε προηγουμένως. Οι τιμές όλων των παραδοσιακών χαρακτηριστικών αυξάνονται ομόφωνα ενώ η εντροπία της μεθόδου μας μειώνεται ως μέτρο της εξέλιξης της βλάβης. Η υψηλότερη απόλυτη τιμή αντιπροσωπεύει την ανώτερη απόδοση που δείχνει μεγαλύτερη μονοτονική συμπεριφορά υποβάθμισης (αύξησης ή μείωσης) με την πάροδο του χρόνου.

5.5.1 Δεδομένα FEMTO

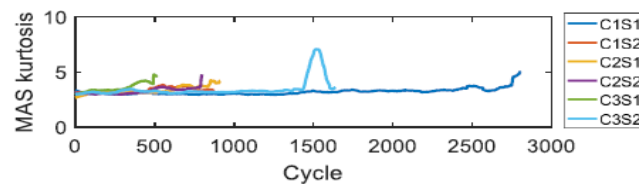
Για τα δεδομένα FEMTO, οι καμπύλες τάσης σχεδιάζονται για τα τρία πρώτα χαρακτηριστικά - RMS, kurtosis και MAS kurtosis, όπου οι έξι καμπύλες δίδονται για τα δύο σύνολα δεδομένων από τρεις διαφορετικές συνθήκες όπως ορίζονται στον Πίνακα 8. Στην περίπτωση του MAS kurtosis, ολόκληρο το φάσμα των 0 ~ 12.8kHz διαιρείται με το διάστημα των 500 Hz και ανακαλύψτε ότι η περιοχή 5500-6000 Hz είναι η καλύτερη. Αυτό χρησιμοποιείται για τη μελέτη του MAS και της περιβάλλουσας. Οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης δίδονται επίσης στον Πίνακα 9. Όπως φαίνεται, τα χαρακτηριστικά διαφέρουν σημαντικά (C1S2 (Condition 1, Set 2) στην κύρτωση για παράδειγμα) ακόμα και μετά την εκθετική εξομάλυνση για να ακυρώσουν το θόρυβο, δεν δείχνουν μονοτονικότητα (C2S2 σε RMS για παράδειγμα) ή αυξάνονται απότομα μόνο κοντά στο τέλος (C3S2 σε MUR kurtosis), γεγονός που καθιστά δύσκολο το μοντέλο πρόβλεψης για πρόγνωση. Στον Πίνακα 9, η τιμή συντελεστή C3S1 σε MAS kurtosis δείχνει την καλύτερη τιμή των 0,9570, η οποία όμως δεν είναι τόσο στην πράξη. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να εισαχθεί και στο μέλλον μια άλλη μετρική για να συμπληρωθεί το μειονέκτημα της αξιολόγησης των συντελεστών.



RMS τάση



Kurtosis τάση



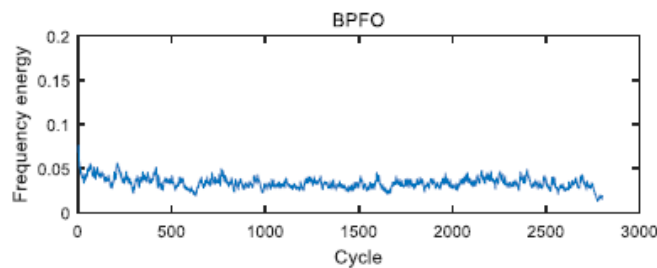
Μετακίνηση μέσω φασματικού ρυθμού

Εικόνα 24 Τάσεις χαρακτηριστικών των δεδομένων FEMTO

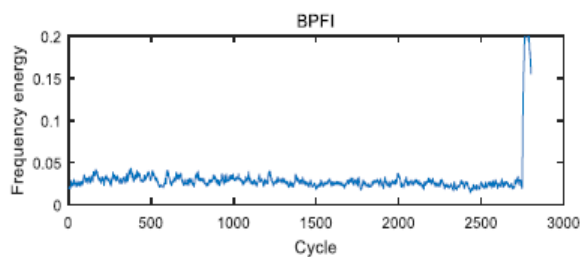
	RMS	Kurtosis	MAS kurtosis
C1S1	0.8638	0.9111	0.7747
C1S2	-0.0226	0.1334	0.8005
C2S1	0.3428	0.7087	0.8473
C2S2	0.7998	0.8669	0.8162
C3S1	-0.6021	0.3974	0.9570
C3S2	-0.1878	0.6039	0.6676

Πίνακας 6 Συγκριτικός συντελεστής συσχέτισης Spearman του FEMTO

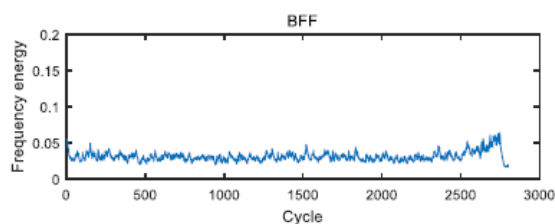
Στην περίπτωση περιβάλλουσας, υπάρχουν τέσσερις συχνότητες βλαβών που βασίζονται στη διάσταση των φερόντων για να παρακολουθούνται ως μέτρηση της βαρύτητας βλάβης και τα αποτελέσματα είναι στην εικόνα 25. Δεδομένου ότι η συμπερίληψη του συνόλου δεδομένων μπορεί να καταστήσει την εικόνα πιο περίπλοκη, μόνο αυτές που έχουν την καλύτερη τάση, δηλαδή την υψηλότερη τιμή συντελεστή, δίδονται εδώ. Παρομοίως, τα χαρακτηριστικά εμφανίζουν την ίδια τάση όπως παραπάνω.



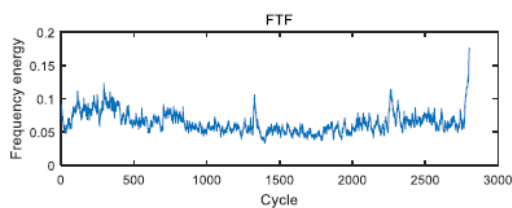
Τάση της συχνότητας ενέργειας της BPFO



Τάση της συχνότητας ενέργειας της BPFI



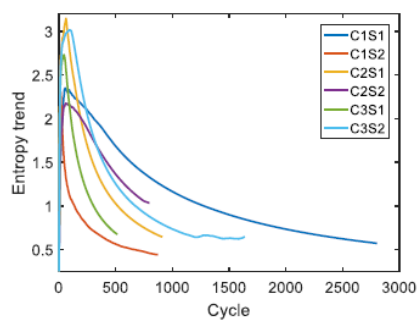
Τάση της συχνότητας ενέργειας του BFF



Τάση της συχνότητας ενέργειας του FTF

Εικόνα 25 Ανάλυση περιβάλλουσας του C1S1

Στην εικόνα 26, το αποτέλεσμα της ενεργειακής εντροπίας που προτείνεται σε αυτή την μελέτη είναι η γραφική παράσταση και οι τιμές συντελεστών που δίνονται στον πίνακα 10. Αντίθετα με τα παραδοσιακά χαρακτηριστικά, οι καμπύλες εμφανίζουν ομαλή και σταδιακή αλλά αξιοσημείωτη υποβαθμισμένη συμπεριφορά, που ίσως είναι χρήσιμη για τα προγνωστικά.



Εικόνα 26 Ενεργειακή εντροπία

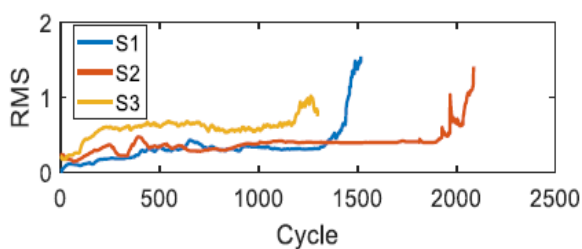
	Entropy trend
C1S1	-0.9924
C1S2	-0.9924
C2S1	-0.9863
C2S2	-0.9365
C3S1	-0.9723
C3S2	-0.9867

Πίνακας 7 Η συσχέτιση του Spearman με την ενεργειακή εντροπία του

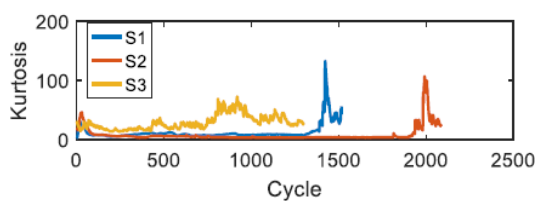
5.5.2 LOCAL δεδομένα

Ελέγχονται τρεις ομάδες που είναι από το ρυθμό δειγματοληψίας 8K.

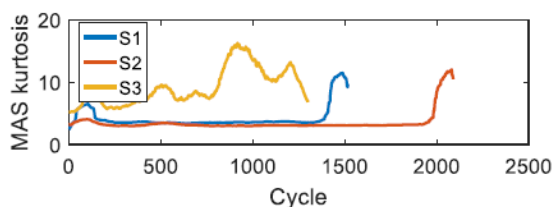
Η ζώνη συχνοτήτων για την ανάλυση MAS και την ανάλυση περιβάλλουσας είναι 2200-2300 Hz σε αυτή την περίπτωση. Τα αποτελέσματα για το RMS, την κύρτωση, την εκτροπή MAS και την εντροπία ενέργειας δίδονται στην εικόνα 27 και στον Πίνακα 11. Η παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στα LOCAL δεδομένα. Για την ανάλυση περιβάλλουσας, το αποτέλεσμα δεν παρουσιάζεται εδώ, καθώς παρατηρούνται παρόμοιες συμπεριφορές με το FEMTO.



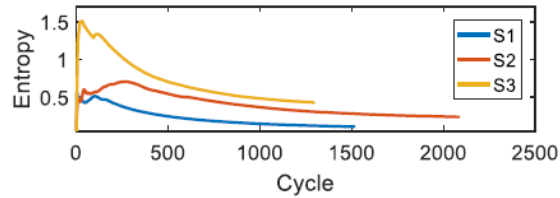
RMS τάση



Τάση κύρτωσης



Μεταβαλλόμενη μέση τάση φασματικής κύρτωσης



Τάση εντροπίας ενέργειας

Εικόνα 27 Τάσεις χαρακτηριστικών των τοπικών δεδομένων

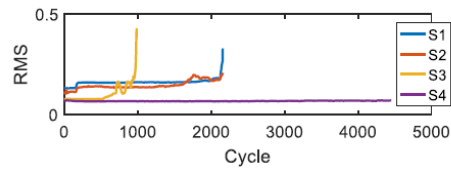
	RMS	Kurtosis	MAS kurtosis	Entropy
S1	0.8013	0.3050	0.1721	-0.9939
S2	0.8044	-0.2461	0.1021	-0.9727
S3	0.5385	0.6867	0.7859	-0.9864

Πίνακας 8 Συγκριτικός συντελεστής συσχέτισης Spearman του LOCAL

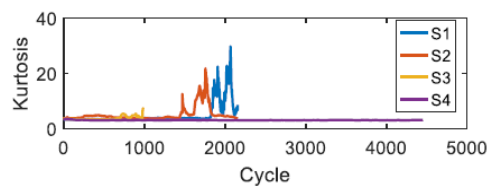
5.5.3 Δεδομένα IMS

Μεταξύ των τριών συνόλων δεδομένων για μία κατάσταση, η οποία περιλαμβάνει τα δεδομένα από δύο επιταχυνσιόμετρα, επιλέγονται τέσσερα έδρανα, το σετ 1 για το έδρανο 3,4, το σύνολο 2 για το έδρανο 1 και το σύνολο 3 για το έδρανο 3 για να απεικονίσουν αποτέλεσμα, επειδή έχουν φθάσει σε αποτυχία, ενώ οι άλλοι όχι. Η ζώνη συχνοτήτων για την ανάλυση MAS και την ανάλυση περιβάλλουσας είναι 1000-1500 Hz στην περίπτωση αυτή. Τα αποτελέσματα για το RMS, την κύρτωση, την εκτροπή MAS και την εντροπία ενέργειας δίδονται στην εικόνα 28 και στον Πίνακα

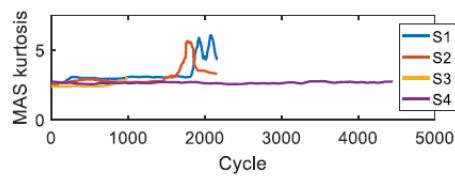
12. Η παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στα LOCAL δεδομένα. Για την ανάλυση περιβάλλουσας, το αποτέλεσμα παραλείπεται για συντομία. Ορισμός 1 για το έδρανο 3: S1, σύνολο 1 για το έδρανο 4: S2, σύνολο 2 για το έδρανο 1: S3 και set 3 για το έδρανο 3: S4.



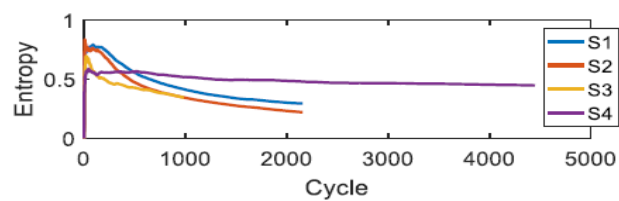
RMS τάση



Τάση κύρτωσης



Μεταβαλλόμενη μέση τάση φασματικής κύρτωσης



Τάση εντροπίας ενέργειας

Εικόνα 28 Τάσεις χαρακτηριστικών των δεδομένων IMS

	RMS	Kurtosis	MAS kurtosis	Entropy
S1	0.8852	0.8940	0.8456	-0.9953
S2	0.8050	0.3695	0.6823	-0.9961
S3	0.8377	0.5982	0.8464	-0.9716
S4	0.6849	-0.1191	0.3283	-0.9837

Πίνακας 9 Συγκριτικός συντελεστής συσχέτισμού Spearman του IMS

Όπως διαπιστώθηκε στις διάφορες μελέτες περιπτώσεων, τα παραδοσιακά χαρακτηριστικά έχουν δείξει τις ανεπιθύμητες συμπεριφορές όπως η διακύμανση, η μη μονότονη ή η απότομη αύξηση στο τέλος. Από την άλλη πλευρά, η ενεργειακή εντροπία έχει δείξει τη μοναδική συμπεριφορά υποβάθμισης με ομαλότητα και μονοτονική μείωση για όλες τις περιπτώσεις δοκιμής, η οποία είναι πολύ πιο χρήσιμη για το προγνωστικό χαρακτηριστικό. Όταν το χαρακτηριστικό έχει επιλεγεί και τείνει με σιγουριά, το υπόλοιπο βήμα είναι να ορίσετε ένα όριο χρησιμοποιώντας το χαρακτηριστικό. Αυτή είναι όμως μια άλλη πρόκληση που πρέπει να επιλυθεί στη μελλοντική μελέτη. Επίσης, η μέθοδος θα πρέπει να λειτουργεί καλά στην πραγματική εφαρμογή πεδίου, η οποία συνεπάγεται πολύ μεγαλύτερο θόρυβο με παρεμβαλλόμενα εξαρτήματα και μεταβλητές συνθήκες λειτουργίας.

5.6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα μελέτη, όπως αναφέρεται στο Paper «A New Prognostics Approach for Bearing based on Entropy Decrease and Comparison with existing Methods», από τους συγγραφείς Seokgoo Kim, Sungho Park, Ju-Won Kim, Junghwa Han, Dawn An, Nam Ho Kim, Joo-Ho Choi, παρουσιάζεται ένα νέο χαρακτηριστικό γνώρισμα, η ενεργειακή εντροπία, για τους σκοπούς της προγνωστικής και συγκρίνονται με τα

διάφορα παραδοσιακά χαρακτηριστικά που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία, τα οποία είναι η RMS και η κύρτωση στον τομέα του χρόνου και η κύρτωση MAS και η περιβάλλουσα στον τομέα συχνοτήτων . Όπως διαπιστώθηκε στις τρεις μελέτες περιπτώσεων που χρησιμοποίησαν FEMTO, IMS και LOCAL, όλα τα αποτελέσματα έδειξαν το ίδιο συμπέρασμα: τα παραδοσιακά χαρακτηριστικά παρουσιάζουν τη θορυβώδη διακύμανση, τη μη μονότονη αλλαγή και την απότομη αύξηση κοντά στο τέλος της ζωής, τα οποία είναι λιγότερο χρήσιμα για τα προγνωστικά. Από την άλλη πλευρά, η προτεινόμενη ενεργειακή εντροπία δείχνει ομαλή και σταθερή μείωση στον κύκλο, γεγονός που μπορεί να αποτελεί ένδειξη της εξέλιξης του σφάλματος. Πολλά βήματα παραμένουν για να είναι το χαρακτηριστικό γνώρισμα πολύτιμο στις πραγματικές εφαρμογές του πεδίου και παραμένουν ως μελλοντική μελέτη.

6^ο Κεφάλαιο: Εκτίμηση της εναπομένουσας ωφέλιμης ζωής των ρουλεμάν με τη χρήση Μεθοδολογιών που βασίζονται σε δεδομένα (Data Driven)

6.1.1 RUL μεθοδολογίες εκτίμησης

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί περιγράφεται η εργασία των Edwin Sutrisno, Hyunseok Oh, Arvind Sai Sarathi Vasan, και Michael Pecht οι οποίοι παρουσιάζουν Ένα πειραματικό σύνολο αποτελεσμάτων (δεδομένων) από δεκαεπτά Ρουλεμάν που παρουσιάστηκε από το Ινστιτούτο FEMTO-ST.

Το σύνολο των 17 αποτελεσμάτων (δεδομένων) αποτελείτο, αφενός μεν, από δεδομένα προερχόμενα από έξι ρουλεμάν για τον εκπαιδευτικό αλγόριθμο και αφετέρου, από δεδομένα προερχόμενα από 11 ρουλεμάν προοριζόμενα για τις δοκιμές. Οι συγγραφείς ανέπτυξαν προγνωστικούς αλγόριθμους βασισμένους σε δεδομένα προερχόμενα από τα εκπαιδευτικά ρουλεμάν με σκοπό την εκτίμηση της εναπομένουσας ωφέλιμης ζωής των υπό έλεγχο ρουλεμάν.

Α Μέθοδος 1: Κινούμενος μέσος όρος της φασματικής κύρτωσης και Bayesian Μόντε Κάρλο.

Παράμετροι εξήχθησαν από σήματα κραδασμών του ρουλεμάν στα πεδία χρόνου και συχνότητας [35]. Οι παράμετροι στο πεδίο του χρόνου περιλαμβάνουν την τετραγωνική ρίζα του μέσου όρου τετραγώνων (rms), την μέγιστη τιμή (peak), τον παράγοντα κλίσης και την κύρτωση των σημάτων δόνησης.

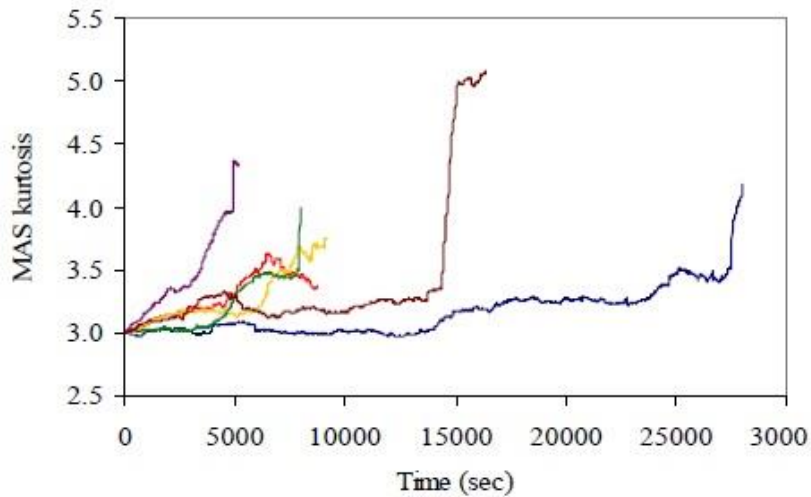
Σε μια προκαταρκτική ανάλυση των σημάτων δόνησης των έξι ρουλεμάν εκπαίδευσης (training bearings), διαπιστώθηκε ότι ούτε το πεδίο χρόνου ούτε η περιοχή συχνοτήτων παρουσίασαν μια σταθερή τάση της υποβάθμισης (φθοράς) του ρουλεμάν. Ως εκ τούτου, αναπτύχθηκε μια μέθοδο επεξεργασίας σήματος που εκμεταλλεύτηκε τον παράγοντα χρόνο και συχνότητας.

Το σήμα δόνησης από κάθε μέτρηση των 0,1 s πέρασε από φίλτρο διελεύσεως (Bandpass) με ζώνη συχνοτήτων 500 Hz. Είκοσι τέσσερα σήματα δονήσεων απομονώθηκαν και φιλτραρίστηκαν μέσω των φίλτρων διελεύσεως καλύπτοντας μια περιοχή συχνοτήτων 0-12 kHz των σημάτων δόνησης. Χρησιμοποιήθηκε φίλτρο μεταβλητού μέσου όρου στη χρονοσειρά κύρτωσης (time series kurtosis) για τον εντοπισμό ροπών με την πάροδο του χρόνου. Όταν ένα σήμα δόνησης ακολουθεί μια Gaussian κατανομή αυτό δείχνει μια υγιή κατάσταση του ρουλεμάν, η κύρτωση είναι 3,0 [36]. Μια τιμή κύρτωσης 3,0 παρατηρήθηκε στην αρχή του πειράματος όπως φαίνεται στην εικόνα 29.

