



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΡΑΔΑΣΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

υπό

ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΒΛΑΧΟΔΗΜΟΥ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Αριστοτελείου
Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης 2013

Μεταπτυχιακή Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Βόλος, 2023



© 2023 Νικόλαος Βλαχοδήμος

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).





Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Παπαδημητρίου Κωνσταντίνος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Καραμάνος Σπύρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Χαραλάμπους Γεώργιος Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας





ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΡΑΔΑΣΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΒΛΑΧΟΔΗΜΟΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2023

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Παπαδημητρίου Κωνσταντίνος

Καθηγητής Δυναμικής και Κατασκευών

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία με τίτλο «Προβλεπτική συντήρηση: Ανάλυση κραδασμών και διάγνωση βλαβών σε περιστροφικές μηχανές» περιέχει μία λεπτομερή ανάλυση της ανίχνευσης και της διάγνωσης βλαβών σε περιστρεφόμενο εξοπλισμό χρησιμοποιώντας την ανάλυση κραδασμών. Αρχικά, γίνεται αναφορά στην προβλεπτική συντήρηση και στις σύγχρονες τάσεις. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο για τη φυσική των δονήσεων, των σημάτων και την ανάλυση FFT. Έπειτα, αναλύεται η ανάπτυξη της συμπτωματολογίας για βλάβες σε περιστρεφόμενο εξοπλισμό και ο τρόπος απεικόνισης σε διαγράμματα πλάτους-συχνότητας. Στο τελευταίο μέρος της εργασίας λαμβάνονται μετρήσεις σε βιομηχανικό περιβάλλον με τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού και αναλύεται με λεπτομέρεια η δομή και ο τρόπος λειτουργίας του, ολοκληρώνοντας τη μελέτη με την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Λέξεις κλειδιά:

ανίχνευση και διάγνωση βλαβών, ανάλυση κραδασμών, προβλεπτική συντήρηση





PREDICTIVE MAINTENANCE: VIBRATION ANALYSIS AND FAULT DIAGNOSIS IN ROTATING MACHINES

NIKOLAOS VLACHODIMOS

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2023

Supervisor: COSTAS PAPADIMITRIOU, Ph.D.

Professor of Structural Dynamics

Abstract

The thesis entitled "Predictive Maintenance: Vibration Analysis and Fault Diagnosis in Rotating Machines" contains a detailed analysis of the detection and diagnosis of faults in rotating equipment using vibration analysis. First, preventive maintenance and modern trends are mentioned. Then, the theoretical background for the physics of vibrations, signals and FFT analysis is developed. Then, the development of symptomatology for faults in rotating equipment and how to display it in amplitude-frequency diagrams is analyzed. In the last part of the thesis, measurements are taken in an industrial environment using specialized equipment and its structure and mode of operation are analyzed in detail, completing the study with the analysis of the results.