Από μια οπτική (μακροσκοπική) επιθεώρηση της χρονοσειράς κυρτώσεως και μετά εφαρμογή του φίλτρου μεταβλητού μέσου όρου, μια αυξανόμενη τάση θα μπορούσε να παρατηρηθεί. Προκειμένου να προσδιοριστεί ποσοτικά η δυνατότητα εφαρμογής μιας τάσης για πρόγνωση, υπολογίστηκε ένας συντελεστής συσχέτισης μεταξύ κύρτωσης και χρόνου.

Ένα χαρακτηριστικό που αυξάνεται μονοτονικά με την πάροδο του χρόνου, είναι το ιδανικό σήμα υποβάθμισης (degradation signal) για την χρήση του συντελεστή συσχέτισης του Spearman, που χρησιμοποιήθηκε για να αξιολογηθεί το πόσο ισχυρή ήταν η μονοτονική σχέση μεταξύ της κύρτωσης και της χρονικής διάρκειας του πειράματος. Ο συντελεστής συσχέτισης (correlation coefficient) για το ρουλεμάν εκπαίδευσης 2_2(training bearing)

(δηλαδή ρουλεμάν 978-1-4673-0358-3 / 12 / \$ 31.00 © 2012 IEEE 2, προϋπόθεση 2) ήταν 0,829, πράγμα που συνεπαγόταν ισχυρή μονότονη σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών.



Εικόνα 29 Μέση μεταβαλλόμενη φασματική κύρτωση έξι ρουλεμάν: εύρος συχνοτήτων από 5,5 έως 6,0 kHz, κινούμενου μέσου όρου 100 μετρήσεων (data points).

Ένας συντελεστής συσχέτισης υπολογίστηκε για καθένα από τα χαρακτηριστικά κραδασμών: rms, κορυφή (peak), παράγοντας κλίσης και κύρτωση. Με βάση την ανάλυση συσχέτισης (correlation analysis) και χρησιμοποιώντας τα εξαχθέντα χαρακτηριστικά από τα έξι ρουλεμάν εκπαίδευσης, η κύρτωση που μετρήθηκε από τα σήματα δόνησης μέσω των φίλτρων ευρέως συχνοτήτων, με εύρος ζώνης συχνοτήτων από 5,5 έως 6,0 kHz, αναγνωρίστηκε ως το καλύτερο προγνωστικό επάνω στα χαρακτηριστικά των ρουλεμάν. Το μέγεθος παραθύρου του μέσου μεταβαλλόμενου της χρονοσειράς (time-series) κύρτωσης ήταν 100 μετρήσεις (data points).

Ένα γραμμικό ή εκθετικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή των τάσεων στα σήματα φθοράς-αποδόμησης (degradation) των ρουλεμάν [37] [38]. Με σκοπό την κατανόηση της σχέσης χρήσης των μοντέλων για την πρόγνωση των στοιχείων των ρουλεμάν, διεξήχθη μια ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) για τη κύρτωση του μέσου μεταβλητού φάσματος (MAS). Έγινε σύγκριση της τάσης της MAS κύρτωσης με κάθε ένα εκπαιδευτικό ρουλεμάν με τρεις διαφορετικούς τύπους μοντέλων σημάτων αποδόμησης (degradation signal):

$y = at + b$, $Y = a \exp(bt)$ και $y = a \exp(bt^2)$, όπου a και b είναι οι σταθερές μοντέλου, το y είναι το μέγεθος του σήματος αποδόμησης και το t είναι ο χρόνος. Το εκθετικό μοντέλο, $y = a \exp(bt^2)$, έδειξε το καλύτερο ταίριασμα (best fit) μεταξύ των τριών μοντέλων επεξεργασίας σημάτων φθοράς (αποδομησης) για τα έξι εκπαιδευτικά ρουλεμάν.

Ο Πίνακας 13 δείχνει το ποσοστό προσαρμογής του εκθετικού μοντέλου. Η τιμή του R-τετράγωνο των τεσσάρων από τα έξι ρουλεμάν υπερέβη τη τιμή του 0,800. Ωστόσο, οι τιμές R-τετράγωνο από τα δυο άλλα ρουλεμάν 1_2 και 3_2 ήταν 0,432 και 0,565, αντίστοιχα. Ήταν επικείμενο, ότι το εκθετικό μοντέλο δεν θα παρείχε υψηλής ακρίβειας προβλέψεις για τα δύο αυτά ρουλεμάν συγκριτικά με τα άλλα τέσσερα. Τα αποτελέσματα από την ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) έδειξε τους περιορισμούς της χρήσης του εκθετικού μοντέλου για μελλοντικές αναλύσεις. Περισσότερο αποτελεσματικά χαρακτηριστικά και / ή ένα πιο αποτελεσματικό μοντέλο υποβάθμισης/φθοράς (degradation model) θα πρέπει να διερευνηθεί στο μέλλον.

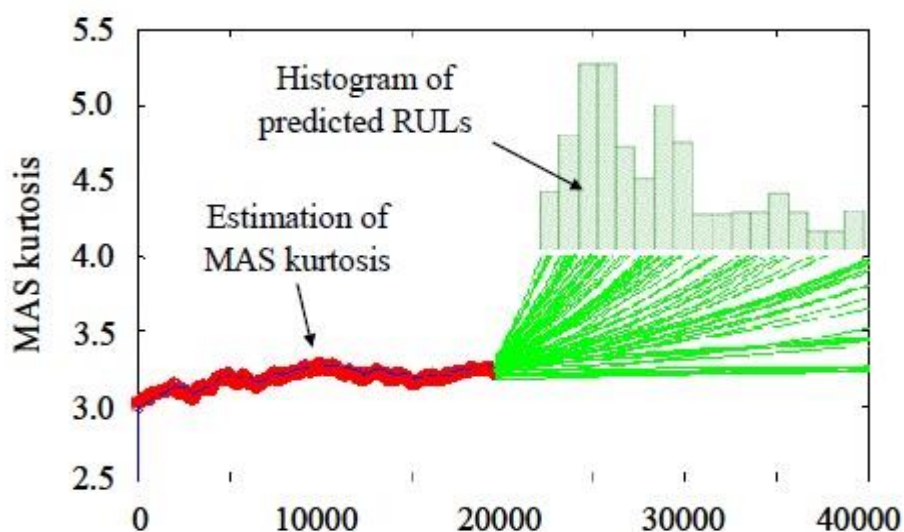
Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η κύρτωση MAS ήταν το καλύτερο χαρακτηριστικό που μετρήθηκε, όσον αφορά τον συντελεστή συσχέτισης (correlation coefficient), και με το εκθετικό μοντέλο να παρουσιάζει την καλύτερη ταύτιση στοιχείων (best fit). Ως εκ τούτου, έγινε εκτίμηση στην υπολειπόμενη διάρκεια ζωής των έντεκα υπό έλεγχο ρουλεμάν με βάση την MAS κύρτωση και το εκθετικό μοντέλο.

	Bearing 1_1	Bearing 1_2	Bearing 2_1	Bearing 2_2	Bearing 3_1	Bearing 3_2
R -square	0.800	0.432	0.879	0.885	0.919	0.565

Πίνακας 10 Εφαρμογή της $y = a \exp(bt^2)$ μεταβαλλόμενη μέση φασματική κύρτωση των έξι ρουλεμάν εκπαίδευσης.

Οι σταθερές του εκθετικού μοντέλου, a και b , επανεκτιμήθηκαν διαδοχικά με τη μέθοδο Bayesian Monte Carlo, λόγω των νέων διαθέσιμων παρατηρήσεων σχετικά με το MAS kurtosis. Λεπτομέρειες σχετικά με τη μέθοδο μπορούν να βρεθούν σε

αναφορές [39] [40] [41]. Η υπολειπόμενη ωφέλιμη ζωή, όλων των υπό έλεγχο ρουλεμάν, εκτιμήθηκε βρίσκοντας το σημείο που το μέγεθος (η τιμή) του εκθετικού μοντέλου υπερέβαινε ένα προκαθορισμένο όριο. Στην ανάλυση αυτή, το όριο αποτυχίας επιλέχθηκε να είναι 4 με βάση την παρατήρηση της κύρτωσης των έξι ρουλεμάν (training bearings) που παρουσιάζονται στον πίνακα 13. Η διαφορετική τιμή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για το συγκεκριμένο όριο, δεδομένου ότι ένα όριο ορίζεται με βάση τεχνικά χαρακτηριστικά, βιομηχανικά standard, πρότυπα ή δημοσιευμένες μελέτες.



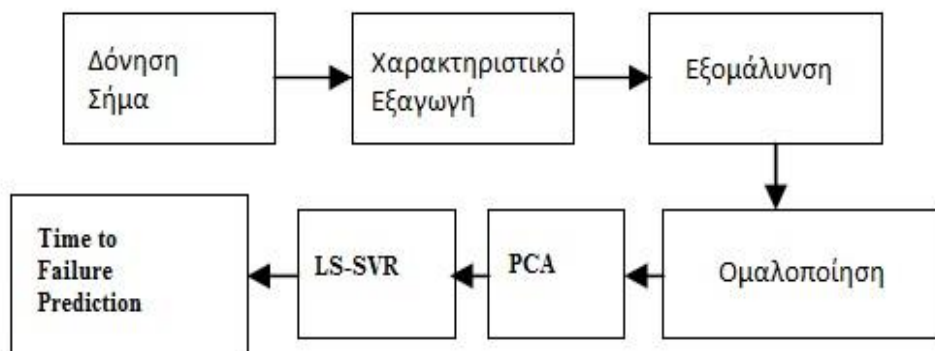
Εικόνα 30 Εκτίμηση υπολειπόμενης ωφέλιμης ζωής με τη χρήση MAS kurtosis και μέθοδος Bayesian Monte Carlo: ρουλεμάν δοκιμής 2_5.

Στην εικόνα 30 δείχνει ένα ιστόγραμμα των προβλέψεων χρόνου αποτυχίας του δοκιμαστικού ρουλεμάν 2_5. Η υπολειπόμενη ωφέλιμη ζωή (RUL) του ρουλεμάν 2_5 που εκτιμήθηκε σε 20.000 δευτερόλεπτα ήταν 3.580 δευτερόλεπτα. Η πραγματική υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του ρουλεμάν 2_5 ήταν 3090 δευτερόλεπτα. Το λάθος μεταξύ της εκτιμώμενης και της πραγματικής υπολειπόμενης διάρκειας ζωής του δοκιμαστικού ρουλεμάν 2_5 ήταν -15,9%. Η αρνητική τιμή στο σφάλμα σημαίνει ότι η ζωή υπερεκτιμήθηκε. Το σφάλμα υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1).

$$Error(\%) = \frac{ActualRUL - EstimatedRUL}{ActualRUL} \times 100\% \quad (1)$$

Β Μέθοδος 2: Ψηφιακό μοντέλο με Support VectorRegressor

Αυτή η ενότητα παρέχει την εναπομένουσα ωφέλιμη ζωή (RUL) μέθοδο εκτίμησης χρησιμοποιώντας μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων vector regressor. Με διαδοχική βελτίωση των σημάτων δόνησης από τα ρουλεμάν, τα χαρακτηριστικά εξάγονται για πρόγνωση βλάβης. Μια επισκόπηση της προσέγγισης παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 31.



Εικόνα 31 Επισκόπηση της προγνωστικής διαδικασίας χρησιμοποιώντας ένα απαλό ψηφιακό υπολογισμό.

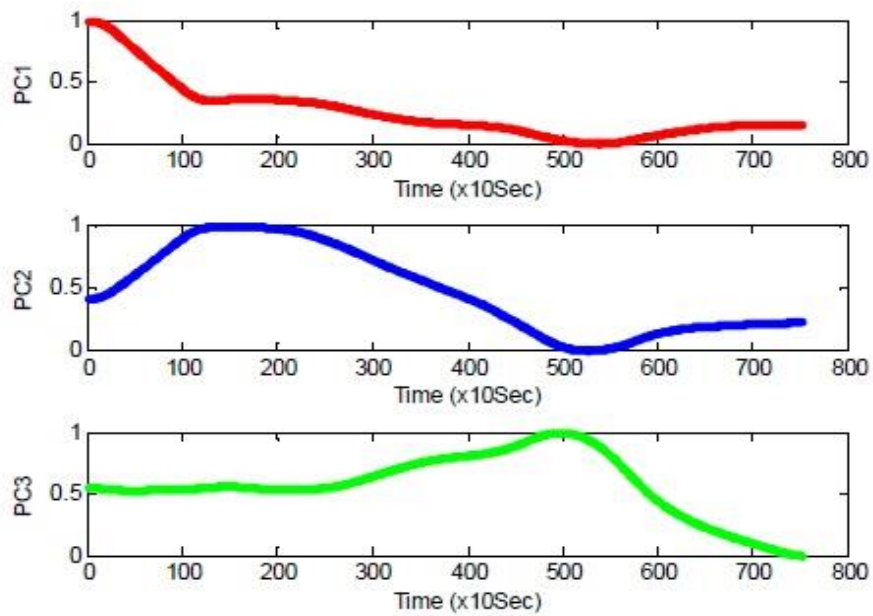
Η πρώτη δραστηριότητα περιλαμβάνει την εξαγωγή του καθαρού σήματος από τους κραδασμούς του ρουλεμάν. Εξήχθησαν δεκαεπτά χαρακτηριστικά από κάθε οριζόντιο και κάθετο σήμα δόνησης. Τα πρώτα πέντε χαρακτηριστικά εξήχθησαν χρησιμοποιώντας μέθοδο διασταύρωσης ανώτερης τάξης (higher-order crossing) [42]. Δέκα άλλα χαρακτηριστικά εξήχθησαν χρησιμοποιώντας κυματοειδή μετασχηματισμό (wavelet transformation). Μεταξύ των δέκα χαρακτηριστικών, πέντε χαρακτηριστικά αντιστοιχούσαν στην ενέργεια στους κατά προσέγγιση στα πρώτα πέντε επίπεδα αποσύνθεσης (decomposition levels). Ομοίως, τα πέντε χαρακτηριστικά αντιστοιχούσαν στην ενέργεια στους λεπτομερείς συντελεστές (detailed coefficients) στα πρώτα πέντε επίπεδα αποσύνθεσης. Επιπλέον δύο

χαρακτηριστικά αποτελούνταν από την αθροιστική ενέργεια σήματος μέχρι τη χρονική στιγμή [43] και την κορυφή του σήματος δόνησης.

Όταν όλα τα τριάντα τέσσερα χαρακτηριστικά (δεκαεπτά για οριζόντια και δεκαεπτά για κατακόρυφα σήματα δόνησης) εξήχθησαν, εξομαλύνθηκαν χρησιμοποιώντας φίλτρο ρυθμιζόμενου κινητού μέσου για την καταστολή του θορύβου στις μετρήσεις. Η ομαλοποίηση των χαρακτηριστικών, έγινε μετά την σχετική εξομάλυνση, για να φέρει τα χαρακτηριστικά μέσα στη ίδια κλίμακα, ως εκ τούτου, μειώνοντας τη πόλωση που οφείλετε στο μεγάλο δυναμικό εύρος των χαρακτηριστικών.

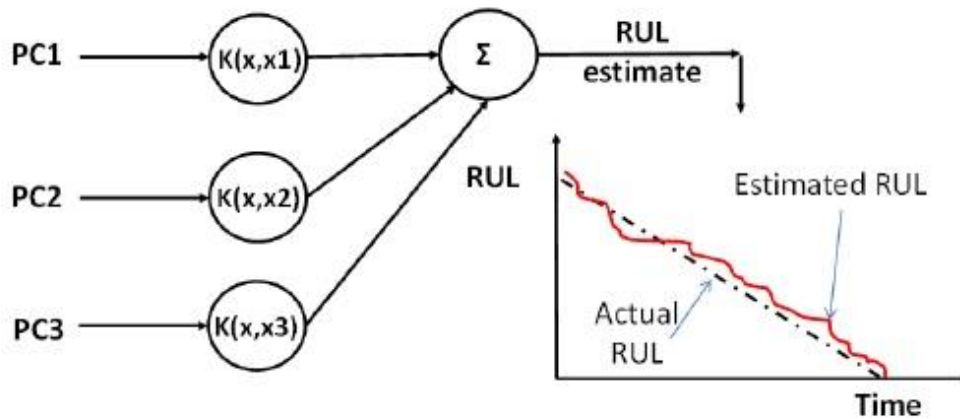
Η επόμενη δραστηριότητα ήταν μεταβλητή μείωση. Ένα μεγάλο πλήθος χαρακτηριστικών θα μπορούσε ενδεχομένως να υπερκαλύψει τα δεδομένα και να μειώσει τη συνολική απόδοση του μοντέλου (soft computing model) [44]. Σε αυτή τη μέθοδο, χρησιμοποιήθηκε principal components analysis (PCA) για μεταβλητή μείωση. Η μέθοδος PCA μειώνει ένα σύστημα από p χαρακτηριστικά σε k principal συνιστώσες χρησιμοποιώντας γραμμικό μετασχηματισμό ενώ διατηρούσε το μεγαλύτερο μέρος της μεταβλητότητας από το σετ χαρακτηριστικών. Η μέθοδος PCA εφαρμόστηκε στο σύνολο χαρακτηριστικών που εξήχθησαν από τα εκπαιδευτικά ρουλεμάν και οι τρεις πρώτες βασικές συνιστώσες, ήταν αυτές ,που αφορούσαν πάνω από το 99,5% της μεταβλητότητας των δεδομένων. Ως εκ τούτου, βγήκε το συμπέρασμα ότι μια μείωση τριών βασικών στοιχείων στο σύνολο χαρακτηριστικών από τριάντα τέσσερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα είναι μια λογική υπόθεση. Στην εικόνα 32 δείχνει μια γραφική παράσταση των τριών πρώτων βασικών στοιχείων για ρουλεμάν 2_2.

Για τον υπολογισμό του RUL χρησιμοποιήθηκε η τεχνική ελαχίστων τετραγώνων με vector regressor (LS-SVR) [45]. Αυτή η προγνωστική μέθοδος χρησιμοποιεί training and testing μοντέλα.



Εικόνα 32 εξομαλύνονται και ομαλοποιημένη χρονοσειρά των πρώτων 3ων κύριων εξαρτημάτων για την κάλυψη 2_2.

Στο training mode του LS-SVR, τρία κύρια συστατικά δόθηκαν σαν δεδομένα και ο χρόνος καταστροφής του ρουλεμάν σαν στόχος(εικόνα 33). Πριν από την εκπαίδευση του LS-SVR, τα δεδομένα εισόδου ήταν τυχαία μετατρεπόμενα έτσι ο αλγόριθμος θα μπορούσε να μάθει την υποκείμενη λειτουργία χαρτογράφησης της κατάστασης εισόδου, και να υπολογίσει την επιθυμητή έξοδο με ένα στατικό και όχι δυναμικό τρόπο. Εάν η εκμάθηση διεξαχθεί με ένα δυναμικό τρόπο, η απόδοση του LS-SVR θα ήταν εξαρτωμένη από τον χρόνο (time dependent), πράγμα το οποίο είναι ανεπιθύμητο.



Εικόνα 33 Εικόνα εκτίμησης RUL με βάση LS-SVR.

Στο testing mode, τα χαρακτηριστικά των ρουλεμάν αποκτήθηκαν από τα σήματα δόνησης και τα αντίστοιχα τρία βασικά στοιχεία υπολογίσθηκαν από μια transformation matrix που δημιουργήθηκε κατά την διάρκεια του training mode. Τα προκύπτοντα principal components δόθηκαν σαν δεδομένα εισόδου στο trained LS-SVR με σκοπό τον υπολογισμό εκτιμήσεως της εναπομένουσας ωφέλιμης ζωής.

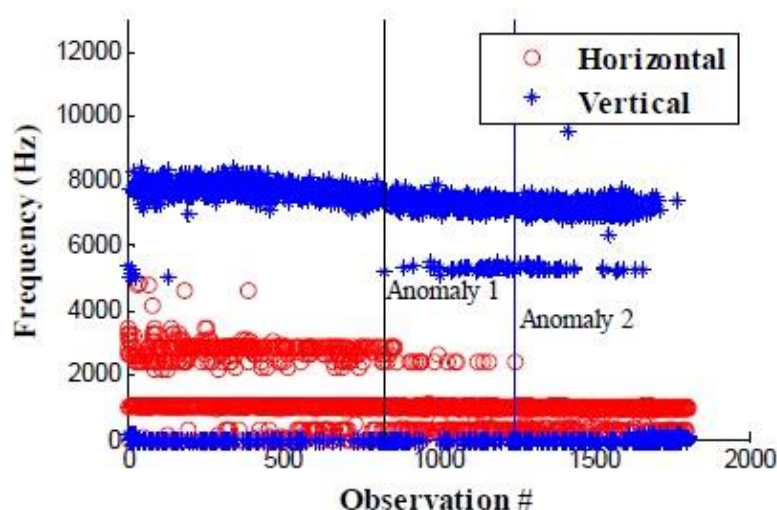
Γ Μέθοδος 3: Ανωμαλία υπογραφής συχνότητας κραδασμών Ανίχνευση και αναλογία χρόνου επιβίωσης .

Αυτή η ενότητα περιγράφει μια μεθοδολογία για την εκτίμηση της υπολειπόμενης ωφέλιμης ζωής (RUL) των test ρουλεμάν με τη μέθοδο ανίχνευσης ανωμαλιών, degradation feature extrapolation, και survival time ratios.

Μια ανωμαλία εντοπίστηκε όταν υπήρξε μια αλλαγή στη συχνότητα της δόνησης αιχμής στο φάσμα συχνοτήτων. Το φάσμα συχνοτήτων δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας τον **αλγόριθμο Fast Fourier (FFT)** . Ένα παράδειγμα ανωμαλίας που ανιχνεύτηκε φαίνεται στην εικόνα 34 για το έδρανο 1_3, όπου ένα νέο φάσμα κατακόρυφων δονήσεων συχνότατος περίπου 5300 Hz αρχίζει να εμφανίζεται με την παρατήρηση # 822. Πρόσθετες αλλαγές στο αποτύπωμα συχνοτήτων μπορεί να παρατηρηθεί από το peak της οριζόντιας δόνησης από τις παρατηρήσεις # 822 έως # 1247, όπου συχνότητες που αρχικά υπήρχαν κοντά στα 2500 Hz εξαφανίστηκαν.

Κάθε αριθμός παρατηρήσεων στο γράφημα ισοδυναμεί με διάρκεια 10 δευτερολέπτων.

Μια πιθανή φυσική εξήγηση για την αλλαγή στο αποτύπωμα της φέρουσας συχνότητας είναι η αρχή δημιουργίας ρωγμής, σπασίματος, ή - άλλου ελαττώματος της επιφάνειας εντός του ρουλεμάν που προκάλεσε στο σύστημα (ρουλεμάν) να δονείται με νέες φυσικές συχνότητες και τρόπους. Αυτή η υπόθεση, ωστόσο, δεν μπορούσε να επιβεβαιωθεί επειδή δεν υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με την ανάλυση αποτυχίας (failure analysis).



Εικόνα 34 Ανίχνευση ανωμαλιών για το ρουλεμάν 1_3 στην παρατήρηση # 822 μαρκαρισμένο με την κατακόρυφη γραμμή.

Με βάση την επιθεώρηση των δεδομένων εκπαίδευσης, θεωρήθηκε ότι τα ρουλεμάν παρουσίασαν διάφορα στάδια υποβάθμισης (φθοράς) πριν καταστραφούν, όπως αυτό υποδείχθηκε από την ανίχνευση πολλαπλών ανωμαλιών. Ορισμένα ρουλεμάν έφθασαν σε στάδιο υποβάθμισης (φθοράς) με σταδιακά αυξανόμενα χαρακτηριστικά, ενώ άλλα δεν έδειξαν καμία τέτοια τάση, αλλά ξαφνικά παρουσίασαν μια μεγάλη αύξηση των χαρακτηριστικών φθοράς, και πολύ γρήγορα εφθάρησαν ολοκληρωτικά.

Το προγνωστικό χαρακτηριστικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρακολούθηση της

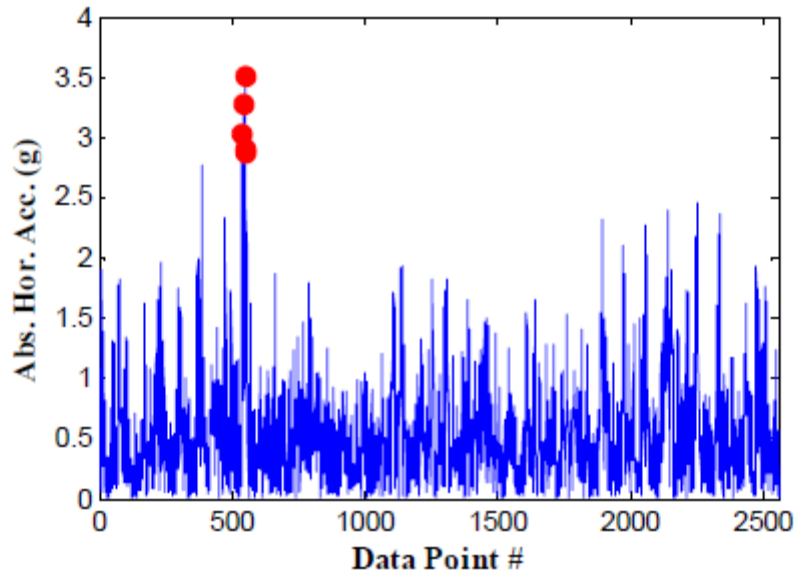
υποβάθμισης (φθοράς), ορίστηκε, ως ο μέσος όρος των πέντε υψηλότερων απόλυτων τιμών επιταχύνσεων που μετρήθηκε σε κάθε παρατήρηση. Χρησιμοποιήθηκε ομαλοποίηση μέσης τιμής τη μείωση του θορύβου. Η εικόνα 35 δείχνει ένα παράδειγμα του πως αυτό το χαρακτηριστικό καθορίστηκε για το ρουλεμάν 1_1 στην παρατήρηση # 2000. Τα υψηλότερα πέντε σημεία επιλέχθηκαν από τα 2560 σημεία της οριζόντιας επιτάχυνσης. Η ίδια προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών για τα δεδομένα κάθετης επιτάχυνσης. Η εξίσωση που ορίζει τα χαρακτηριστικά είναι η εξής:

$$f = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 acc_i$$

(2)

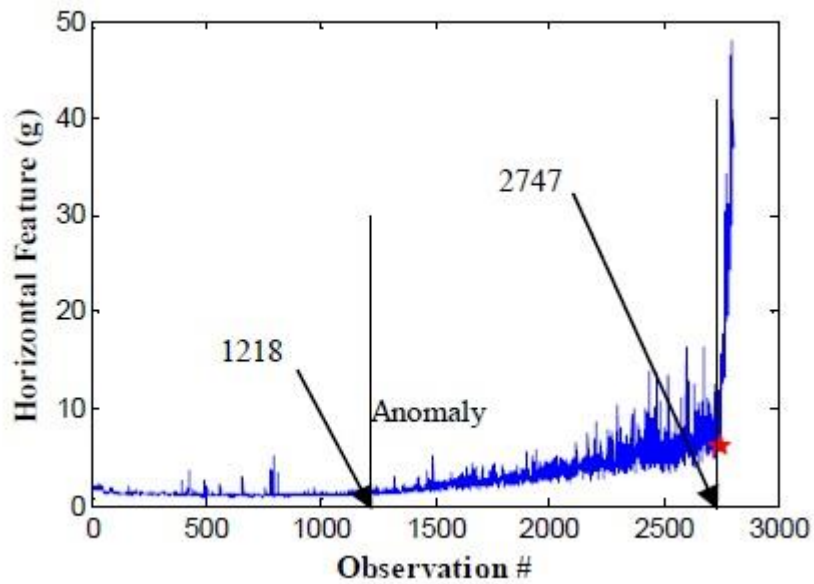
Όπου acc είναι η επιτάχυνση και i είναι ο δείκτης του σημείου δεδομένων (data point) αφού ταξινομηθούν σε αύξουσα σειρά σύμφωνα με την τιμή επιτάχυνσης.

Το οριζόντιο χαρακτηριστικό του ρουλεμάν 1_1 φαίνεται στην εικόνα 36. Η σταδιακή αύξηση στα οριζόντια χαρακτηριστικά παρατηρήθηκε μετά την ανίχνευση μιας ανωμαλίας στην παρατήρηση # 1218. Αυτή τη στιγμή το ρουλεμάν εισήλθε στο πρώτο ανώμαλο στάδιο. Κατά την παρατήρηση # 2747 το ρουλεμάν εισήλθε σε ένα δεύτερο ανώμαλο στάδιο όπου τα χαρακτηριστικά αυξήθηκαν απότομα. Η τάση υποβάθμισης (φθοράς) του ρουλεμάν 1_1 ήταν η ίδια με το δοκιμαστικό ρουλεμάν 1_3. Αυτή ήταν η μόνη περίπτωση που ένα σταθερά αυξανόμενο χαρακτηριστικό βρέθηκε σε δοκιμαστικό ρουλεμάν.



Εικόνα 35 Απόλυτες οριζόντιες επιταχύνσεις για το ρουλεμάν 1_1 κατά την παρατήρηση # 2000.

Η γραφική απεικόνιση παρουσιάζει 2560 σημεία δεδομένων με τις 5 μεγαλύτερες τιμές σημειωμένες με κύκλους.

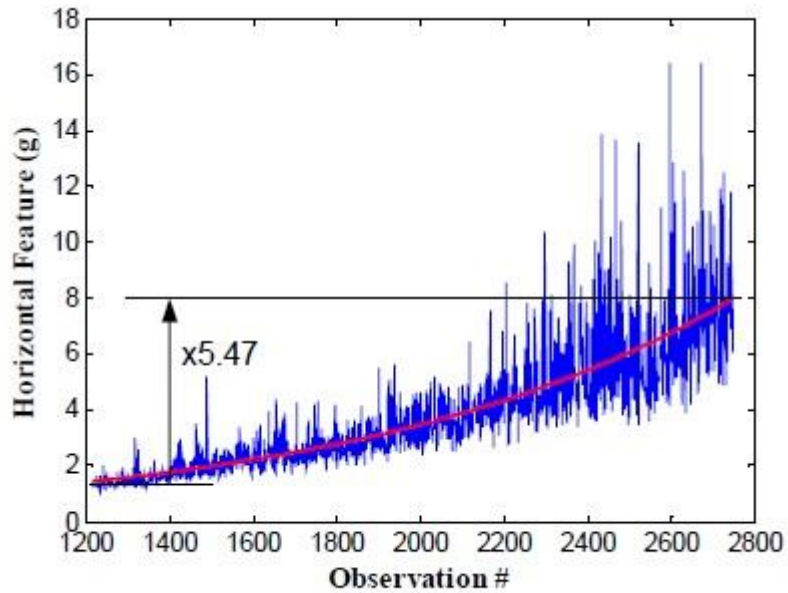


Εικόνα 36 Γραφική απεικόνιση οριζόντιων χαρακτηριστικών για το ρουλεμάν 1_1. Η ανίχνευση ανωμαλίας σημειώνεται με κάθετη γραμμή. Το αστέρι σημειώνει την εμφάνιση μιας δεύτερης ανώμαλης περιοχής όπου τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα αυξήθηκαν απότομα.

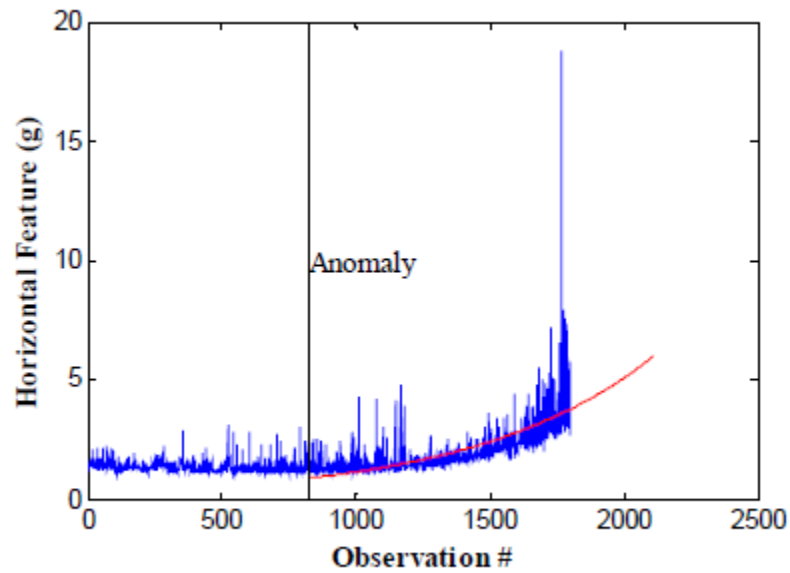
Η πρόβλεψη αστοχίας στο δοκιμαστικό ρουλεμάν 1_3, προσεγγίσθηκε σε δύο βήματα. Το πρώτο βήμα ήταν να εκτιμηθεί ο χρόνος κατά τον οποίο το ρουλεμάν έμπαινε σε μια δεύτερη ανώμαλη περιοχή. Το δεύτερο βήμα ήταν να εκτιμηθεί πόσο διαρκεί η δεύτερη ανώμαλη περιοχή πριν από την ολοκληρωτική αστοχία του ρουλεμάν. Για την τάση που παρουσιάζεται στην εικόνα 36, μια εκθετική καμπύλη προσαρμόσθηκε από το σημείο ανίχνευσης της πρώτης ανωμαλίας μέχρι το τέλος της πρώτης ανώμαλης περιοχής. Η προσαρμοσμένη τιμή στο τέλος της πρώτης ανωμαλίας διαιρείται με την τιμή που μετρήθηκε τη στιγμή ανίχνευσης της ανωμαλίας 5.47 (εικόνα 37). Ο χρόνος για το ρουλεμάν 1_1 να αστοχήσει μετά την είσοδο στη δεύτερη ανώμαλη περιοχή ήταν 560 s. Ο χρόνος διάρκειας της δεύτερης ανωμαλίας διαιρείται με το χρόνο διάρκειας της πρώτης ανωμαλίας και μας δίνει τον λόγο διάρκειας ανωμαλίας:

$$AnomalyRatio = \frac{560s}{15290s} = 0.0366 \quad \text{for Bearing 1_1}$$

Η γραφική απεικόνιση του οριζόντιου χαρακτηριστικού για το ρουλεμάν 1_3 δίνεται στην εικόνα 38, καθώς και ο χρόνος ανίχνευσης της ανωμαλίας και η προσαρμογή της εκθετικής καμπύλης. Η τιμή του οριζόντιου χαρακτηριστικού εκτιμήθηκε με παρεμβολή (extrapolation) της καμπύλης για να φτάσει στο όριο (κατώφλιο) 5.99 κατά την παρατήρηση # 2115. Αυτό το όριο (κατώφλιο) υπολογίσθηκε πολλαπλασιάζοντας την τιμή του οριζόντιου χαρακτηριστικού κατά το χρόνο ανίχνευσης της ανωμαλίας, με τον συντελεστή 5.47 που ελήφθη προηγουμένως.



Εικόνα 37 Γραφική απεικόνιση του οριζόντιου χαρακτηριστικού για το ρουλεμάν 1_1 από το χρόνο της ανωμαλίας μέχρι το τέλος του πρώτου σταδίου αστοχίας.



Εικόνα 38 Γραφική απεικόνιση του οριζόντιου χαρακτηριστικού για το ρουλεμάν 1_3 με μια εκθετική καμπύλη προσαρμοσμένη με τη μέθοδο της παρεκβολής (extrapolation) .Το χαρακτηριστικό προβλέπεται να φτάσει στο όριο (κατωφλίο) της παρατήρησης # 2115.

Η ανίχνευση ανωμαλίας στην παρατήρηση # 822 θεωρείται ότι είναι η αρχή της ανωμαλίας 1 (εικόνα 38). Αφαιρώντας το 822 από το 2115, λαμβάνουμε η διάρκεια της ανωμαλίας από τις παρατηρήσεις 1 ως 1293 ή 12.930 δευτερόλεπτα. Η διάρκεια της ανωμαλίας 2 υπολογίστηκε με τον πολλαπλασιασμό της διάρκειας της ανωμαλίας 1 με το λόγο ανωμαλίας που λαμβάνεται από το ρουλεμάν 1_1, όπως φαίνεται από το την ακόλουθη εξίσωση:

$$2nd\ Ano.\ Duration = 0.0366 \times 1st\ Ano.$$

Η διάρκεια υπολογίζεται ότι είναι 478 δευτερόλεπτα, στρογγυλεμένη στο πλησιέστερο δευτερόλεπτο. Ο χρόνος μέχρι την αστοχία (failure) από το σημείο ανίχνευσης της ανωμαλίας υπολογίστηκε προσθέτοντας και τις δύο διάρκειες ανωμαλίας:

$$Time\ from\ 1st\ anomaly\ to\ failure = 12,930 + 478 = 13,404\ s$$

Δεδομένου ότι ο ρουλεμάν 1_3 επιβίωσε για 9800 δευτερόλεπτα κατά την διάρκεια του πειράματος, η εκτίμηση του RUL για το ρουλεμάν 1_3 ήταν:

$$RUL\ of\ Bearing\ 1_3 = 13404 - 9800 = 3604\ s$$

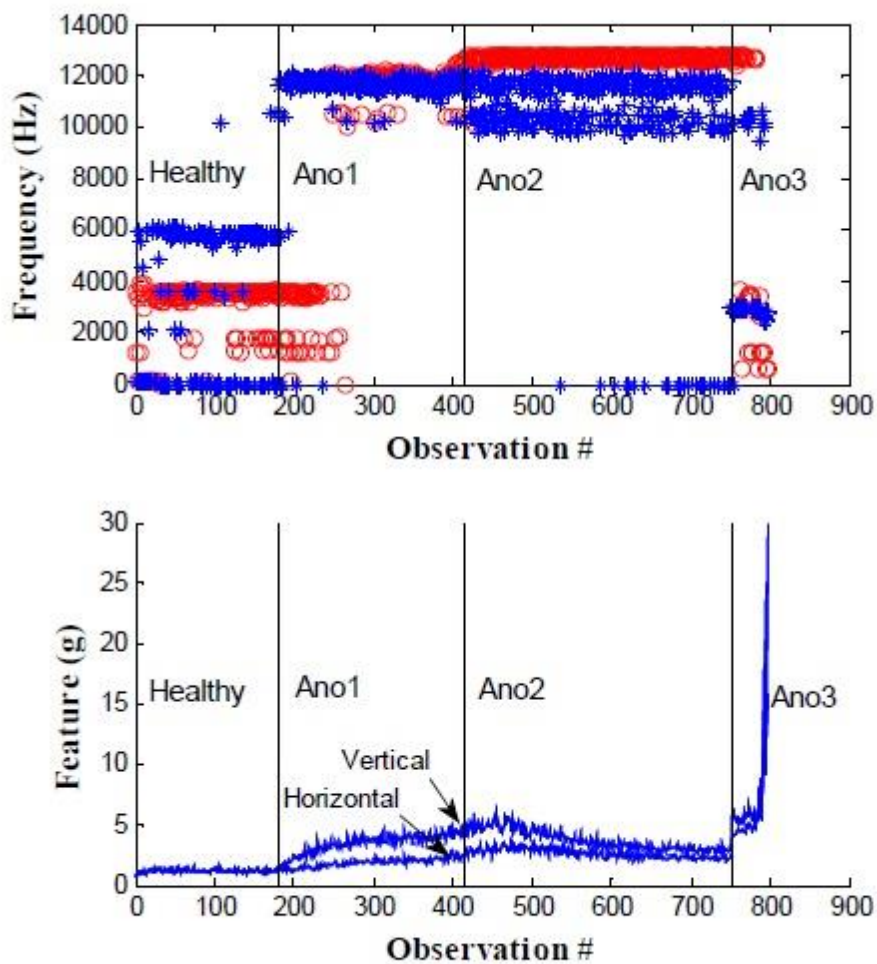
Με αναφορά στο πραγματικό RUL που δόθηκε από τους οργανωτές του διαγωνισμού, αυτό (δηλαδή το RUL) εκτιμάται ότι έχει ένα σφάλμα της τάξεως του 37%. Το ρουλεμάν 1_3 ήταν το μόνο test ρουλεμάν είχε μια αυξανόμενη τάση και κατά συνέπεια μια εκθετική καμπύλη θα μπορούσε να προσαρμοσθεί με παρεκβολή (extrapolation) με σκοπό να δώσει τα χαρακτηριστικά μιας γραμμής κατωφλίου. (threshold line.)

Σε άλλες περιπτώσεις, τα χαρακτηριστικά των ρουλεμάν δεν παρουσίαζαν μια αυξανόμενη τάση με την πάροδο του χρόνου. Αυτό συνέβη στην περίπτωση του training ρουλεμάν 2_2. Στην εικόνα 39 δείχνει σε γραφική απεικόνιση την ανίχνευση ανωμαλίας για το ρουλεμάν 2_2 και την αντίστοιχη απόκριση του σε οριζόντια και

κατακόρυφα χαρακτηριστικά δόνησης. Κάθετες γραμμές στη γραφική απεικόνιση του σχήματος 11 την χωρίζουν σε μια υγιή περιοχή και τρεις ανώμαλες περιοχές. Στις περιπτώσεις των test ρουλεμάν όπου τα χαρακτηριστικά των δονήσεων δεν παρουσιάζουν αυξανόμενη τάση, η εκτίμηση του RUL έγινε υπολογίζοντας τις σχέσεις της διάρκειας των ανώμαλων περιοχών. Σχετικά με το ρουλεμάν 2_2 ως παράδειγμα (εικόνα 36), η περιοχή με την ανωμαλία 1 διήρκεσε από τις παρατηρήσεις # 181 έως # 415, δηλ. 2340 δευτερόλεπτα. Η περιοχή για την Anomaly 2 διήρκεσε από παρατηρήσεις # 416 έως # 752, δηλ. 3360 δευτερόλεπτα. Τέλος, η περιοχή για την Anomaly 3 διήρκεσε από τις παρατηρήσεις # 753 έως την αστοχία του ρουλεμάν, δηλ. 440 δευτερόλεπτα. Στα περισσότερα από τα δεδομένα δοκιμών, οι περιοχές Anomaly 2 και Anomaly 3 δεν ήταν γνωστές, ως εκ τούτου, οι διάρκειες της Anomaly 2 και Anomaly 3 έπρεπε να εκτιμηθούν βάσει της διάρκειας της Anomaly 1. Λαμβάνοντας τις αναλογίες της διάρκειας ανωμαλίας για το training ρουλεμάν 2_2, λαμβάνουμε τις σχέσεις:

$$Ano2 \text{ Duration} = 1.434 \text{ Ano1 Duration}$$

$$Ano3 \text{ Duration} = 0.187 \text{ Ano1 Duration}$$



Εικόνα 39 Γραφική απεικόνιση ανίχνευσης ανωμαλιών (κορυφή) και χαρακτηριστικά (κάτω) για training ρουλεμάν 2_2.