Πίνακας περιεχομένων

1 Συντήρηση μηχανών	1
1.1 Φιλοσοφίες συντήρησης	1
1.1.1 Λειτουργία ως τη βλάβη.....	1
1.1.2 Προληπτική συντήρηση	2
1.1.3 Προβλεπτική συντήρηση.....	2
1.1.4 Συντήρηση ακριβείας.....	3
1.2 Η εξέλιξη της συντήρησης με τα χρόνια.....	5
1.3 Εισαγωγή στην προβλεπτική συντήρηση.....	7
1.3.1 Η φιλοσοφία της προβλεπτικής συντήρησης	7
1.3.2 Μέθοδοι προβλεπτικής συντήρηση	7
1.4 Παρακολούθηση δονήσεων – κραδασμών (Vibration monitoring).....	9
1.4.1 Παρακολούθηση κραδασμών – εύρεση σφαλμάτων	9
1.4.2 Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα ανάλυσης κραδασμών	10
2 Θεωρητικό υπόβαθρο	11
2.1 Ταλαντώσεις.....	11
2.1.1 Σύστημα ελατηρίου σώματος	11
2.1.2 Απόκριση συστήματος	12
2.1.3 Τι είναι ταλάντωση;	13
2.2 Κύματα	16
2.2.1 Οι βασικές αρχές των κυμάτων	16
2.3 Αρμονικές	19
2.4 Σημαντικές έννοιες για την παρακολούθηση κραδασμών	21
2.4.1 Ορολογία θεωρίας κραδασμών.....	21
2.4.2 Όρια και πρότυπα των δονήσεων	23
2.5 Μετασχηματισμός Fourier	26
3 Διάγνωση σφαλμάτων εξοπλισμών με χρήση της ανάλυσης κραδασμών.....	28
3.1 Αζυγοσταθμία	29
3.1.1 Στατική αζυγοσταθμία	30
3.1.2 Αζυγοσταθμία ζεύγους.....	30
3.1.3 Αζυγοσταθμία προεξέχοντος ρότορα.....	31
3.2 Εκκεντρότητα.....	32
3.3 Λυγισμός άξονα.....	33
3.4 Ανευθυγραμμία	34





3.4.1 Γωνιακή ανευθυγραμμία	34
3.4.2 Παράλληλη ανευθυγραμμία	35
3.4.3 Ανευθυγραμμία ρουλεμάν σε άξονα	36
3.5 Χαλαρότητα	38
3.5.1 Χαλαρότητες εσωτερικά του εξοπλισμού	38
3.5.2 Χαλαρότητα μεταξύ της βάσης και του εξοπλισμού	39
3.5.3 Δομικές χαλαρότητες	40
3.6 Ελαττώματα σε έδρανα ολισθήσεως	41
3.6.1 Μεγάλο διάκενο μεταξύ του άξονα και της έδρας	42
3.6.2 Αστάθεια από στροβιλισμούς λαδιού	43
3.6.3 Αστάθεια από σοβαρούς στροβιλισμούς λαδιού	44
3.6.4 Αστάθεια από ελλιπή φιλμ λαδιού	44
3.7 Ελαττώματα εδράνων κυλίσεως	45
3.7.1 Πρώτο στάδιο φθοράς εδράνου κυλίσεως	47
3.7.2 Δεύτερο στάδιο φθοράς εδράνου κυλίσεως	48
3.7.3 Τρίτο στάδιο φθοράς εδράνου κυλίσεως	49
3.7.4 Τέταρτο στάδιο φθοράς εδράνου κυλίσεως	49
3.8 Ελαττώματα γραναζοκινήσεων	51
3.8.1 Φθορά οδόντωσης	52
3.8.2 Αυξημένο φορτίο οδόντωσης	52
3.8.3 Εκκεντρότητα γραναζιών – υπερβολική χάρη σύμπλεξης	53
3.8.4 Ανευθυγραμμία γραναζιών	54
3.8.5 Ραγισμένη – σπασμένη οδόντωση	54
3.9 Προβλήματα κίνησης με ιμάντες	56
3.9.1 Φθαρμένοι, χαλαροί ή λάθος τοποθετημένοι ιμάντες	56
3.9.2 Ανευθυγραμμία ιμάντα τροχαλίας	57
3.9.3 Εκκεντρότητα τροχαλιών	58
3.9.4 Συντονισμός ιμάντα	58
3.10 Προβλήματα αεροδυναμικής και υδραυλικής φύσης	60
3.10.1 Δόνηση από διέλευση πτερυγίων	60
3.10.2 Αναταράξεις ροής	61
3.10.3 Σπηλαίωση	62
3.11 Συμπεράσματα και συγκεντρωτικός πίνακας συμπτωμάτων	63
4 Ανάλυση κραδασμών σε βιομηχανικό εξοπλισμό με τη χρήση φορητής συσκευής μέτρησης.	66
4.1 Περιγραφή βιομηχανικού εξοπλισμού	66