Η μέθοδος υπολογισμού των αναλογιών των διαρκειών ανωμαλίας χρησιμοποιήθηκε όταν δεν υπήρχε αυξητική τάση στα δεδομένα δοκιμών που μας δόθηκαν. Η εκτίμηση RUL με τη μέθοδο αυτή δεν έδωσε μια κατανομή του χρόνου αποτυχίας λόγω του μικρού αριθμού των training δεδομένων (training data). Μια σύνοψη των σφαλμάτων εκτίμησης RUL που υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την μέθοδο 3 παρουσιάζεται στον Πίνακα 14. Για κάθε test ρουλεμάν, δύο RUL τιμές δημιουργείτο χρησιμοποιώντας τα δύο training ρουλεμάν για κάθε διαφορετική κατάσταση φόρτισης. Ο μέσος όρος των δύο τιμών RUL ελήφθη. Έγινε εξαίρεση για

το ρουλεμάν 1_3 γιατί είχε μια μοναδική τάση που το έκανε να μοιάζει με το ρουλεμάν 1_1. Άλλη εξαίρεση ήταν όταν ο υπολογισμός ενός από τα RUL έδινε αρνητικό αριθμό. Στην περίπτωση αυτή, παραλήφθηκε από το υπολογισμό του μέσου όρο.

Condition 1		Condition 2		Condition 3	
Bearing	Error (%)	Bearing	Error (%)	Bearing	Error (%)
B1_3*	37	B2_3	64	B3_3	90
B1_4	80	B2_4	10		
B1_5	9	B2_5	-440		
B1_6	-5	B2_6	49		
B1_7	-2	B2_7	-317		

Πίνακας 11 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΜΕΘΟΔΟ 3

6.1.2 Σύγκριση μεθόδων εκτίμησης RUL

Οι τρεις μέθοδοι που παρουσιάστηκαν παραπάνω, με βάση το άρθρο «Estimation of Remaining Useful Life of Ball Bearings using Data Driven Methodologies» των Edwin Sutrisno, Hyunseok Oh, Arvind Sai Sarathi Vasan, και Michael Pecht χρησιμοποίησαν διαφορετικά χαρακτηριστικά για την παρακολούθηση της αποδόμησης (φθοράς) και διαφορετικές προσεγγίσεις για την εκτίμηση των RUL. Σε αυτή την ενότητα συζητούμε τα δυνατά σημεία και τα πλεονεκτήματα/προκλήσεις κατά τη χρήση κάθε μεθόδου.

Στη μέθοδο 1, η φασματική κύρτωση του σήματος επιτάχυνσης βρέθηκε ως το χαρακτηριστικό που είχε την πιο μονότονη τάση να αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η λειτουργία ήταν χρήσιμη για την παρακολούθηση του συσσωρευση ζημιών με την πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, το εκθετικό μοντέλο προσομοίωσης Bayesian Monte Carlo δεν ήταν ιδανικό για καταγράψει την απότομη αύξηση της συμπεριφοράς κοντά στο τέλος της ζωής του ρουλεμάν. Αυτή η συμπεριφορά

εισήγαγε μια τάση υπερεκτίμησης του RUL. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ικανότητά της να παράγει διαφορετικά RUL (generate a distribution of RUL) από τα οποία μπορεί ο χρήστης να λαμβάνει αποφάσεις με βάση το επίπεδο κινδύνου.

Στη μέθοδο 2, δεν απαιτείται μονοτονική τάση των χαρακτηριστικών δεδομένου ότι η τεχνική soft computing ήταν σε θέση να αναγνωρίζει πρότυπα (patterns) μεταξύ των χαρακτηριστικών. Τα έξι training ρουλεμάν εμφάνισαν μεγάλη μεταβλητότητα στους χρόνους αστοχίας (1 ώρα έως 7 ώρες). Εξαιτίας των περιορισμένων training δειγμάτων και της μεγάλης ποικιλίας των LSSVR υπερεκτιμήθηκε το RUL ορισμένων από τα ρουλεμάν δοκιμής. Εάν είχαν δοθεί περισσότερα training ρουλεμάν για κάθε διαφορετική συνθήκη φόρτισης, η ακρίβεια του αλγορίθμου θα είχε καλύτερη ακρίβεια.

Στη μέθοδο 3, η εκτίμηση του RUL βασίστηκε στις συγκρίσεις σχετικά με τις διάρκειες των σταδίων αποδόμησης (αστοχίας) μεταξύ των training ρουλεμάν και test ρουλεμάν, εκτός από το ρουλεμάν 1_3. Ανωμαλίες ανιχνεύθηκαν με την ανάλυση των αλλαγών της ταυτότητας των συχνοτήτων. Σε μερικά ρουλεμάν ωστόσο, οι ανωμαλίες δεν ήταν σαφώς προσδιορισμένες ή λόγω μη αλλαγής των συχνοτήτων ή ύπαρξης θορυβωδών μοτίβων στις συχνότητες. Μόλις προσδιορίστηκαν οι ανωμαλίες, η διαδικασία εκτίμησης RUL ήταν εύκολη και απαιτήθηκε ελάχιστη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Περαιτέρω βελτίωση αυτής της μεθόδου μπορεί να γίνει με την προσθήκη περισσότερων training ρουλεμάν όπου η εκτίμηση του RUL μπορεί να ληφθεί ως μια κατανομή τιμών (distribution) αντί μιας ενιαίας μέσης τιμής.

7^ο Κεφάλαιο: Εκτίμηση της υπολειπόμενης ωφέλιμης ζωής των ρουλεμάν

7.1 Αξιολόγηση υπολειπόμενης χρήσιμης ζωής για συστήματα με μη ταλαντευόμενη συμπεριφορά

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί περιγράφεται η εργασία των Sergey Porotsky και Zigmund Blunband οι οποίοι παρουσιάζουν τις μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν από μια ομάδα από το Center for Advanced Life Cycle Engineering (CALCE) στο Πανεπιστήμιο του Maryland για το διαγωνισμό IEEE 2012 PHM Data Challenge που πραγματοποιήθηκε από την IEEE Reliability Society και το Ινστιτούτο Femto-ST. Ο στόχος της ομάδας αυτής ήταν να παρέχει την καλύτερη εκτίμηση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής (remaining usefull life RUL) των ρουλεμάν κάτω από πειραματικές συνθήκες. Το κύριο πλεονέκτημα των παρουσιαζόμενων δεδομένων είναι η σημαντική απώλεια της τάσης στη συμπεριφορά των σημαντικών παραμέτρων (οριζόντια και κάθετη δόνηση), αποφεύγοντας έτσι τη χρήση γνωστών προτύπων πρόβλεψης RUL.

Η συντήρηση βασισμένη σε συνθήκες (Condition-Based Maintenance-CBM) είναι γνωστό ότι είναι η πιο αποτελεσματική συντήρηση για εξοπλισμό και εξαρτήματα τα οποία μπορούν να επιθεωρούνται περιοδικά. Τα CBM συνήθως βασίζονται σε δεδομένα και συλλέγονται μέσω παρακολούθησης κατάστασης. Το ερώτημα είναι πώς να προβλέψετε το RUL ενός στοιχείου με την αποδεκτή ακρίβεια. Οι τεχνικές προγνωστικότητας εξαρτώνται από το εάν βασίζεται η αξιολόγηση προγνωστικών δεδομένων που λαμβάνονται από ένα μοντέλο ή από γενικά ιστορικά / στατιστικά δεδομένα. Το πρώτο από αυτά δύο έχουν χαρακτηριστεί ως προσέγγιση "λευκού κουτιού" (τεχνικές βασισμένες σε μοντέλα, βασισμένες στη φυσική), ενώ το δεύτερο ονομάστηκε προσέγγιση "μαύρου κουτιού" (data-driven, modelfree τεχνικές). Αυτό

το άρθρο περιγράφει την ανάπτυξη ενός αλγόριθμου με γνώμονα τα δεδομένα για την πρόβλεψη του RUL - μέσω του παραδείγματος ενός ρουλεμάν, καθώς υποβαθμίζεται από μια αρχική (άγνωστη) κατάσταση σε κατάσταση που ορίζεται ως αποτυχία. Στην περίπτωση αυτή, εκτίθενται έξι σειριακά σύνολα δεδομένων πολλών μεταβλητών από 3 ομάδες ρουλεμάν σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας που έχουν παρασχεθεί ως το Learning Set (του IEEE Διαγωνισμός πρόκλησης PHM 2012).

Κάθε σύνολο δεδομένων περιελάμβανε:

1. Χρονική σειρά οριζόντιων και κάθετων μετρήσεων κραδασμών για πολλά ρουλεμάν που αντιπροσωπεύουν κάθε ένα ρουλεμάν όπου η αρχική φθορά και οι συνθήκες κατασκευής ήταν άγνωστες.
2. μετρήσεις θερμοκρασίας

Τα σύνολα δοκιμών περιείχαν παραδείγματα μονάδων που εκτελούσαν κάποιο χρόνο πριν την αποτυχία. Τα σύνολα χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του RUL των εδράνων και για την αξιολόγηση της ακρίβειας των λύσεων υποβλήθηκε.

Λεπτομερής ανάλυση των συνόλων δεδομένων, που παρέχονται από τον διαγωνισμό Challenge, παρουσιάζεται στην ενότητα "Πειραματικά δεδομένα".

- Η ενότητα "Προγνωστικά με γνώμονα τα δεδομένα" εξετάζει ευρέως γνωστές προσεγγίσεις προγνωστικών που βασίζονται σε δεδομένα και λόγους ακαταλληλότητας για τα παρουσιαζόμενα σύνολα δεδομένων.
- Ο προτεινόμενος αλγόριθμος πρόβλεψης παρουσιάζεται στην ενότητα "Προσέγγιση εκτίμησης RUL".
- Η σημασία της ακρίβειας της πρόβλεψης και των διαφορετικών μέτρων προβλεψιμότητας, ως απόλυτη και σχετική ακρίβεια, εξετάζεται στο τμήμα "Κριτήρια Ακρίβειας".
- Ορισμένες πτυχές της διεξαγωγής της διασταυρούμενης επικύρωσης εξετάζονται στην ενότητα "Κατάρτιση του προτεινόμενου μοντέλου".
- Προκειμένου να υποστηριχθεί η βελτιστοποίηση των παραμέτρων ελέγχου μοντέλου, προτείνεται η μέθοδος Global-Optimization Cross-Entropy, μια σύντομη περιγραφή αυτής της μεθόδου παρουσιάζεται στην ενότητα "Cross-Entropy Method".

- Η ενότητα "Μελέτη περίπτωσης" εξετάζει τα αποτελέσματα των αποτελεσμάτων, καθώς το προτεινόμενο μοντέλο επικυρώνεται με τη χρήση πραγματικών δεδομένων παρακολούθησης κραδασμών που συλλέγονται στο πεδίο από έδρανα και εκτελείται συγκριτική μελέτη.
- Στην τελική ενότητα παρουσιάζονται τα συμπεράσματα.

7.2 Πειραματικά Στοιχεία

Το Σετ Μάθησης περιλαμβάνει λειτουργικά δεδομένα (χρονοσειρές οριζόντιων και κάθετων μετρήσεων κραδασμών) από 6 διαφορετικά **ρουλεμάν**, ακριβέστερα, 2 ρουλεμάν για κάθε μία από τις 3 ομάδες που εκτίθενται σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας [46]. Σε κάθε σετ δεδομένων εκμάθησης, εκτελέστηκε για ένα μεταβλητό χρόνο. Τα μήκη των διαδρομών ποικίλουν, με το ελάχιστο μήκος διαδρομής 5.150 sec και το μέγιστο μήκος 28.030 sec.

Το σετ δοκιμών περιελάμβανε λειτουργικά δεδομένα από 11 διαφορετικές μονάδες - πέντε από τις πρώτες συνθήκες λειτουργίας, πέντε από το δεύτερο και το ένα από τις τρίτες συνθήκες λειτουργίας.

Σε κάθε σύνολο δεδομένων δοκιμών, το άγνωστο ρουλεμάν εκτελείται για μεταβλητό χρόνο μέχρι την αποτυχία, αλλά οι ερευνητές έχουν μόνο αποκομμένες χρονολογικές σειρές, δηλ. σύμφωνα με κάποιο χρόνο πριν την αποτυχία:

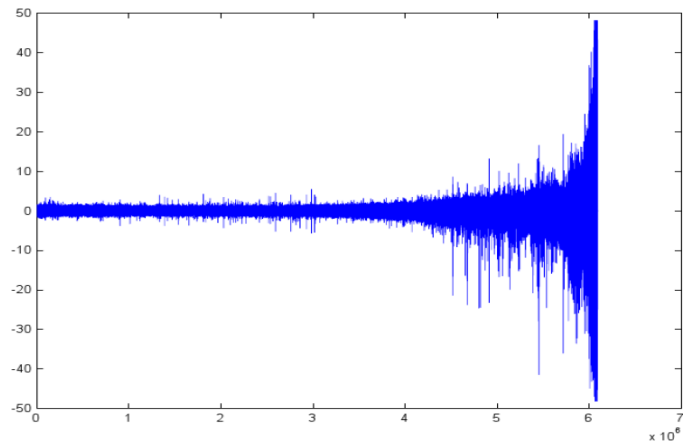
1. Τα μήκη των διαδρομών είναι ουσιαστικά ποικίλα, με το ελάχιστο των 1.720 sec και το μέγιστο 23.020 sec.
2. Οι μετρήσεις των κραδασμών πραγματοποιήθηκαν κάθε 10 δευτερόλεπτα μέσα σε σχισμή 0,1 sec με περίοδο ~ 40 μ sec (2.560 μετρήσεις ανά 0,1 δευτερόλεπτο).
3. Τα Σετ Μάθησης και Δοκιμής περιλάμβαναν επίσης μετρήσεις θερμοκρασίας (με περίοδο 0,1 δευτερολέπτων), αλλά μόνο για 10 ρουλεμάν από τα 17. (Εδώ τίθεται το ερώτημα πώς να χρησιμοποιήσουμε αυτά τα δεδομένα; Προς το παρόν χρησιμοποιήσαμε μετρήσεις θερμοκρασίας μόνο για ανάλυση ποιότητας).

Η γραφική παράσταση στην Εικόνα 37 δείχνει το τυπικό παράδειγμα μετρήσεων κραδασμών για το πρώτο ρουλεμάν της ομάδας πρώτων συνθηκών λειτουργίας στο Learning Set [47]. Είναι σαφές ότι μέχρι το τελευταίο 1/3 της πλήρους χρονοσειράς απουσιάζει η τάση (trendability) της συμπεριφοράς των κραδασμών. Δεδομένης αυτής της "απουσίας τάσης" των δεδομένων, είναι αδύνατο να παρατηρήσουμε εύκολα τυχόν τάσεις στα δεδομένα που επιδιώκουν πιθανή συσχέτιση με την υποβάθμιση του ρουλεμάν. Λόγος της απώλειας τάσης είναι οι ανώμαλες συνθήκες εργασίας των ρουλεμάν - η μεγάλη ακτινική δύναμη που ασκείται στο ρουλεμάν (4000 N στις πρώτες συνθήκες λειτουργίας, 4,200 N στη δεύτερη κατάσταση λειτουργίας και 5,000 N στις τρίτες συνθήκες λειτουργίας). Λόγω τέτοιων μη φυσιολογικών συνθηκών, **η διάρκεια ζωής των ρουλεμάν ήταν μόνο 1 έως 7 ώρες.**

7.3 Πρόγνωση βασισμένη σε δεδομένα

Σε περίπτωση που τα δεδομένα είναι πολύ θορυβώδη (όπως φαίνεται στην εικόνα 40), είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθούν απευθείας. Ως εκ τούτου, το πρώτο καθήκον είναι να εκτελεστεί αποθορυβοποίηση. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους μπορείτε να εκτελέσετε αποθορυβοποίηση: αποθορυβοποίηση εξαρτώμενη από την τάση και αποθορυβοποίηση μη εξαρτώμενη από την τάση. Οι περισσότερες μέθοδοι πρόβλεψης RUL που βασίζονται σε δεδομένα προσανατολίζονται προς τη Στατιστική Τάσης (Trendability Statistics). Παραδείγματα τέτοιων στατιστικών είναι τα εξής:

- Βάση δεδομένων μηχανών αεροσκαφών της NASA [48]
- Βάση δεδομένων ρουλεμάν της NASA [48]
- Βάση δεδομένων ρουλεμάν αντλιών Gould σε канаδική εταιρία παραγωγής χαρτοπολτού Kraft Mill [49]
- Και τα λοιπά.



Εικόνα 40 Η αλλαγή του κραδασμού εξαρτάται από το χρόνο

Το γράφημα στην εικόνα 41 δείχνει το τυπικό παράδειγμα της Στατιστικής Τάσης, βλέπε [48], για τον αριθμό μονάδας 2 και τον αισθητήρα αριθ. 2 του συνόλου δεδομένων FD001. Για τέτοιες στατιστικές τάσης, αναπτύσσονται πολλές προσεγγίσεις. Μια από τις πρώτες ιστορικές μεθόδους που προτάθηκαν για την επιδείνωση του συστήματος με μία κρίσιμη παράμετρο (π.χ. ελαστικά) βασίστηκε στην τυχαία πρόβλεψη της διαδικασίας και στην κατασκευή μιας συνάρτησης πιθανοτήτων αστοχίας υπό όρους [50]. Στην περίπτωση αυτή, η συνθήκη του αντικειμένου αναφερόταν στην καθαρά καθορισμένη τεχνική κατάσταση του αντικειμένου, που προσδιορίστηκε με γνωστές τιμές κρίσιμης παραμέτρου και αντίστοιχο χρόνο λειτουργίας.

Στην προσέγγιση [51] χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση προγνωστικών με βάση την ομοιότητα για την πρόβλεψη του RUL για τη βάση δεδομένων των αεροσκαφών της NASA [48], [52] Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν εξεταστεί για την πρόβλεψη του RUL Bearing από τη βάση δεδομένων [49] το Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη του RUL για τη Βάση Δεδομένων των Τριβέων NASA [48].

Σε περίπτωση που η συμπεριφορά των παραμέτρων δεν είναι τάση, αλλά με κάποια περιοδικότητα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ορισμένες άλλες μέθοδοι. Για

παράδειγμα, για την βάση δεδομένων "Callt2 Building People Counts Data Set" [54] σε [55] Markov-Modulated Poisson διεργασίες αναπτύχθηκαν μοντέλα.

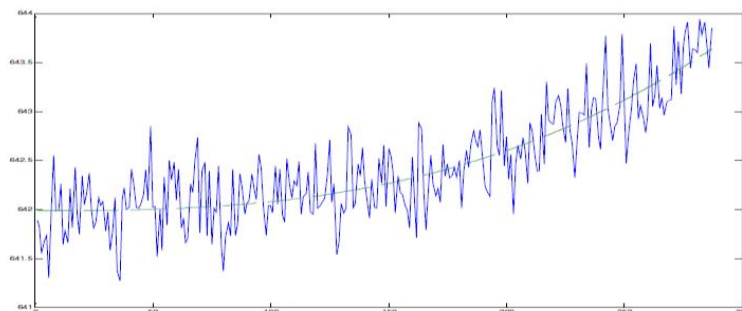
Το γράφημα στην εικόνα 42 δείχνει το τυπικό παράδειγμα στατιστικής που δεν βασίζεται στην τάση αλλά στην περιοδικότητα.

Δυστυχώς, για τις στατιστικές που δεν βασίζονται στην τάση ή στην περιοδικότητα, τα προαναφερθέντα και άλλα ευρέως γνωστά προγνωστικά μοντέλα δεν ισχύουν.

7.4 Προσέγγιση της εκτίμησης του σημείου

Η προκαταρκτική ανάλυση των στατιστικών στοιχείων δεν έδειξε σαφή σημασία των μετρήσεων της θερμοκρασίας για την πρόβλεψη του RUL, για τους εξής λόγους:

- Οι μετρήσεις θερμοκρασίας έγιναν μόνο για 10 ρουλεμάν (4 από το Learning Data Set και 6 από το Set Test Data Set) από τα 17 ρουλεμάν.
- Η αλλαγή θερμοκρασίας είναι πολύ παρόμοια και για τα 9 ρουλεμάν (αυξάνονται και μετά από αυτό το σχεδόν σταθερό όριο), αλλά ουσιαστικά διαφέρουν για τον αριθμό 1 από την πρώτη ομάδα επιχειρησιακών συνθηκών (διπλή αύξηση και στασιμότητα).