4.1.1 Γενική περιγραφή	66
4.1.2 Αναλυτική περιγραφή εξαρτημάτων.....	67
4.2 Περιγραφή φορητής συσκευής μέτρησης και προγράμματος ανάλυσης	70
4.2.1 Γενική περιγραφή φορητής συσκευής μέτρησης.....	70
4.2.2 Επιταχυνσιόμετρο.....	71
4.2.3 Φορητή μονάδα μέτρησης Falcon.....	75
4.2.4 Πρόγραμμα Nest 3	77
4.3 Διενέργεια μετρήσεων, παρουσίαση και ανάλυσή τους	82
4.3.1 Διενέργεια μετρήσεων	82
4.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	85
4.3.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων και κατάστασης εξοπλισμού	98
5 Επίλογος	110
Βιβλιογραφία	111
Παράρτημα	112





1 Συντήρηση μηχανών

1.1 Φιλοσοφίες συντήρησης

Εάν κάνουμε μια έρευνα για τις φιλοσοφίες συντήρησης που εφαρμόζονται από διάφορες εταιρείες σε διάφορες παραγωγικές διαδικασίες, θα παρατηρήσουμε πολλές ομοιότητες πάρα τις τεράστιες διαφορές στη φύση των παραγωγικών λειτουργιών που εφαρμόζουν. Επομένως οι φιλοσοφίες συντήρησης μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες:

- Λειτουργία ως την βλάβη – Breakdown maintenance
- Προληπτική συντήρηση – Preventive maintenance
- Προβλεπτική συντήρηση – Predictive maintenance
- Συντήρηση ακριβείας – Precision maintenance

1.1.1 Λειτουργία ως τη βλάβη

Αυτό το είδος συντήρησης άρχισε να εμφανίζεται αμέσως με την κατασκευή των πρώτων μηχανών. Η λογική πίσω από αυτήν τη μέθοδο συντήρησης είναι ιδιαίτερα απλή. Η μηχανή αφήνεται να λειτουργεί χωρίς κανένα έλεγχο ή επίβλεψη στα πλαίσια την συντήρησης, έως ότου κάποιο κομμάτι της αστοχήσει ή σταματήσει να λειτουργεί τελείως. Αυτή η προσέγγιση μπορούμε να πούμε ότι λειτουργεί αποτελεσματικά σε εξοπλισμούς που δεν σταματούν την παραγωγική διαδικασία ή είναι μικρής αξίας και γενικά επισκευάζονται εύκολα. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι το τμήμα συντήρησης λειτουργεί διαρκώς με έναν απρογραμματιστό τρόπο. Δρα μόνο όταν έχουμε απροσδόκητες διακοπές της παραγωγικής διαδικασίας. Η συντήρηση αυτήν απαιτεί μεγάλο απόθεμα ανταλλακτικών για άμεση χρήση.

Χωρίς αμφιβολία, είναι ο πιο αναποτελεσματικός τρόπος διατήρησης της παραγωγικής διαδικασίας μιας μονάδας. Γίνονται μάταιες προσπάθειες να μειωθεί το κόστος με την αγορά φθηνότερων ανταλλακτικών και την πρόσληψη περιστασιακών εργαζομένων που το μόνο που κάνουν είναι να επιδεινώνουν περαιτέρω το πρόβλημα. Το προσωπικό έχει γενικά χαμηλό ηθικό, καθώς τείνει να καταπιέζεται περισσότερο μιας και φτάνοντας στην δουλειά κάθε μέρα έρχεται αντιμέτωπο με ένα μακρύ κατάλογο ημιτελών εργασιών και ένα σύνολο εργασιών έκτακτης ανάγκης που προέκυψε κατά την διάρκεια της νύχτας.

Παρά τη μεγάλη τεχνολογική πρόοδο που έχουμε στην εποχή που ζούμε δεν είναι ασυνήθιστο να συναντάμε μονάδες παραγωγής που λειτουργούν με αυτήν την φιλοσοφία συντήρησης.