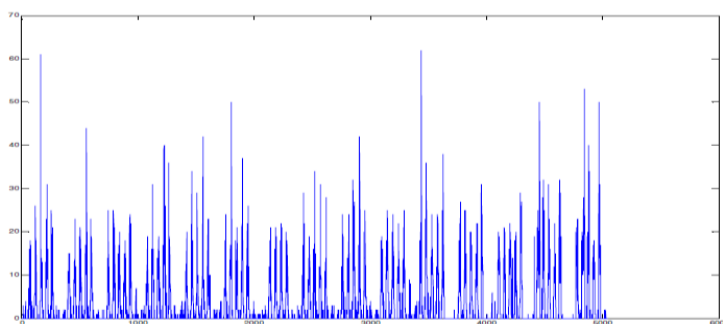


Εικόνα 41 Τυπική γραφική παράσταση της συμπεριφοράς παραμέτρου τάσης

Επομένως, για ποσοτική ανάλυση αποφασίσαμε να χρησιμοποιηθούν μόνο παράμετροι κραδασμών. Λόγω της απώλειας της τάσης, ήταν αδύνατο να εκτελεστεί η αποθορυβοποίηση (εξομάλυνση) και συνεπώς

- Πρόβλεψη RUL απευθείας για παραμέτρους κραδασμών. Έτσι, αντί για τιμές άμεσης μέτρησης των δονήσεων, προτείναμε να χρησιμοποιήσουμε συσσωρευμένες τιμές. Στις τρέχουσες στατιστικές οι τιμές των κραδασμών μετρούνται με επιταχυνσιόμετρο ως επιτάχυνση, σε μονάδες "g" [47]. Φυσικά η ισχύς στη στιγμή t (και για πλατφόρμα και μπάλες) είναι ανάλογη προς την επιτάχυνση, και η τρέχουσα (στιγμιαία) υποβάθμιση είναι ανάλογη με την ισχύ. Έτσι, η συσσωρευμένη αποικοδόμηση για το διάστημα $[0 \dots t]$ είναι ανάλογη της συσσωρευμένης επιτάχυνσης. Βεβαίως, επειδή η επιρροή της επιτάχυνσης στην υποβάθμιση δεν είναι ομοιόμορφη, πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τις ακόλουθες πτυχές:

- η επίδραση της πρόσφατης επιτάχυνσης (π.χ., επιτάχυνση στο χρόνο = τρέχουσα ώρα - 100) είναι πιο σημαντική από την επίδραση του παλαιότερου (π.χ. στο χρόνο = τρέχουσα ώρα - 1000)
- Η επιρροή της μεγάλης επιτάχυνσης είναι πιο σημαντική από την χαμηλή επιτάχυνση (π.χ. η επιρροή της επιτάχυνσης = 10g θα είναι 12 ... 15 φορές ισχυρότερη από την επιρροή της επιτάχυνσης = 1g)



Εικόνα 42 Αριθμός ατόμων που εισέρχονται σε ένα κτίριο με την πάροδο του χρόνου

Έτσι, για τη συσσωρευμένη υποβάθμιση του μοναδικού ρουλεμάν στη σχισμή t προτείνεται να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη έκφραση:

που:

- Το F είναι μια συνάρτηση που λαμβάνει υπόψη την επίδραση της τιμής επιτάχυνσης
- Το R είναι μια συνάρτηση που λαμβάνει υπόψη την επίδραση του χρόνου
- t και i είναι αριθμοί υποδοχών για το θεωρούμενο ρουλεμάν
- j είναι ο αριθμός μετρήσεων μέσα στην υποδοχή i (στην περίπτωση μας, $j = 1 \dots 2560$)
- $V(i, j)$ είναι η δόνηση
- Τρέχουσα ώρα = $10t$ (σε δευτ.)

Δεν έγινε επιχείρηση ανάλυσης των δεδομένων εισόδου για την κατανόηση των χαρακτηριστικών που παρουσιάζονται στα σύνολα δεδομένων. Προκύπτουν λοιπόν διαφορετικοί τύποι λειτουργιών F και R .

Η συνάρτηση R μπορεί να είναι η ακόλουθη:

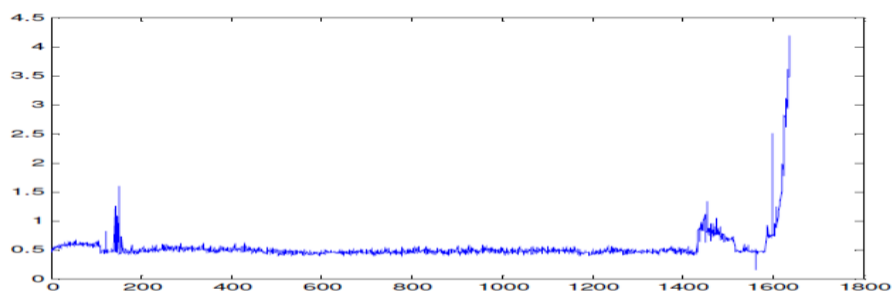
- Εκθετική, $R = e^{(-\alpha(t-i))}$
Κανονικοποιημένη εκθετική,
...
$$R = te^{(-\alpha(t-i))} / \left(\sum_{i=1}^t e^{(-\alpha(t-i))} \right)$$
- Πολυώνυμα τύπου 1, $R = (i/t)^\alpha$
- Πολυώνυμα τύπου 2, $R = (t-i+1)^\alpha$
- Κανονικοποιημένο πολυώνυμο κλπ.

Η συνάρτηση F μπορεί να είναι η ακόλουθη:

- Πολυώνυμο, $F = V(i, j)^\beta$
- Κανονικοποιημένο πολυώνυμο,

$$F = \left(\sum_{j=1}^{2560} V(i, j) \beta / 2560 \right)^{(1/\beta)}$$

Η γραφική παράσταση στην εικόνα 43 δείχνει το τυπικό παράδειγμα της συμπεριφοράς Κανονικοποιημένης Πολυωνυμικής Λειτουργίας F ανάλογα με τον αριθμό της θυρίδας - για τον $b = 3$ και τον Κάθετο Δόνηση του δεύτερου ρουλεμάν από το Set Learning Data της τρίτης ομάδας των συνθηκών λειτουργίας.



Εικόνα 43 Τυπική γραφική παράσταση της συμπεριφοράς λειτουργίας F

Υπάρχουν δύο δυνατότητες χειρισμού παραμέτρων οριζόντιας και κάθετης δόνησης:

- Χρησιμοποίηση μιας τιμής Integral και εκτέλεση πάνω από την προτεινόμενη συσσώρευση για την ολοκληρωμένη τιμή της δόνησης - αντί για τη μετρούμενη τιμή των οριζόντιων και κάθετων κραδασμών.
- Χρησιμοποίηση μιας από τις ευρέως γνωστές μεθόδους εκμάθησης μηχανών για την πρόβλεψη RUL (για παράδειγμα, SVR – Support Vector Regression, RVM – Relevance Vector Machines κ.λπ.) για δεδομένα πολλαπλών παραμέτρων - αφού πραγματοποιηθεί μια συσσώρευση ξεχωριστά για τις οριζόντιες και κάθετες Δονήσεις. Οι μέθοδοι εκμάθησης για χρήση του μηχανήματος προϋποθέτουν μεγάλο όγκο δεδομένων εισόδου. Για παράδειγμα, το σύνολο εκπαιδευτικών δεδομένων της Πρόγνωσης Δεδομένων Προγνωστικών PHM-2008 περιελάμβανε 218 διαφορετικές μονάδες [48]. Τα θεωρημένα δεδομένα εκπαίδευσης της Προγνωστικής Πρόκλησης IEEE PHM 2012 περιλαμβάνουν πολύ μικρότερη ποσότητα - μόνο 6 ρουλεμάν από 3 διαφορετικές ομάδες λειτουργικών συνθηκών. Επομένως,

πρέπει να χρησιμοποιηθεί η πρώτη προσέγγιση. Δυστυχώς, δεν είναι γνωστό ποιες δονήσεις (κάθετες ή οριζόντιες) είναι πιο σημαντικές και ποια είναι η φυσική εικόνα της μοναδικής επιρροής των δονήσεων για την Ενσωματική δόνηση. Λόγω περιορισμένου χρόνου για την ανάπτυξη και διερεύνηση του μοντέλου, ελήφθη υπόψη η ακόλουθη λειτουργία για την ολοκληρωμένη δόνηση:

που

- V είναι η Ολοκληρωμένη τιμή της δόνησης
- Οι V_n και V_h είναι οι μετρημένες τιμές των κατακόρυφων και οριζόντιων κραδασμών
- w είναι το σχετικό βάρος της οριζόντιας έντασης των κραδασμών.

Οι βέλτιστες τιμές των τύπων των λειτουργιών F και R και των παραμέτρων ελέγχου a , b , w και l καθορίστηκαν με τη μέθοδο Cross-Validation under Learning Set.

Υπάρχουν δύο δυνατότητες για την αναζήτηση τιμών αυτών των παραμέτρων ελέγχου:

- Καθορισμός κοινών τιμών ταυτόχρονα για όλες τις ομάδες λειτουργικών συνθηκών.
- Καθορισμός ξεχωριστών τιμών ξεχωριστά για ομάδες μεμονωμένων συνθηκών λειτουργίας.

Σε γενικές γραμμές, η δεύτερη προσέγγιση μπορεί να προσφέρει καλύτερη ακρίβεια, αλλά ταυτόχρονα οδηγεί σε υπερβολική τοποθέτηση εξαιτίας της μικρής ποσότητας των ρουλεμάν εκπαίδευσης σε κάθε ομάδα λειτουργικών συνθηκών (δύο ρουλεμάν ανά ομάδα). Για να αποφευχθεί η υπερβολική τοποθέτηση, συνιστάται συνήθως η εισαγωγή πρόσθετης παραμέτρου ελέγχου - Penalty for Regularization Error, όπως γίνεται στις μεθόδους εκμάθησης μηχανών SVR, RVM κλπ. Αλλά μπορεί να βοηθήσει μόνο αν χρησιμοποιηθεί η λειτουργία με υψηλό βαθμό ελευθερίας, ως RBF (Radial Basis Functions), πολυωνύμων μεγάλης διάστασης κλπ. Οι παραπάνω προτεινόμενες λειτουργίες R , F και V έχουν πολύ χαμηλή ποσότητα παραμέτρων ελέγχου και ως εκ τούτου η χρήση του σφάλματος κανονικοποίησης δεν θα μπορούσε να μας βοηθήσει να αποφευχθεί η υπερβολική τοποθέτηση. Έτσι, για να

αποφευχθεί η υπερφόρτωση, η μόνη προσέγγιση που θα μπορούσε να εφαρμοστεί ήταν η πρώτη. Υπολογισμός του ότι για κάθε «k» από τις 3 διαφορετικές ομάδες συνθηκών λειτουργίας υπάρχει μια τέτοια μεμονωμένη τιμή κατωφλίου $Thr(k)$, που για την τιμή D μεγαλύτερη από $Thr(k)$ το ρουλεμάν αποτυγχάνει. Με άλλα λόγια, για ένα μοναδικό ρουλεμάν από την ομάδα λειτουργικών συνθηκών k ο εκτιμώμενος χρόνος αστοχίας t υπολογίζεται ως $\min D(t), s.t. D(t) > Thr(k)$, όπου $Thr(k)$ είναι το όριο συσσωρευμένης Αποικοδόμησης για την ομάδα λειτουργικών συνθηκών k ($k = 1 \dots 3$). Οι βέλτιστες τιμές των κατωφλίων καθορίστηκαν με τη μέθοδο Cross-Validation under Learning Set ξεχωριστά για κάθε ομάδα λειτουργικών συνθηκών.

7.5 Κριτήρια Ακρίβειας

Διάφορες μετρήσεις ακρίβειας εξετάστηκαν στο [56] για την αξιολόγηση της ποιότητας των προγνωστικών (επιλεγμένο μοντέλο πρόβλεψης). Μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- Μετρήσεις, με απόλυτη ακρίβεια.
- Μετρήσεις, με βάση τη σχετική ακρίβεια.

Στην πρόβλεψη δεδομένων πρόγνωσης PHM-2008, η βαθμολογία της ενιαίας πρόβλεψης RUL ορίζεται ως η εκθετική ποινή στο απόλυτο σφάλμα πρόβλεψης και η βαθμολογία ενός αλγορίθμου ορίζεται ως η συνολική βαθμολογία από όλες τις προβλέψεις [12].

Στην προγνωστική πρόκληση IEEE PHM 2012, η βαθμολογία της ενιαίας πρόβλεψης RUL ορίζεται ως η εκθετική ποινή στο σχετικό σφάλμα πρόβλεψης. Η βαθμολογία ακρίβειας για το πείραμα i ορίζεται ως εξής [58]:

$$Score[i] = \begin{cases} \exp(-\ln(0.5)(RelEr[i]/5)), & \text{if } RelEr[i] \leq 0 \\ \exp(\ln(0.5)(RelEr[i])/20), & \text{if } RelEr[i] > 0 \end{cases}$$

όπου $RelEr [i]$ είναι το σχετικό σφάλμα (σε ποσοστά) πρόβλεψης για τον αριθμό δοκιμής i ,

$i = 1 \dots 11$. Η τελική βαθμολογία όλων των εκτιμήσεων του RUL ορίζεται ως ο μέσος όρος της βαθμολογίας όλων των 11 πειραμάτων.

7.6 Εκπαίδευση του προτεινόμενου μοντέλου

Υπάρχουν πολλές εναλλακτικές λύσεις για την εκτέλεση της διασταυρούμενης αξιολόγησης. Η γενική προσέγγιση είναι να χωριστούν τα διαθέσιμα δεδομένα σε δύο ομάδες, μία ως σύνολο εκπαίδευσης και η άλλη ως σύνολο αξιολόγησης - και να επαναληφθεί αυτή η διαδικασία αρκετές φορές. Πραγματικά είναι δυνατή μόνο για πλήρως ανεξάρτητα δεδομένα, όχι για χρονολογικές σειρές. Έτσι λοιπόν, δεν είναι σωστό να χρησιμοποιηθεί το αρχικό τμήμα της ενιαίας χρονοσειράς ως εκπαιδευτικό σετ και το άλλο μέρος ως σύνολο αξιολόγησης, διότι δεν είναι γνωστό το τέλος της ζωής της τρέχουσας μονάδας. Οι τιμές RUL για τα αρχικά σημεία αυτής της χρονοσειράς για την τρέχουσα μονάδα (τα οποία αποτελούν σημεία του σετ εκπαίδευσης).

Έτσι, για κάθε μία από τις ομάδες λειτουργικών συνθηκών χρησιμοποιήθηκε διττή διαβαθμονόμηση, δηλαδή μία ομάδα ενιαίων συνθηκών λειτουργίας θεωρείται ως εκπαίδευση και η άλλη - ως αξιολόγηση, και στη συνέχεια η διαδικασία επαναλήφθηκε με την κατάλληλη ανταλλαγή στοιχείων.

Μια άλλη ερώτηση είναι πώς επιλέγονται τα σημεία ελέγχου για το σύνολο αξιολόγησης. Δεν είναι σωστό να χρησιμοποιούνται οι τελευταίοι μετρημένοι χρόνοι από το σύνολο δεδομένων δοκιμής, ο αριθμός κύκλου χρόνου δεν είναι σημαντική παράμετρος - είναι μάλλον λόγος του αριθμού του κύκλου χρόνου για το πλήρες χρονικό μήκος της σειράς, αλλά το μήκος πλήρους χρονοσειράς δεν είναι γνωστό για Δοκιμή χρόνου σειράς!

Για το σετ αξιολόγησης προτείνεται η κατασκευή τεσσάρων σημείων ελέγχου ως σχετικά τμήματα του πλήρους μήκους σειράς χρόνου, με τις ακόλουθες σχέσεις: 50%, 70%, 85% και 95% του χρόνου ζωής που φέρει το τέλος του κύκλου ζωής. Κατά συνέπεια, το πλήρες σκορ για τη διαδικασία διασταυρούμενης επικύρωσης υπολογίζεται ως

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{p=1}^2 \sum_{m=1}^4 \text{Score}(k, p, m \text{ in condition, that Training Bearing Index} = 3 - p) / 24,$$

Βαθμός (k, p, m στην κατάσταση, ότι Δείκτης Έδρασης Εκπαίδευσης = 3 - p) / 24,

που:

- k είναι ο δείκτης της ομάδας των συνθηκών λειτουργίας
- p είναι ο δείκτης ρουλεμάν στο σύνολο μαθησιακών δεδομένων της k-ου ομάδας λειτουργικών συνθηκών
- m είναι ο δείκτης του σημείου ελέγχου.

Οι τύποι εξομάλυνσης των λειτουργιών F και R και οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων ελέγχου a, b, w και l έχουν επιλεγεί για να μεγιστοποιήσουν τη βαθμολογία Full Score.

7.7 Η μέθοδος cross-entropy

Η επιλογή των τύπων των λειτουργιών εξομάλυνσης F και R πραγματοποιήθηκε μέσω απλής σύγκρισης των πιθανών εναλλακτικών λύσεων. Για να επιλεγούν οι βέλτιστες τιμές των αριθμητικών παραμέτρων a, b, w και l με απλή απαρίθμηση είναι αδύνατη.

Από την άλλη πλευρά, είναι αδύνατη η χρήση ορισμένων μεθόδων, με βάση τον υπολογισμό της κλίσης ή της ψευδο-κλίσης. Σε αυτούς τους αλγορίθμους βελτιστοποίησης οι αρχικές εικασίες για τις παραμέτρους είναι πολύ σημαντικές, αλλά για πολλές πραγματικές εργασίες η λειτουργία στόχου δεν είναι κυρτή και έχει πολλά τοπικά ελάχιστα.

Για την καθολική βελτιστοποίηση πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποια μέθοδος Τυχαίας αναζήτησης - Cross-Entropy Optimization. Η μέθοδος αποκτά το όνομά της από την απόσταση διασταύρωσης-εντροπίας (Kullback-Leibler) - ένα πολύ γνωστό μέτρο της "πληροφορίας", το οποίο εφαρμόστηκε επιτυχώς σε διάφορους τομείς της μηχανικής και της επιστήμης. Αρχικά αναπτύχθηκε η μέθοδος Cross-Entropy για διακριτή βελτιστοποίηση [59], αλλά αργότερα επεκτάθηκε με επιτυχία για συνεχή βελτιστοποίηση [60, 61]. Πρόκειται για μια σχετικά νέα τυχαία προσέγγιση προσανατολισμένη προς την αναζήτηση (σε σύγκριση με τον γενετικό αλγόριθμο, που υλοποιήθηκε ως Toolbox στο Matlab ή τον αλγόριθμο Simulated Annealing Algorithm, αλλά παρείχε πολύ καλά αποτελέσματα για πολλές ανάλογες εργασίες.

7.8 Μελέτη Περίπτωσης

Η προτεινόμενη μέθοδος εκτίμησης RUL δοκιμάζεται χρησιμοποιώντας τα 11 ρουλεμάν από τρεις ομάδες λειτουργικών συνθηκών, που παρέχονται από την πρόγνωση IEEE PHM 2012 Διαγωνισμού προγνωστικών προκλήσεων [46]. Επιτεύχθηκε συνολική βαθμολογία 0,28, η οποία είναι η καλύτερη στον ανταγωνισμό. Λεπτομέρειες για την ακρίβεια της πρόβλεψης RUL είναι τα εξής:

- Στο πλαίσιο των πρώτων συνθηκών λειτουργίας, η πρόβλεψη ακρίβειας του RUL των τριών εδράνων είναι καλή, η πρόβλεψη ακριβείας του RUL που φέρει το ένα είναι μέτρια και η πρόβλεψη RUL του ενός ρουλεμάν είναι λάθος.
- Στο πλαίσιο των δεύτερων συνθηκών λειτουργίας, η πρόβλεψη ακρίβειας RUL των δύο εδράνων είναι καλή, η πρόβλεψη της ακρίβειας του RUL του ενός φέρει μέτρια και οι προβλέψεις RUL των δύο εδράνων είναι λανθασμένες.
- RUL πρόβλεψη του ρουλεμάν από τις τρίτες συνθήκες λειτουργίας ήταν λάθος.

7.9 Συμπεράσματα

Η πρόβλεψη της ωφέλιμης ζωής παραμένει κρίσιμη για την αποτελεσματική συντήρηση βασισμένη στην κατάσταση. Τα τελευταία δέκα χρόνια αναπτύχθηκαν πολλές μέθοδοι πρόβλεψης RUL, αλλά οι περισσότερες από αυτές είναι εφαρμοστέες μόνο για περιοδικά στατιστικά στοιχεία "με τάση" ή "χωρίς τάση". Σε αυτό το άρθρο Remaining Useful Life Estimation for Systems with Non-Trendability Behaviour, των Sergey Porotsky και Zigmund Bluvband στο οποίο βασίστηκε αυτό το κεφάλαιο, περιγράφει την περίπτωση στατιστικών μη αξιοπιστίας με μικρό αριθμό μονάδων στο σύνολο δεδομένων μάθησης, έχει παρουσιαστεί ένα προηγμένο μοντέλο των μεθόδων πρόγνωσης με βάση δεδομένα. Η υποβληθείσα πρόταση βασίζεται στη χρήση της ομαλοποιημένης συσσώρευσης των μετρούμενων παραμέτρων.

Η προτεινόμενη προσέγγιση επικυρώνεται χρησιμοποιώντας τα δεδομένα παρακολούθησης που συλλέγονται στο ιστιτούτο FEMTO-ST. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι το αναπτυγμένο μοντέλο παράγει ικανοποιητικές εκτιμήσεις πρόβλεψης RUL. Προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια, στο μέλλον πρέπει να σχεδιαστούν πιο προσεκτικά οι εξομαλυντικές λειτουργίες για τη συσσώρευση μετρούμενων παραμέτρων, με τη παράλληλη διερεύνηση της γνώσης της φυσικής διεργασίας της αποικοδόμησης των ρουλεμάν. Κατ' αυτό τον τρόπο θα χρησιμοποιούνται υβριδικά μοντέλα αντί των data-driven.

8^ο Κεφάλαιο: Μετρήσεις στο Matlab

Στη μέθοδο 3, περιγράφεται μια μεθοδολογία για την εκτίμηση της υπολειπόμενης ωφέλιμης ζωής (RUL) των ρουλεμάν των δοκιμών με τη μέθοδο ανίχνευσης ανωμαλιών, εξαγωγής υποβαθμισμένης χαρακτηριστικής, και δεικτών χρόνου επιβίωσης.

Τα πειράματα από τα οποία προέρχεται το σύνολο των αποτελεσμάτων περιλαμβάνουν τρεις διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Στη πρώτη συνθήκη επτά ρουλεμάν περιστρέφονται στις 1800 σ.α.λ. με 4000 Newton ακτινικό φορτίο. Εδόθησαν πλήρη αποτελέσματα με χρήση algorithm training για δυο ρουλεμάν που οδηγήθηκαν στην πλήρη καταστροφή ("run-to-failure") και επίσης εδόθησαν μη-συνεχόμενα αποτελέσματα για άλλα πέντε ρουλεμάν με τη χρήση algorithm testing. Στη δεύτερη συνθήκη επτά ρουλεμάν περιστρέφονται στις 1650 σ.α.λ. με ακτινικό φορτίο 4200 Newton. Από τα επτά ρουλεμάν, μόνο για δυο ρουλεμάν, εδόθησαν ολοκληρωμένα αποτελέσματα (data for training) που αφορούσαν σε πλήρη καταστροφή τους, και για πέντε ρουλεμάν εδόθησαν αποτελέσματα για έλεγχο (data for testing). Στην τρίτη συνθήκη, τρία ρουλεμάν περιστρέφονται στις 1500 σ.α.λ. με 5000 Newton ακτινικό φορτίο. Αποτελέσματα (data for training) εδόθησαν για δυο ρουλεμάν και για ένα μόνο ρουλεμάν εδόθησαν αποτελέσματα για έλεγχο (data for testing).

Δύο επιταχυνσιόμετρα τοποθετήθηκαν στο περίβλημα του εδράνου του ρουλεμάν με σκοπό τη μέτρηση των κραδασμών στις κάθετες και οριζόντιες κατευθύνσεις. Η δειγματοληψία δεδομένων διεξήχθη σε διαστήματα 10 δευτερολέπτων, με 25.6 kHz ρυθμό δειγματοληψίας και διάρκεια 0.1 s. Ως εκ τούτου, κάθε παρατήρηση περιελάμβανε 2560 σημεία.

Το προγνωστικό χαρακτηριστικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρακολούθηση της υποβάθμισης (φθοράς), ορίστηκε, ως ο μέσος όρος των πέντε υψηλότερων απόλυτων τιμών οριζοντίων επιταχύνσεων, που μετρήθηκε σε κάθε παρατήρηση. Χρησιμοποιήθηκε ομαλοποίηση μέσης τιμής για τη μείωση του θορύβου. Τα υψηλότερα πέντε σημεία επιλέχθηκαν από τα 2560 σημεία της οριζόντιας επιτάχυνσης. Η εξίσωση που ορίζει τα χαρακτηριστικά είναι η εξής:

$$f = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 acc_i$$

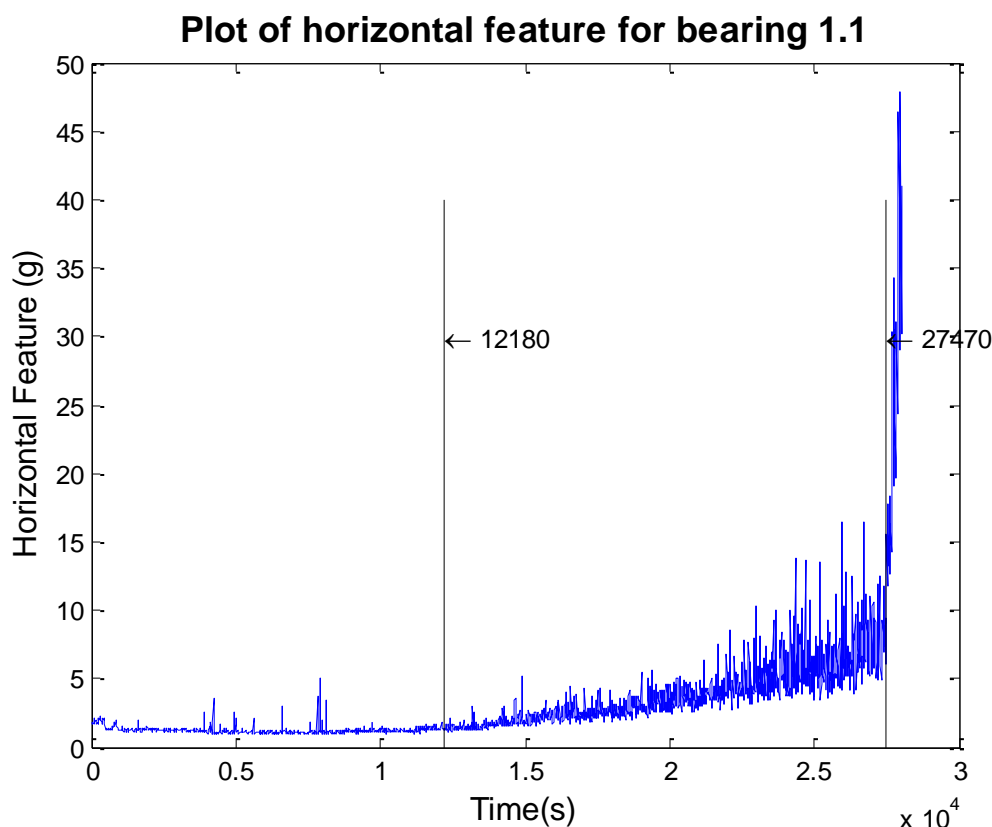
Όπου acc είναι η επιτάχυνση και i είναι ο δείκτης του σημείου δεδομένων (data point) αφού ταξινομηθούν σε φθίνουσα σειρά σύμφωνα με την τιμή επιτάχυνσης. Έχοντας τα παραπάνω δεδομένα και συνθήκες, γράφουμε κώδικα στο Matlab, ο οποίος θα δημιουργεί τη γραφική παράσταση της οριζόντιας επιτάχυνσης συναρτήσεως του χρόνου. Συγκεκριμένα, θα διαβάζονται τα δεδομένα κάθε παρατήρησης από αρχεία csv, από τα οποία θα εξαχεται η τιμή της επιτάχυνσης, μέσω της παραπάνω εξίσωσης και οι τιμές αυτές θα δοθούν σε μια γραφική παράσταση σε συνάρτηση με το χρόνο σε second. Στη συνέχεια δίνεται ο κώδικας για το ρουλεμάν:

```
F1 = textread('C:\Users\Γιωργος\Downloads\Bearing1_1\list.txt','%s');
F2 = char(F1);
dir = 'C:\Users\Γιωργος\Downloads\Bearing1_1\';
y=size(F2);
for i=1:y(1)
    Fname=strcat(dir,F2(i,:));
    M = csvread(Fname(:));
    Acc=abs(M(:,5));
    Acc=sort(Acc,'descend');
    sum=0;
    for j=1:5;
        sum=sum+Acc(j);
    end
    avg=sum/5;
    Hor(i)=avg;
    T(i)=i*10;
end
plot(T(1:y(1)),Hor(1:y(1)),'-')
title('Plot of horizontal feature for bearing
1.1','FontSize',14,'FontWeight','bold')
xlabel('Time(s)','FontSize',12)
ylabel('Horizontal Feature (g)','FontSize',12)
line([12180 12180],[0 40],'Color','k')
line([27470 27470],[0 40],'Color','k')
text(12180,30,'\leftarrow 12180')
text(27470,30,'\leftarrow 27470')
figure
f=fit(T(1218:2747)'.',Hor(1218:2747)'.','expl');
plot(f,T(1218:2747)'.',Hor(1218:2747)'.','-')
title('Plot of horizontal feature for bearing 1.1 from the time of
anomaly to the end of the first degradation
mode','FontSize',14,'FontWeight','bold')
xlabel('Time(s)','FontSize',12)
ylabel('Horizontal Feature (g)','FontSize',12)
legend('off')
```

Για το ρουλεμάν Bearing1_1, τα δεδομένα κάθε παρατήρησης είναι αποθηκευμένα σε csv αρχεία τα οποία τα αποθηκεύουμε σε ένα φάκελο με το όνομα του ρουλεμάν. Στο φάκελο αυτό, υπάρχει, επιπλέον, ένα αρχείο list.txt που περιέχει τα ονόματα των csv αρχείων που θέλουμε να διαβάσουμε. Η ανάγνωση των ονομάτων αυτών πραγματοποιείται με την εντολή textread, με την οποία διαβάζεται το περιεχόμενο του αρχείου list και αποθηκεύεται στη μεταβλητή F1. Επειδή, η F1 είναι σε μορφή cells, με την εντολή char(F1) δημιουργούμε έναν πίνακα χαρακτήρων F2. Η μετατροπή γίνεται, έτσι ώστε στη συνέχεια να μπορούμε να κάνουμε τις πράξεις με string που θέλουμε για να διαβάσουμε τα αρχεία csv. Ορίζουμε ένα string με όνομα dir, το οποίο έχει ως τιμή τη διεύθυνση που βρίσκονται τα αρχεία csv. Στη συνέχεια, βρίσκουμε τις διαστάσεις του πίνακα F2 με την $\gamma = \text{size}(F2)$. Μας ενδιαφέρει η $\gamma(1)$, οι σειρές δηλαδή του πίνακα, αφού τα περιεχόμενα κάθε σειράς είναι οι χαρακτήρες του κάθε ονόματος. Στη συνέχεια, εκτελούμε μια for, από 1 ως $\gamma(1)$, όσα δηλαδή τα αρχεία που θα διαβάσουμε. Η εντολή strcat κάνει πρόσθεση δύο string. Με την $Fname = \text{strcat}(dir, F2(i,:))$ προσθέτουμε το string dir που έχει τη διεύθυνση των αρχείων με το όνομα του αρχείου i. Σημειώνεται, ότι για να λάβουμε το όνομα του αρχείου i, από τον πίνακα F2, γράφουμε $F2(i,:)$, με το οποίο λαμβάνουμε στην ουσία, όλους τους χαρακτήρες της σειράς i. Πλέον, έχοντας το πλήρες path για κάθε αρχείο i, στη μεταβλητή Fname, διαβάζουμε το αντίστοιχο csv αρχείο με την εντολή $M = \text{csvread}(Fname(:))$. Ξανά, με το $Fname(:)$ διαβάζονται όλα τα στοιχεία του Fname. Έχουμε δημιουργήσει, λοιπόν, έναν πίνακα M. Η αλλαγή σειράς σε κάθε csv αρχείο, που αντιστοιχεί σε επόμενη μέτρηση κάθε παρατήρησης, ταυτίζεται με την αλλαγή σειράς στον πίνακα M, ενώ το κόμμα μετά από κάθε τιμή σε μια σειρά, ταυτίζεται με την αλλαγή στήλης. Ο πίνακας λοιπόν M είναι πίνακας 2560x6, αφού έχουμε 2560 σημεία για κάθε παρατήρηση με 6 μετρούμενα μεγέθη. Η εντολή $Acc = \text{abs}(M(:,5))$ δημιουργεί έναν πίνακα Acc, που περιέχει τις απόλυτες τιμές όλων των στοιχείων της στήλης 5, δηλαδή τις τιμές της οριζόντιας επιτάχυνσης. Με το $Acc = \text{sort}(Acc, 'descend')$ ο πίνακας Acc ταξινομείται με φθίνουσα σειρά. Πρέπει να σημειωθεί, ότι η χρήση της sort, χωρίς δεύτερο όρισμα, κάνει ταξινόμηση σε αύξουσα σειρά. Δημιουργούμε μια μεταβλητή sum ίση με το 0 αρχικά, στην οποία θα αθροίσουμε τις 5 πρώτες τιμές, επομένως και μεγαλύτερες, της οριζόντιας επιτάχυνσης, με σκοπό να βρούμε το μέσο όρο. Στη συνέχεια, για j από 1 ως 5, προσθέτουμε την τιμή του στοιχείου του Acc στη θέση j, στο άθροισμα sum. Μετά την τελευταία for, διαιρούμε το sum με το 5, και έχουμε στη μεταβλητή avg το μέσο όρο των 5 μεγαλύτερων τιμών της οριζόντιας επιτάχυνσης για την παρατήρηση i. Η μέση τιμή αυτή, αποθηκεύεται στη θέση i ενός πίνακα Hor. Επιπλέον, σε έναν πίνακα T, αποθηκεύουμε την τιμή $10*i$. Αυτό γίνεται γιατί η δειγματοληψία πραγματοποιείται σε διαστήματα 10s, άρα ο χρόνος θα είναι 10πλάσιος του αριθμού των παρατηρήσεων. Οι τιμές του πίνακα T, με άλλα λόγια, είναι χρονικές στιγμές. Μόλις τελειώσει η αρχική for, έχουμε τους πίνακες Hor και T με τιμές για όλες τις παρατηρήσεις. Επόμενο βήμα είναι να δημιουργήσουμε τη γραφική παράσταση. Αυτό επιτεύχθηκε με την εντολή $\text{plot}(T(1:\gamma(1)), Hor(1:\gamma(1)), '-')$, η οποία δημιουργεί μια γραφική παράσταση των τιμών του Hor συναρτήσεως των αντίστοιχων τιμών του T, με το όρισμα '-', να χρησιμεύει ώστε να είναι συνεχής. Με τις εντολές title, xlabel και ylabel δίνεται τίτλος στη γραφική παράσταση, στον άξονα x και στον

άξονα γ αντίστοιχα, ενώ με τα κατάλληλα επιπλέον ορίσματα, καθορίζονται χαρακτηριστικά της γραμματοσειράς κάθε τίτλου.

Με τις εντολές `line` δημιουργούμε γραμμές στα σημεία που ξεκίνησαν οι περιοχές ανωμαλιών. Σύμφωνα τη δημοσίευση που μελετήθηκε, οι πρώτη περιοχή ανιχνεύθηκε στην παρατήρηση 1218, επομένως σε χρόνο 12180s, και η δεύτερη στην παρατήρηση 2747, άρα στη χρονική στιγμή 27470s. Οι εντολές `text`, προσθέτουν ένα κείμενο με την τιμή της χρονικής στιγμής. Η γραφική παράσταση που δημιουργήθηκε, με τα σημεία των περιοχών ανωμαλιών, για το ρουλεμάν 1_1 φαίνεται στο επόμενο σχήμα.

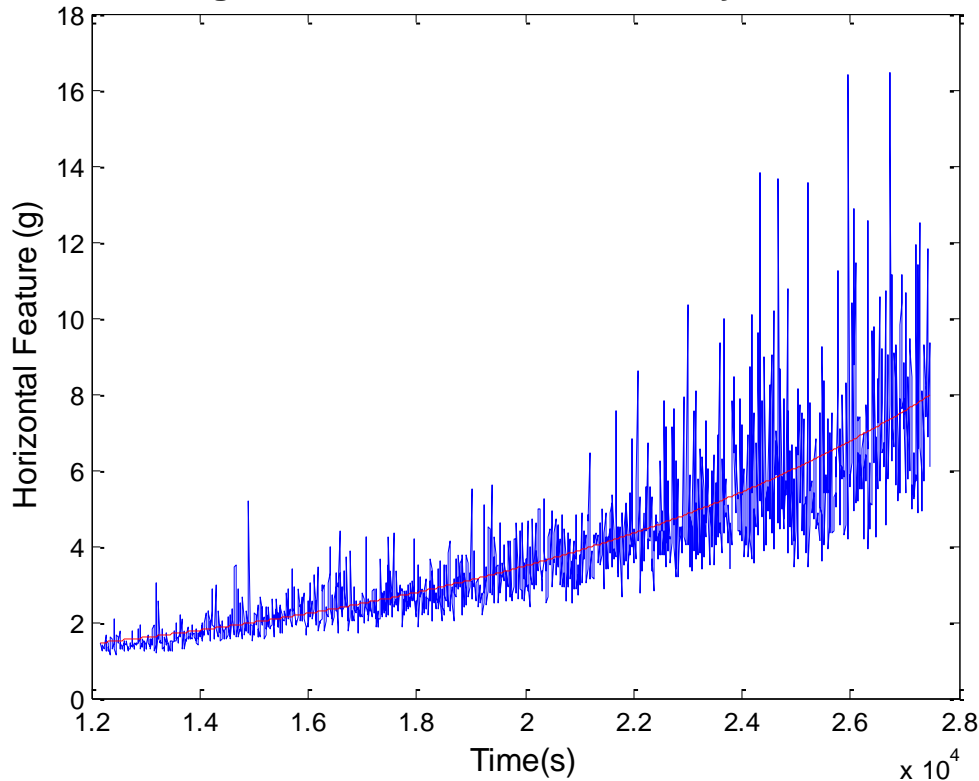


Σχήμα 1. Γραφική παράσταση της τιμής της οριζόντιας επιτάχυνσης για το ρουλεμάν 1_1 συναρτήσει του χρόνου

Για το χρονικό διάστημα της πρώτης ανωμαλίας, εξάγουμε μια προσαρμοσμένη εκθετική χαρακτηριστική καμπύλη. Αρχικά, ανοίγουμε νέο παράθυρο για γραφική παράσταση με την εντολή `figure`. Η δημιουργία της καμπύλης γίνεται, αρχικά με την εντολή `f=fit(T(1218:2747).',Hor(1218:2747).','exp1')`, η οποία δημιουργεί μια προσαρμοσμένη καμπύλη των δύο πρώτων δεδομένων, μορφής που δίνεται από το τελευταίο όρισμα. Εδώ, τα δύο πρώτα δεδομένα είναι τα στοιχεία των πινάκων `T` και `Hor` και με όρισμα `'exp1'` η καμπύλη θα είναι εκθετικής μορφής. Πρέπει να επισημάνουμε ότι οι πίνακες `T` και `Hor` είναι `1x2802` και για να μπορεί η `fit` να τους επεξεργαστεί πρέπει να δοθούν σε μορφή `2802x1`. Για το λόγο αυτό γράφουμε `T(1218:2747).'` και `Hor(1218:2747).'`, με το `.'` να αντιμετωπίζει σειρές και στήλες. Η εντολή `plot(f,T(1218:2747).',Hor(1218:2747).','-')` εμφανίζει μια συνεχή γραφική παράσταση των σημείων της πρώτης ανωμαλίας συναρτήσει του αντίστοιχου χρόνου, μαζί με τη χαρακτηριστική `f` που

δημιουργήθηκε πριν. Τέλος, με τις αντίστοιχες εντολές δίνουμε όνομα στη γραφική παράσταση και τους άξονες όπως και πριν. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο επόμενο σχήμα.

ature for bearing 1.1 from the time of anomaly to the end of the fi



Σχήμα 2. Γραφική παράσταση της οριζόντιας επιτάχυνσης από τη στιγμή έναρξης της πρώτης περιοχής ανωμαλιών μέχρι την αρχή της δεύτερης αστοχίας, μαζί με την προσαρμοσμένη εκθετική χαρακτηριστική

Ο χρόνος για το ρουλεμάν 1_1, μεταξύ της αρχής της πρώτης ανώμαλης περιοχής ήταν 15290s. Δεδομένου έγιναν 2803 παρατηρήσεις, ο χρόνος για να αστοχήσει το ρουλεμάν, μετά την είσοδο στη δεύτερη ανώμαλη περιοχή ήταν 560s. Ο χρόνος διάρκειας της δεύτερης ανωμαλίας διαιρείται με το χρόνο διάρκειας της πρώτης ανωμαλίας και μας δίνει τον λόγο διάρκειας ανωμαλίας:

$$AnomalyRatio = \frac{560}{15290} = 0.0366, \text{ για το ρουλεμάν 1_1}$$

Αυτός ο λόγος θα εφαρμοστεί στο ρουλεμάν 2_2 για την εξαγωγή του σφάλματος.

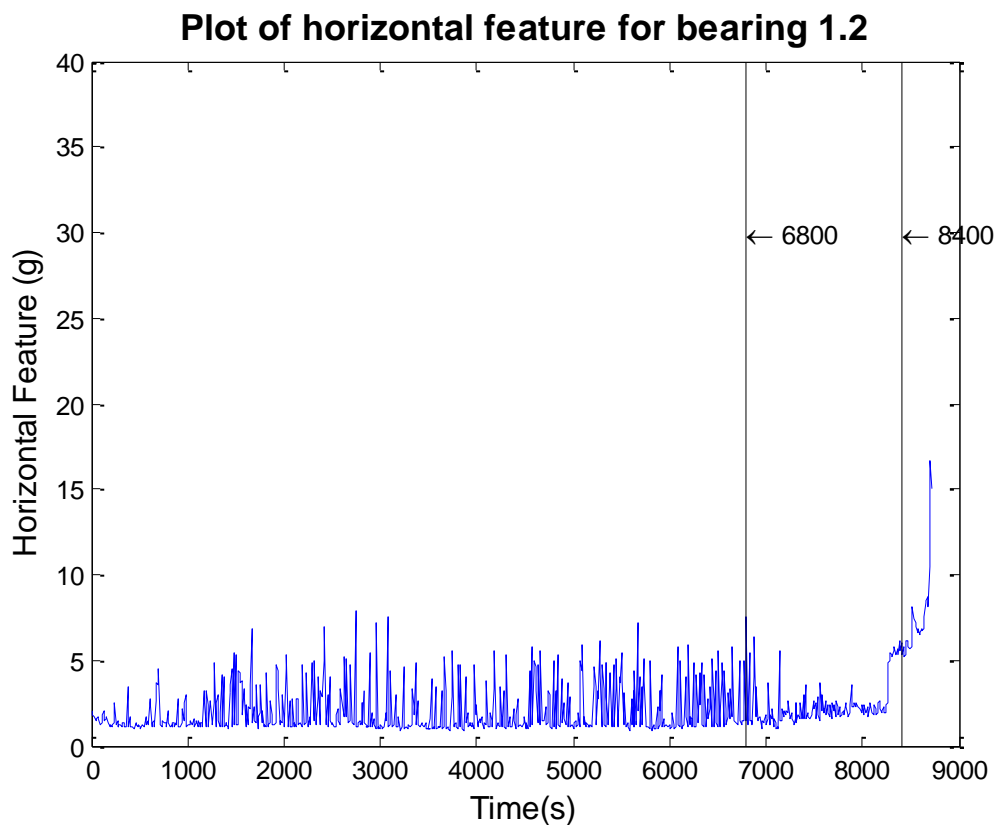
Σε κάθε φάκελο με τα αρχεία csv κάθε ρουλεμάν δημιουργήθηκε ένα αρχείο list.txt με τα ονόματα που θέλουμε να διαβάσουμε. Το τμήμα του κώδικα που φαίνεται παρακάτω υλοποιήθηκε για τα υπόλοιπα ρουλεμάν, ώστε να προκύψουν οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της οριζόντιας επιτάχυνσης. Το μόνο που θα αλλάζει κάθε φορά είναι το όνομα που θα διαβάζει η textread, το όνομα της διεύθυνσης που θα έχει η dir και φυσικά ο τίτλος της γραφικής παράστασης μέσα στο title.

```

F1 = textread('C:\Users\Γιωργος\Downloads\Bearing1_1\list.txt','%s');
F2 = char(F1);
dir = 'C:\Users\Γιωργος\Downloads\Bearing1_1\';
y=size(F2);
for i=1:y(1)
    Fname=strcat(dir,F2(i,:));
    M = csvread(Fname(:));
    Acc=abs(M(:,5));
    Acc=sort(Acc,'descend');
    sum=0;
    for j=1:5;
        sum=sum+Acc(j);
    end
    avg=sum/5;
    Hor(i)=avg;
    T(i)=i*10;
end
plot(T(1:y(1)),Hor(1:y(1)),'-')
title('Plot of horizontal feature for bearing
1.1','FontSize',14,'FontWeight','bold')
xlabel('Time(s)','FontSize',12)
ylabel('Horizontal Feature (g)','FontSize',12)

```

Οι γραφική παράσταση για το ρουλεμάν 1_2 φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3. Γραφική παράσταση της τιμής της οριζόντιας επιτάχυνσης για το ρουλεμάν 1_2 συναρτήσει του χρόνου

Παρατηρούμε ότι το ρουλεμάν μπαίνει στην πρώτη ανώμαλη περιοχή τη χρονική στιγμή 6800s, ενώ η δεύτερη ανώμαλη περιοχή ξεκινάει τη χρονική στιγμή

8400s. Η διάρκεια της πρώτης ανωμαλίας είναι, επομένως, 1600s, ενώ της δεύτερης εφόσον έχουμε 871 παρατηρήσεις είναι ίση με 310s. Ο χρόνος από της αρχή της πρώτης ανωμαλίας μέχρι τη αστοχία είναι ίσος με

$$Time = 1600 + 310 = 1910s$$

Πάμε να υπολογίσουμε τον εκτιμώμενο χρόνο αστοχίας. Όταν το ρουλεμάν 1_2 μπαίνει στην πρώτη ανώμαλη περιοχή η τιμή της οριζόντιας επιτάχυνσης είναι 7,52. Εξάγοντας την προσαρμοσμένη εκθετική χαρακτηριστική, βρίσκουμε σε ποιο σημείο έχουμε τιμή ίση με $5,47 * 7,52 = 41,13$, με το 5,47 να λαμβάνεται από το λόγο της τιμής οριζόντιας επιτάχυνσης του ρουλεμάν 1_1 στο τέλος της πρώτης ανωμαλίας, προς την τιμή της στην αρχή της ανωμαλίας. Από αυτό προκύπτει ότι χρονική στιγμή που θα έφτανε το ρουλεμάν 1_2 την τιμή 41,13 είναι 12947s. Η διάρκεια της πρώτης ανωμαλίας εκτιμάται

$$Ano1 = 12947 - 6800 = 6147s$$

Η διάρκεια της δεύτερης ανωμαλίας εκτιμάται

$$Ano2 = 0.0366 * 12947 = 473s$$

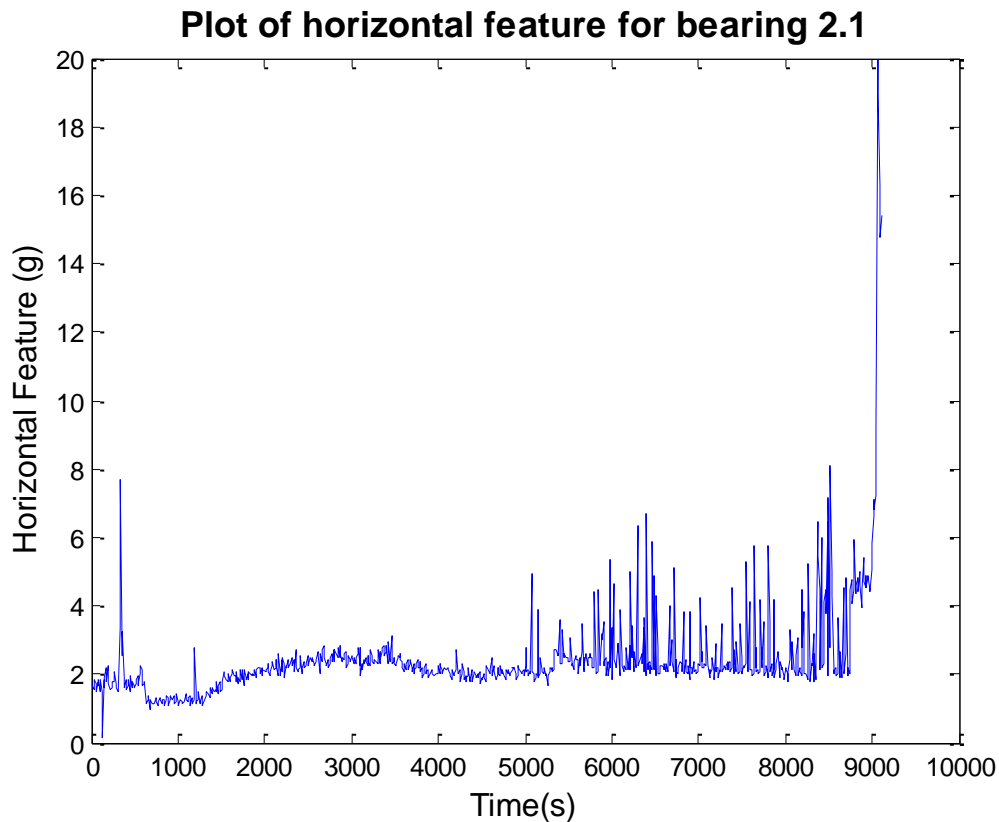
Η ολική διάρκεια λοιπόν εκτιμάται

$$Ano = Ano1 + Ano2 = 473 + 6147 = 6620s$$

Η διαφορά σε σχέση με τον πραγματικό χρόνο είναι

$$\Delta\tau = 6220 - 1910 = 4710s$$

Προκύπτει λοιπόν ένα σφάλμα της τάξης του 246% της πραγματικής τιμής. Με άλλα λόγια το ρουλεμάν 1_2, λόγω της μεγάλης τιμής κατά την είσοδο στην πρώτη περιοχή ανωμαλίας, και της ιδιαίτερης συμπεριφοράς του στη συνέχεια, έχει αρκετή απόκλιση από την εκτιμώμενη τιμή.



Σχήμα 4. Γραφική παράσταση της τιμής της οριζόντιας επιτάχυνσης για το ρουλεμάν 2_1 συναρτήσει του χρόνου

Για το ρουλεμάν 2_1, θα υπολογίσουμε την εκτιμώμενη ζωή με βάση το ρουλεμάν 2_2 του οποίου οι περιοχές ανωμαλίας είναι γνωστές. Σύμφωνα με το rarer, το ρουλεμάν 2_2 η ανωμαλία 1 διήρκεσε από τις παρατηρήσεις #181 έως #415, δηλαδή 2340s. Η περιοχή για την ανωμαλία 2 διήρκεσε από παρατηρήσεις #416 έως #752, δηλαδή 3360s. Τέλος, μια τρίτη ανωμαλία διήρκεσε από τις παρατηρήσεις #753 έως την αστοχία του ρουλεμάν, δηλαδή 440 δευτερόλεπτα. Από τα παραπάνω προκύπτει πως

$$A_{no2} = 1.434 * A_{no1}$$

$$A_{no3} = 0.187 * A_{no1}$$

Στο ρουλεμάν 2_1, διακρίνουμε 3 περιοχές ανωμαλίας. Η πρώτη διαρκεί από 500 ως 5500s, η δεύτερη από 5500 έως 8500s και η τρίτη από τα 8500s ως την αστοχία. Όπως και πριν πρέπει να υπολογίσουμε το λόγο της τιμής οριζόντιας επιτάχυνσης του ρουλεμάν 2_2 στις οριακές τιμές της πρώτης ανωμαλίας ώστε να συνεχίσουμε την εκτίμηση για το 2_1. Το ρουλεμάν 2_2 τη στιγμή της αρχής της πρώτης ανωμαλίας έχει οριζόντια επιτάχυνση με τιμή 1.14, ενώ στο τέλος της πρώτης ανωμαλίας με τιμή 2.31. Ο λόγος λοιπόν είναι ίσος με 2,02. Στη συνέχεια, βρίσκουμε την προσαρμοσμένη χαρακτηριστική εκθετική του ρουλεμάν 2_1 για την πρώτη ανώμαλη περιοχή. Η τιμή της οριζόντιας επιτάχυνσης του ρουλεμάν 2_1 στην

αρχή της ανωμαλίας αυτής ήταν 1.62. Βρίσκουμε το σημείο, στο οποίο η οριζόντια επιτάχυνση θα πάρει την τιμή $2.02 \cdot 1.62 = 3.27$. Το σημείο αυτό είναι η χρονική στιγμή 9328. Από την τιμή αυτή, η πρώτη ανωμαλία εκτιμάται

$$A_{no1} = 9328 - 500 = 8828s$$

Η διάρκεια της δεύτερης ανωμαλίας εκτιμάται

$$A_{no2} = 1.434 \cdot 8828 = 12659s$$

Τέλος, η διάρκεια της τρίτης ανωμαλίας εκτιμάται

$$A_{no3} = 0,187 \cdot 8828 = 1650s$$

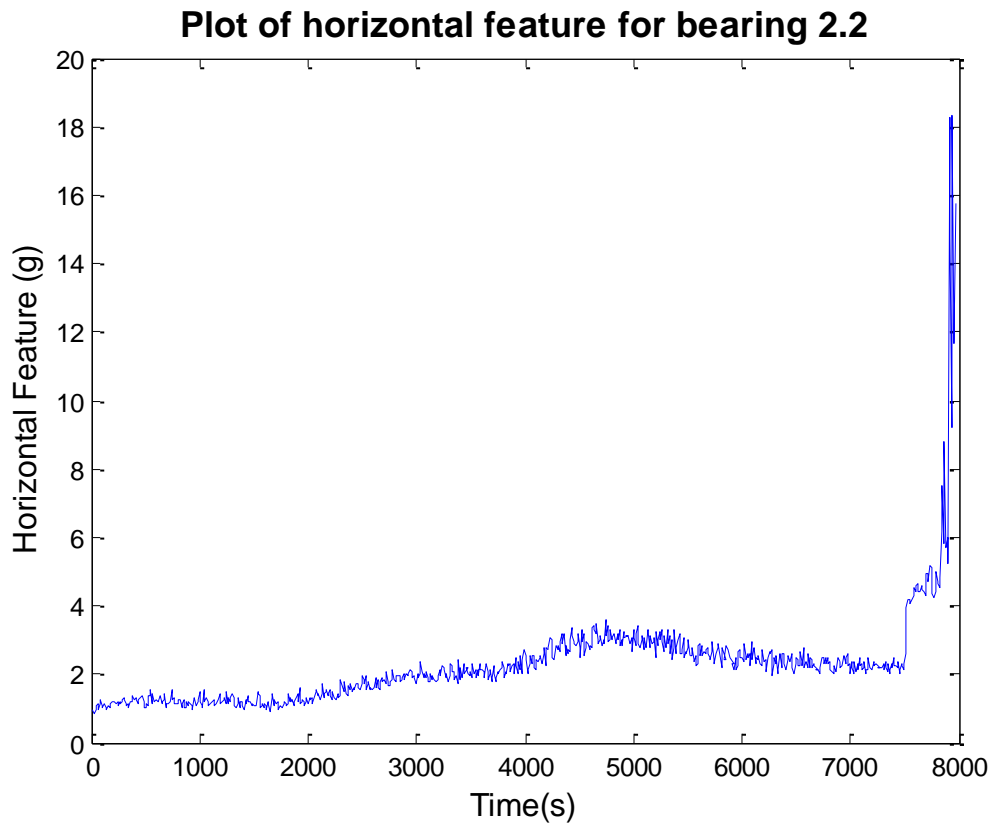
Η ολική διάρκεια λοιπόν εκτιμάται

$$A_{no} = A_{no1} + A_{no2} + A_{no3} = 8828 + 12659 + 1650 = 23137s$$

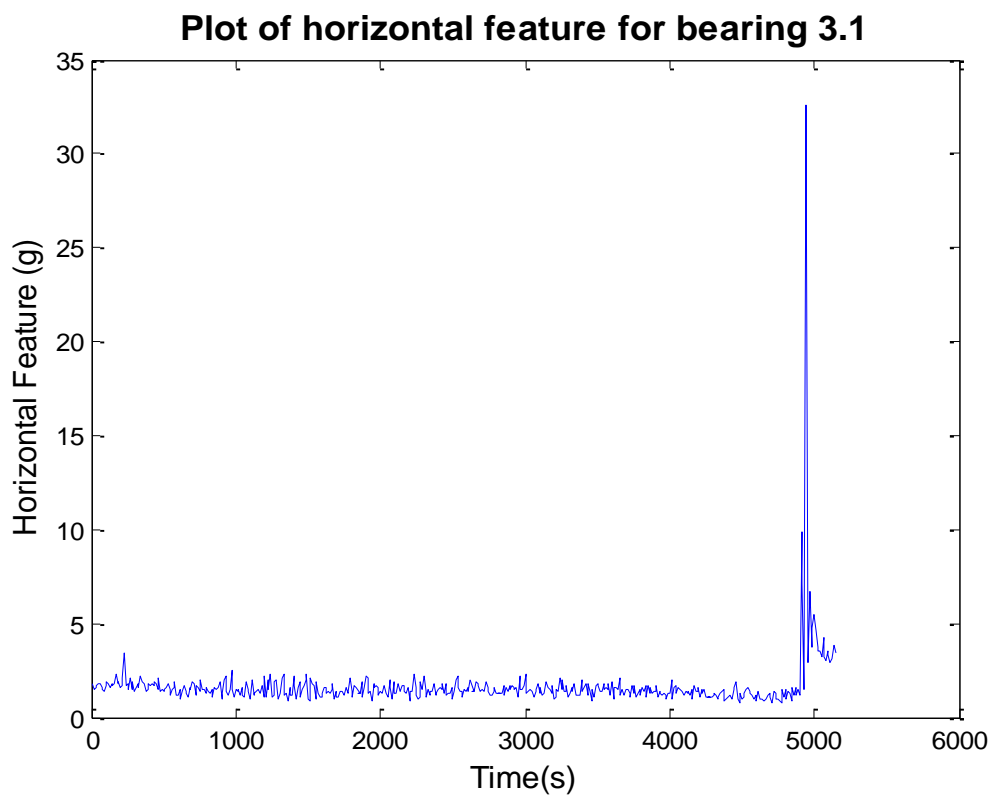
Ο πραγματικός χρόνος από την πρώτη ανωμαλία ως την αστοχία είναι 8160s. Η διαφορά σε σχέση με τον πραγματικό χρόνο είναι

$$\Delta\tau = 23197 - 8160 = 14527s$$

Από αυτό προκύπτει ένα σφάλμα 178% σε σχέση με τον πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 5. Γραφική παράσταση της τιμής της οριζόντιας επιτάχυνσης για το ρουλεμάν 2_2 συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 6. Γραφική παράσταση της τιμής της οριζόντιας επιτάχυνσης για το ρουλεμάν 3_1 συναρτήσει του χρόνου

Η χαρακτηριστική του ρουλεμάν 3_1 που φαίνεται στο σχήμα 6 μοιάζει με αυτή του ρουλεμάν 1_1. Το συγκεκριμένο ρουλεμάν όμως καταστρέφεται πολύ γρήγορα, με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να βρούμε τους χρόνους. Για το λόγο αυτό, στο ρουλεμάν 3_2, του οποίου η χαρακτηριστική φαίνεται στο σχήμα 7 και μοιάζει με του 1_1, θα χρησιμοποιήσουμε τα δεδομένα του ρουλεμάν 1_1.

Στο ρουλεμάν 3_2 διακρίνουμε δύο περιοχές ανωμαλίας. Η πρώτη διαρκεί από τη χρονική στιγμή 11500s ως τη χρονική στιγμή 14800s, ενώ από 14800s ως την αστοχία έχουμε τη δεύτερη ανωμαλία. Τη χρονική στιγμή 11500s, η οριζόντια επιτάχυνση του ρουλεμάν 3_2 έχει τιμή ίση με 1.33. Εξάγοντας την προσαρμοσμένη εκθετική χαρακτηριστική για την περιοχή πρώτης ανωμαλίας βρίσκουμε τη χρονική στιγμή που εκτιμάται να έχει την τιμή $5.47 \cdot 1.33 = 7,28$. Η χρονική αυτή στιγμή είναι τα 25037s. Από αυτό εκτιμάται η διάρκεια της πρώτης ανωμαλίας

$$A_{no1} = 25037 - 11500 = 13537s$$

Η διάρκεια της δεύτερης ανωμαλίας εκτιμάται

$$A_{no2} = 0,0366 \cdot 13537 = 495s$$

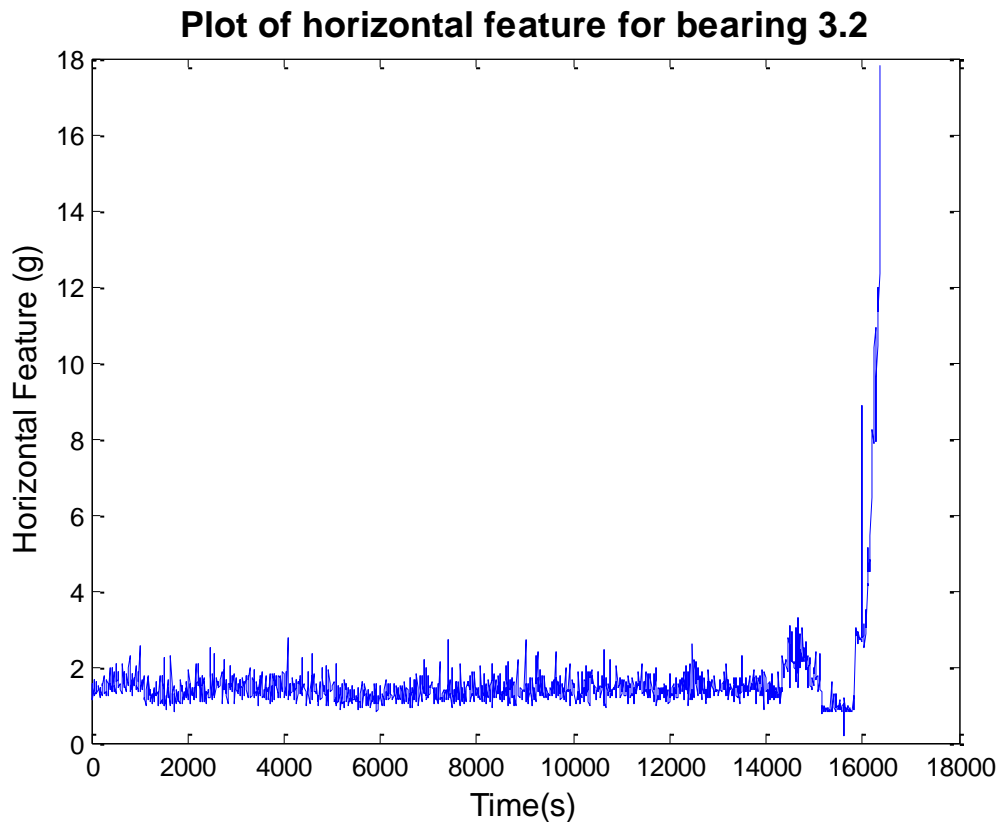
Η ολική διάρκεια λοιπόν εκτιμάται

$$A_{no} = A_{no1} + A_{no2} = 13537 + 495 = 14032s$$

Ο πραγματικός χρόνος από την πρώτη ανωμαλία ως την αστοχία είναι 4870s. Η διαφορά σε σχέση με τον πραγματικό χρόνο είναι

$$\Delta\tau = 14032 - 4870 = 9162s$$

Από αυτό προκύπτει ένα σφάλμα 188% σε σχέση με τον πραγματικό χρόνο, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι το ρουλεμάν εν τέλει φτάνει πολύ πιο γρήγορα στην δεύτερη περιοχή ανωμαλίας.



Σχήμα 7. Γραφική παράσταση της τιμής της οριζόντιας επιτάχυνσης για το ρουλεμάν 3_2 συναρτήσει του χρόνου

Συμπεράσματα

Σχετικά δύσκολο σημείο είναι ο υπολογισμός της θεωρητικής διάρκειας της πρώτης ανωμαλίας. Αυτό οφείλεται στο ότι εκτός από την εξαγωγή της χαρακτηριστικής καμπύλης για την πραγματική περιοχή ανωμαλίας, πρέπει να βρεθεί το σημείο στο οποίο η επιτάχυνση εκτιμάται ότι θα φτάσει την θεωρητική τιμή για είσοδο στη δεύτερη περιοχή. Η τιμή αυτή μπορεί πολλές φορές να επιτυγχάνεται σε σημείο εκτός της περιοχής της πραγματικής ανωμαλίας, όπου μπορούμε εύκολα να βρούμε τη χρονική στιγμή από το διάγραμμα στο Matlab. Έτσι, έπρεπε από το μαθηματικό τύπο της προσαρμοσμένης χαρακτηριστικής, ο οποίος αποθηκεύεται στο Matlab, να λύσουμε ως προς την επιθυμητή τιμή επιτάχυνσης και να βρούμε το σημείο αυτό, όπως και πραγματοποιήσαμε στην εργασία.

9^ο Κεφάλαιο: Επίλογος-Συμπεράσματα

Αυτή η εργασία έχει ανασκοπήσει στους διάφορους τύπους ρουλεμάν, καθώς και στα μοντέλα αυτών, στις διαφορές τους αλλά και γενικά που μπορούν να εφαρμοστούν.

Ένα σημαντικό κομμάτι γνώσης που απεκομίσθει είναι αυτό των γνώσεων για τις βλάβες των στοιχείων μηχανών στο κομμάτι της χαρτοποιίας αλλά και του γεωργικού μηχανολογικού εξοπλισμού. Αυτή η εξοικείωση με τις τεχνικές των μετρήσεων είναι μια συνιστώσα που δίνει προοπτικές ενασχόλησης με τον κλάδο αυτό και στο μέλλον.

Επίσης, παρουσιάστηκαν μέθοδοι για την εκτίμηση της εναπομένουσας ωφέλιμης ζωής του ρουλεμάν. Ο περιορισμένος αριθμός των δεδομένων (training data) δημιούργησε μεγάλη αβεβαιότητα στα αποτελέσματα και των μεθόδων, αλλά η τρίτη μέθοδος βρέθηκε ότι είναι η περισσότερο ακριβής μεταξύ των τριών, γεγονός που οδήγησε στην ομάδα μας να κερδίσει το 2012 data challenge competition. Ελήφθησαν συντηρητικά μέτρα στην διαδικασία εκτίμησης για να ευνοηθεί μια πρόωρη πρόβλεψη.

Επιπλέον, η εργασία έχει ανασκοπήσει σε σύντομο χρονικό διάστημα στην κατάσταση της τεχνικής παρακολούθησης της πρόγνωσης των εδράνων. Έχει δοθεί έμφαση σε διάφορες μεθόδους πρόγνωσης που χρησιμοποιούνται για έδρανα. Παρόλο που έχει γίνει μεγάλη εργασία στον τομέα της διάγνωσης σφάλματος ρουλεμάν, πρέπει να διερευνηθεί η περιοχή των προγνωστικών ρουλεμάν για να εκτιμηθεί σωστά η Εναπομένουσα Χρήσιμη Ζωή (EXZ) του εδράνου. Απαιτείται περαιτέρω ανάπτυξη ιδιαίτερα για δύσκολες περιπτώσεις περιστρεφόμενων μηχανημάτων σε πρακτικές εφαρμογές, όπου μπορεί να αναμένεται αριθμός τρόπων αστοχίας λόγω διαφορετικών συνθηκών φόρτωσης και λειτουργίας. Η ακριβής πρόγνωση ρουλεμάν απαιτεί σήματα από διάφορους αισθητήρες που είναι δαπανηροί και δύσκολο να εγκατασταθούν σε ήδη εγκατεστημένες βιομηχανικές μηχανές. Επίσης, ο αριθμός των μεθοδολογιών που συζητήθηκαν παραπάνω

χρειάζεται περαιτέρω μελέτη, προκειμένου να εξακριβωθεί η εφαρμογή τους σε βιομηχανικά προβλήματα με ποικίλες πειραματικές συνθήκες.

Τα κενά που βρέθηκαν στην περιοχή της πρόγνωση των εδράνων είναι τα εξής:

1. Τα σήματα που λαμβάνονται από βιομηχανικά μηχανήματα είναι συχνά πολύπλοκα, μη στάσιμα και θορυβώδη. Αυτά τα σήματα απαιτούν μεγάλο αριθμό αισθητήρων. Η βέλτιστη ποσότητα και θέση των αισθητήρων αυτών πρέπει να εντοπιστεί επειδή οι βλάβες των αισθητήρων και οι θέσεις τους μπορούν επίσης να μειώσουν την αξιοπιστία του συστήματος πρόγνωσης.
2. Πρέπει να μελετηθεί και να διαμορφωθεί μια μεγαλύτερη ποικιλία σφαλμάτων για ακριβή πρόγνωση ρουλεμάν, δεδομένου ότι η ακρίβειά του υπόκειται σε στοχαστικές διαδικασίες που δεν έχουν ακόμη συμβεί.
3. Πρέπει να ληφθούν υπόψη οι αλληλεπιδράσεις των ελαττωμάτων.
4. Οι μεταβλητές συνθήκες λειτουργίας και τα στοχαστικά χαρακτηριστικά των σημάτων εμποδίζουν τη χρήση παραδοσιακών τεχνικών χρόνου ή συχνότητας. Η ανάλυση της χρονικής συχνότητας, όπως οι μετασχηματισμοί wavelet, πρέπει να διερευνηθεί επειδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε τέτοιες καταστάσεις.

Βιβλιογραφία

- [1] Palmgren, Ball and Roller Bearing Engineering, First edition, Translation by G. Palmgren and B. Ruley, SKF Industries, Inc.,
- [2] G. Lundberg and A. Paimgren, Dynamic Capacity of Rolling Bearings, Acta Polytechnica Mechanical Engineering Series, vol.1, no. 3, Stockholm, Sweden, 1947.
- [3] G. Lundberg and A. Palmgren, Dynamic Capacity of Rolling Bearings," Acta Polytechnica Mechanical Engineering Series,vol. 2, no. 4, Stockholm, Sweden, 1952.
- [4] Palmgren, Die Lebensdauer von Kugellagern (The Service Life of Ball Bearings), Zeitschrift des Vereines DeutscherIngenieure, vol. 68, no. 14, pp. 339-341, 1924,.
- [5] Anon, Load Ratings and Fatigue Life for Ball Bearings, ANSI/AFBMA 9-1990, The Anti-Friction Bearing ManufacturersAssociation, Washington, DC, 1990.
- [6] Anon, Rolling Bearings-Dynamic Load Ratios and Rating Life, ISO 281:1990(E), International Organization forStandardization, 1990.
- [7] AFNOR, "Condition monitoring and diagnostics of machines – prognostics - part 1: General guidelines. NF ISO 13381-1,"2005.
- [8] C.P. Henry, An historical view of the MFPT Society. In Proceedings of a Joint MFPT–JOAP–TSC Conference, Mobile,Alabama, pp. 3–15, 22–26 April 1996.
- [9] D.A. Tobon-Mejia, K. Medjaher, N. Zerhouni and G. Tripot, A Mixture of Gaussians Hidden Markov Model for failediagnostic and prognostic, 6th Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering (Case), Toronto, Canada, pp.338-343, 2010.
- [10] W.K. Yu and T.A. Harris, A new stress-based fatigue life model for ball bearings, Tribology Transactions, vol. 44, no. 1, pp.11-18, 2001.
- [11] Y. Shao and K. Nezu, Prognosis of remaining bearing life using neural networks, Proc. Inst. Mech. Eng., J. Syst. Control Eng.,pt. 1, vol. 214, no. 3, pp. 217–230, 2000.

- [12] N. Gebraeel, M. Lawley, R. Liu and V. Parmeshwaran, Residual Life Predictions From Vibration-Based Degradation Signals: A Neural Network Approach, IEEE Transactions On Industrial Electronics, vol. 51, no. 3, pp. 694-700, 2004.
- [13] A.F. Khan, Condition monitoring of rolling element bearings: A comparative study of vibration based techniques, Ph.D.Thesis, University of Nottingham, May 1991.
- [14] G.P Succi, Prognostic methods for bearing condition monitoring, Proceedings of the 3rd International Machinery Monitoring and Diagnostic Conference, Las Vegas, Nevada, December, pp. 335-342, 1991.
- [15] Howard, A Review of rolling Element Bearing Vibration Detection, Diagnosis and Prognosis, DTSO Research Report 0013, October 1994.
- [16] R.B. Randall, Computer aided vibration spectrum trend analysis for condition monitoring, Maintenance Management International, vol. 5, pp 161-167, 1985.
- [17] J.E. Berry, How to track rolling element bearing health with vibration signature analysis, Sound and Vibration, pp 24-35, November 1991.
- [18] Y. Li, C. Zhang, T.R. Kurfess, S. Danyluk and S.Y. Liang, Diagnostics and prognostics of a single surface defect on roller bearings, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 214, pp. 1173-1185, 2000.
- [19] R. Orsagh, M. Roemer, J. Sheldon and C.J. Klenke, Prognostics/ Diagnostics for gas turbine engine bearings, Proceedings of IGTI TurboExpo 2004 Vienna, June 14-17, 2004.
- [20] H. Qiu, J. Lee, J. Lin and G. Yu, Robust performance degradation assessment methods for enhanced rolling element bearings prognostics, Advanced Engineering Informatics, vol. 17, Issues 3-4, pp. 127-140, 2003.
- [21] G.E. Box, G.M. Jenkins, Time Series Analysis: forecasting and control, San Francisco, CA: Holden-Day, 1976.

- [22] D.P. Mandic and J.A. Chambers, Recurrent Neural Networks for Prediction: learning algorithms, architectures and stability, Wiley, New York, 2001.
- [23] P.K. Kankar, Satish C. Sharma and S.P. Harsha, Fault Diagnosis of Ball Bearings Using Continuous Wavelet Transform, Applied Soft Computing, vol. 11, pp. 2300-2312, 2011.
- [24] P.K. Kankar, Satish C. Sharma and S.P. Harsha, Rolling Element Bearing Fault Diagnosis using Autocorrelation and Continuous Wavelet Transform, Journal of Vibration and Control, Accepted, doi:10.1177/ 1077546310395970, 2011.
- [25] K. Goebel, N. Eklund and P. Bonanni, Fusing Competing Prediction Algorithms for Prognostics, IEEE Aerospace Conference, March 2006.
- [26] S. Janjarasjitt, H. Ocaik and K.A. Loparo, Bearing condition diagnosis and prognosis using applied nonlinear dynamical analysis of machine vibration signal, Journal of Sound and Vibration, vol. 317, pp. 112–126, 2008.
- [27] S.H. Ghafari, A Fault Diagnosis System for Rotary Machinery Supported by Rolling Element Bearings, A Thesis presented to the University of Waterloo, Ontario, Canada, 2007.
- [28] H.E. Kim, Andy C.C. Tan, J. Mathew, Eric Y. H. Kim and B.K. Choi, Machine prognostics based on health state estimation using SVM, Proceedings Third World Congress on Engineering Asset Management and Intelligent Maintenance Systems Conference, vol. 199, pp. 834-845, 2008.
- [29] P.K. Kankar, Satish C. Sharma and S.P. Harsha, Fault Diagnosis of Ball Bearings Using Machine Learning Methods, Expert Systems with Applications, vol. 38, no. 3, pp. 1876-1886, 2011.
- [30] Y.N. Pan, J. Chen and G.M. Dong, A hybrid model for bearing performance degradation assessment based on support vector data description and fuzzy c-means, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 223, pp. 2687-2695, 2009.

- [31] Ι. Αυγερινός «Στοιχεία Μηχανών, Εκδόσεις Φούντας , 1998.
- [32] Τεχνικές πληροφορίες και στοιχεία από την εταιρία Κέντρο Εμπορίας Ρουλεμάν, διαθέσιμα στην ιστοσελίδα <http://www.bearingstc.gr>.
- [33] Τεχνικές πληροφορίες και στοιχεία από τον οίκο FAG <http://www.fag.com>.
- [34] Εμ. Κανδύλης, « Προληπτική συντήρηση μηχανών: Τεχνολογία και παραδείγματα εφαρμογών», Αμερικανικά Τεχνικά Επιχειρήσεις, 2004.
- [35] FEMTO-ST, “IEEE PHM 2012 Data Challenge,” online website, last accessed on May 31, 2012. <<http://www.femto-st.fr/en/Researchdepartments/AS2M/Research-groups/PHM/IEEE-PHM-2012-Datachallenge.php>>
- [36] N. Tandon and A. Choudhury, “A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings,” *Tribology International*, vol. 32, no. 8, pp. 469–480, 1999.
- [37] Y. Shao and K. Nezu, “Prognosis of remaining bearing life using neural networks,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, pp. 217–230, 2000.
- [38] N. Gebraeel, M. Lawley, R. Liu, and V. Parmeshwaran, “Residual life predictions from vibration-based degradation signals: A neural network approach,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, pp. 694–700, 2004.
- [39] W. He, N. Williard, M. Osterman, and M. Pecht, “Prognostics of lithium-ion batteries based on Dempster-Shafer theory and the Bayesian Monte Carlo method,” *Journal of Power Sources*, vol. 196, pp. 10314–10321, 2011.

- [40] N. Gebraeel, M. Lawley, R. Li, and J. Ryan, "Residual-life distributions from component degradation signals: A Bayesian approach," *IIE Transactions*, vol. 37, pp. 543–557, 2005.
- [41] F. Cadini, E. Zio, and D. Avram, "Model-based Monte Carlo state estimation for condition-based component replacement," *Reliability engineering and System Safety*, vol. 94, pp. 752–758, 2009.
- [42] B. Kedem, "Spectral analysis and discrimination by zero-crossings," *Proceedings of the IEEE*, vol. 74, pp. 1477-1493, 1986.
- [43] Z-L. Gaing, "Wavelet-based neural network for power disturbance recognition and classification," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1560-1568, 2004.
- [44] P. Bonissone And K. Goebel, "When will it break? A hybrid soft computing model to predict time-to-break margins in paper machines," *Proceedings of SPIE 47th Annual meeting , International Symposium on Optical Science and Technology*, vol. 4787, pp. 53-64, 2002.
- [45] J. A. K. Suykens and J. Vandewalle, "Recurrent least squares support vector machines," *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I*, vol. 47, no. 7, pp. 1109-1114, 2000.
- [46] IEEE PHM 2012 Prognostic Challenge. Data acquisition parameters and organization of data. <http://www.femto-st.fr/f/d/IEEE-Challenge-Data.pdf>
- [47] IEEE PHM 2012 Prognostic Challenge. PRONOSTIA platform and experiments. <http://www.femto-st.fr/f/d/IEEE-Challenge-Platform.pdf>
- [48] NASA Ames Research Center. Prognostics Center of Excellence Data Repository. <http://ti.arc.nasa.gov/tech/dash/pcoe/prognostic-data-repository/>

- [49] B. Stevens, "EXAKT reduces failures at Canadian Kraft Mill", 2006.
<http://www.omdec.com/wordpress/wp-content/uploads/2011/03/Case-Kraft-Pulp-Mill.pdf>
- [50] M. Zule and Z. Bluvband, "RCM policy: new method of residual lifetime prediction according to item's actual operating state", *Reliability, Quality Control and Risk Assessment*, IASTED International Conference, Washington, 1992
- [51] T. Wang, J. Yu, D. Siegel and J. Lee, "A similarity-based prognostics approach for Remaining Useful Life estimation of engineered systems". *Proceedings of the International Conference on Prognostics and Health Management Society*, Denver, USA, October 2008.
- [52] Z. Tian, "An artificial neural network method for remaining useful life prediction of equipment subject to condition monitoring". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2009.
- [53] K. Javed, R. Gouriveau, R. Zemouri and N. Zerhouni, "Improving data-driven prognostics by assessing predictability of features", *Proceedings of the International Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, Montreal, Canada, September 2011
- [54] UCI Machine Learning Repository. Callt2 Building People Counts Data Set.
<http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Callt2+Building+People+Counts>
- [55] A. Ihler, J. Hutchins and P. Smyth, "Adaptive event detection with time-varying Poisson processes", *Proceedings of the 12th ACM SIGKDD Conference (KDD-06)*, August 2006.
- [56] A. Saxena, J. Celaya, E. Balaban, K. Goebel, B. Saha, S. Saha, and M. Schwabacher, "Metrics for Evaluating Performance of Prognostics

Techniques," *Proceedings of the International Conference on Prognostics and Health Management Society*, Denver, USA, Oct 2008.

[57] PHM-2008 Prognostics Data Challenge Dataset.

<http://ti.arc.nasa.gov/tech/dash/pcoe/prognostic-data-repository/>

[58] IEEE PHM 2012 Prognostic Challenge. Scoring of results and application procedure. <http://www.femto-st.fr/f/d/IEEE-Challenge-Appli.pdf>

[59] R. Y. Rubinstein and D. P. Kroese, "The Cross-Entropy Method: A unified approach to Combinatorial Optimization, Monte Carlo Simulation and Machine Learning", Springer-Verlag, 2004

[60] D. P. Kroese, S. Porotsky and R. Y. Rubinstein, "The Cross-Entropy Method for Continuous Multi-Extremal Optimization", *Methodology and Computing in Applied Probability*, 2006, 8(3) : 383–407.

[61] D. P. Kroese, R. Y. Rubinstein, I. Cohen, S. Porotsky and T. Taimre "The Cross-Entropy Method", *Encyclopedia of Operations Research and Management Sciences*, Third edition, Springer-Verlag, 2012.

- An, D., Kim, N., & Choi, J ., (2016). Bearing Prognostics Method Based on Entropy Decrease at Specific Frequency. In *18th AIAA Non-Deterministic Approaches Conference* (p. 1678).
- Caesarendra, W., Widodo, A., & Yang, B. S. (2010). Application of relevance vector machine and logistic regression for machine degradation assessment. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(4), 1161-1171.
- FEMTO-ST, "IEEE PHM 2012 Data Challenge," online website, last accessed on May 31, 2012. <http://www.femto-st.fr/en/Researchdepartments/AS2M/Research-groups/PHM/IEEE-PHM-2012-Datachallenge.php>
- Heng, A., Zhang, S., Tan, A. C., & Mathew, J. (2009). Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities. *Mechanical systems and signal processing*, 23(3), 724-739.

- Jardine, A. K.(2006). *A review on machinery diagnostic and prognostics implementing condition-based maintenance, Mechanical systems and signal processing*
- Lee, J., Wu, F., Zhao, W., Ghaffari, M., Liao, L., & Siegel, D. (2014). Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications. *Mechanical systems and signal processing*, 42(1), 314-334.
- Lebold, M., McClintic, K., Campbell, R., Byington, C., & Maynard, K. (2000, May). Review of vibration analysis methods for gearbox diagnostics and prognostics. In *Proceedings of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology* (Vol. 634, p. 16).
- Lee, J., Qiu, H., Yu, G., & Lin, J. (2009). Rexnord Technical Services (2007). 'Bearing Data Set', IMS, University of Cincinnati. NASA Ames Prognostics Data Repository.
- McInerny, S. A., & Dai, Y. (2003). Basic vibration signal processing for bearing fault detection. *IEEE Transactions on education*, 46(1), 149-156.
- Qiu, H., Lee, J., Lin, J., & Yu, G. (2006). Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics *Journal of sound and vibration*, 289(4), 1066-1090.
- Randall, R. B., & Antoni, J. (2011). Rolling element bearing diagnostics—a tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(2), 485-520.ISO 690
- Siew, W. S., Smith, W. A., Peng, Z., & Randall, R. B. FAULT SEVERITY TRENDING IN ROLLING ELEMENT BEARINGS.
- Siegel, D., Ly, C., & Lee, J. (2011). Evaluation of vibration based health assessment and diagnostic techniques for helicopter bearing components. In *2011 DSTO International Conference on Health and Usage Monitoring, Melbourne, Australia*.
- Sutrisno, E., Oh, H., Vasan, A. S. S., & Pecht, M. (2012, June). Estimation of remaining useful life of ball bearings using data driven methodologies. In *Prognostics and Health Management (PHM), 2012 IEEE Conference on* (pp. 1-7). IEEE.
- Wang, T. (2012, June). Bearing life prediction based on vibration signals: A case study and lessons learned. In *Prognostics and Health Management (PHM), 2012 IEEE Conference on* (pp. 1-7). IEEE.
- Yan, W., Qiu, H., & Iyer, N. (2008). *Feature extraction for bearing prognostics and health management (phm)-a survey (preprint)* (No. AFRL-RX-WP-TP-2008-4309). AIR FORCE RESEARCH LAB WRIGHT-PATTERSON AFB OH MATERIALS

AND MANUFACTURING DIRECTORATE.

- Τριάντης, Γ. (2008). Ταυτοποίηση βλαβών οδοντωτών τροχών. Διπλωματική Εργασία. Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
 - Seokgoo Kim, Sungho Park, Ju-Won Kim, Junghwa Han, Dawn An, Nam Ho Kim, Joo-Ho Choi (2016). A New Prognostics Approach for Bearing based on Entropy Decrease and Comparison with existing Methods
 - Sergey Porotsky and Zigmund Bluvband ALD GroupTel-Aviv, Israel. Remaining Useful Life Estimation for Systems with Non-Trendability Behaviour
 - Edwin Sutrisno, Hyunseok Oh, Arvind Sai Sarathi Vasani, and Michael Pecht Center for Advanced Life Cycle Engineering (CALCE) University of Maryland, College Park Estimation of Remaining Useful Life of Ball Bearings using Data Driven Methodologies
-
- Πηγές από Διαδίκτυο:

<http://www.astbearings.com/application-solutions.html>

<http://www.skf.com/ph/products/bearings-units-housings/roller-bearings/principles/index.html>