1.1.2 Προληπτική συντήρηση

Η μέθοδος αυτή ακολουθεί χρονικά την προηγούμενη. Η λογική πίσω από τη μέθοδο της προληπτικής συντήρησης είναι ο προγραμματισμός των δραστηριοτήτων της συντήρησης σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα με βάση χρονικά διαστήματα (π.χ. κάθε 3 χρόνια αλλαγή στα ρουλεμάν του γραναζοκιβωτίου) ή τις ώρες λειτουργίας του εξοπλισμού (π.χ. κάθε 25.000 ώρες λειτουργίας του γραναζοκιβωτίου). Στη συγκεκριμένη μέθοδο η επισκευή ή αντικατάσταση των κατεστραμμένων εξοπλισμών πραγματοποιείται πριν εμφανιστούν προβλήματα και αναπόφευκτα σταματήματα της παραγωγικής διαδικασίας. Αυτή είναι μια καλή προσέγγιση για τη συντήρηση εξοπλισμών που δεν δουλεύουν συνεχώς και που το προσωπικό έχει αρκετό χρόνο για να εκτελέσει τις εργασίες προληπτικής συντήρησης.

Τα βασικά μειονεκτήματα της προληπτικής συντήρησης είναι ότι εργασίες αντικατάστασης εξοπλισμού μπορεί να εκτελούνται πολύ νωρίς ή πολύ αργά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα χωρίς καμία ένδειξη λειτουργικής αστοχίας εξαρτήματα να αντικατασταθούν όταν υπάρχει ακόμα υπολειπόμενος χρόνος ζωής. Ως εκ τούτου, είναι πιθανό να χαθούν παραγωγικές ώρες της μονάδας λόγω περιττής συντήρησης αλλά και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να προκύψουν προβλήματα λόγω του ανθρώπινου παράγοντα από λανθασμένες κινήσεις σε όλη τη διαδικασία της συντήρησης (εξαγωγή εξοπλισμού, συντήρησή του και επανατοποθέτησή του στη γραμμή παραγωγής).

Συμπερασματικά, βλέπουμε ότι, αν και η συγκεκριμένη φιλοσοφία είναι προτιμότερη και αποτελεσματικότερη από την λειτουργία ως την βλάβη, είναι όμως εξίσου δαπανηρή λόγω του αυξημένου κόστους των περιοδικών σταματημάτων της γραμμής παραγωγής και της αντικατάστασης εξαρτημάτων που πιθανόν βρίσκονται σε καλή κατάσταση.

1.1.3 Προβλεπτική συντήρηση

Η μέθοδος αυτή αποτελεί τη νέα διεθνή τάση στην εφαρμοσμένη συντήρηση. Η λογική πίσω από τη μέθοδο της προβλεπτικής συντήρησης συνίσταται στον προγραμματισμό δραστηριοτήτων συντήρησης μόνο όταν ανιχνευθεί λειτουργική αστοχία. Οι μηχανικές και λειτουργικές συνθήκες παρακολουθούνται περιοδικά και όταν ανιχνευθεί κάποια συνθήκη εκτός ορίων που έχουν τεθεί προγραμματίζεται η συντήρηση του συγκεκριμένου εξοπλισμού. Ο εξοπλισμός θα απενεργοποιηθεί τη στιγμή που βολεύει την παραγωγική διαδικασία αλλά και την ίδια τη συντήρηση και θα αλλαχθούν μόνο τα εξαρτήματα που είναι εκτός ορίων.

Πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι ότι η συντήρηση μπορεί να προγραμματιστεί με ένα δομημένο τρόπο. Τα ανταλλακτικά μπορούν να παραγγελθούν και να μην καταναλώνουν πολύτιμους πόρους της εταιρείας απλά με το να κάθονται στην αποθήκη όπως στις προηγούμενες μεθόδους. Ακόμα, δεδομένου ότι οι εργασίες





συντήρησης εκτελούνται μόνο όταν χρειάζεται, υπάρχει πιθανότητα να έχουμε αυξημένη παραγωγικότητα στη γραμμή παραγωγής.

Μειονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι ότι οι εργασίες συντήρησης μπορεί να αυξηθούν λόγω λανθασμένης εκτίμησης της φθοράς του εξοπλισμού. Για να μπορεί να παρακολουθείται η κατάσταση του εξοπλισμού και να έχουμε τα σωστά διαγράμματα φθοράς που θα μας οδηγήσουν στη βελτιστοποίηση της συντήρησης, πρέπει να υπάρχει εξειδικευμένος εξοπλισμός για την παρακολούθηση των κραδασμών, λίπανσης, θερμοκρασίας αλλά και το προσωπικό να έχει εκπαιδευτεί κατάλληλα ώστε να μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτήν την τεχνολογία. Εναλλακτικά, μπορεί να ανατεθεί σε ένα εξωτερικό συνεργάτη η καθημερινή παρακολούθηση της γραμμής παραγωγής.

Όπως και να έχει, αν ένας οργανισμός θέλει να λειτουργήσει με την φιλοσοφία της προβλεπτικής συντήρησης, πρέπει η ομάδα της παραγωγής και της συντήρησης να συνεργαστούν πολύ στενά αλλά και αρμονικά, ώστε ο ένας να υποστηρίζει τον άλλον. Ακόμα, είναι πολύ σημαντικό η διοίκηση του οργανισμού να υποστηρίξει το τμήμα συντήρησης παρέχοντάς του τον απαραίτητο εξειδικευμένο εξοπλισμό αλλά και την επαρκή εκπαίδευση, ώστε να πετύχει τον στόχο του. Ο χρόνος και η εξοικείωση με τις μεθόδους του αναφέρθηκαν παραπάνω αλλά και η δυνατότητα στη συντήρηση να μπορεί να σταματήσει τη παραγωγική διαδικασία όταν το θεωρεί απαραίτητο, δημιουργούν τις προϋποθέσεις ώστε η προβλεπτική συντήρηση να αποδώσει τα μέγιστα.

1.1.4 Συντήρηση ακριβείας

Η συντήρηση ακριβείας είναι η πλέον σύγχρονη φιλοσοφία και τάση στο χώρο της συντήρησης μηχανών. Αυτή η φιλοσοφία δίνει έμφαση στην εύρεση της βασικής αιτίας κάθε βλάβης. Έτσι κάθε πρόβλημα αναλύεται και λαμβάνονται προληπτικά μέτρα ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν θα επαναληφθεί. Χρησιμοποιεί όλες τις τεχνικές της προβλεπτικής – προληπτικής συντήρησης που συζητήθηκαν παραπάνω σε συνδυασμό με την ανάλυση αστοχίας βασικής αιτίας (root cause failure analysis RCFA). Μέσω του RCFA εντοπίζεται η αρχική αιτία που προκάλεσε το πρόβλημα σε κάθε βλάβη του εξοπλισμού. Διασφαλίζεται ότι έχουν υιοθετηθεί και εφαρμοστεί όλες οι καλές πρακτικές στην εγκατάσταση και στην επισκευή. Μπορεί ακόμα να τονίσει την ανάγκη επανασχεδιασμού ή τροποποίησης του εξοπλισμού για την αποφυγή επανάληψης του ίδιου προβλήματος.

Η συντήρηση ακριβείας, όπως προαναφέρθηκε, εμπεριέχει μέσα στη θεωρία της πρακτικές της προληπτικής συντήρησης. Όμως, στην μέθοδο αυτή, δίνεται μεγάλη έμφαση στη βελτίωση του εξοπλισμού ώστε να μην έχουμε ξανά το ίδιο πρόβλημα. Έτσι, μπορούμε πάλι να μειώσουμε τα ανταλλακτικά στην αποθήκη γιατί η εργασία συντήρησης θα γίνει προγραμματισμένα και χρησιμοποιώντας όλες τις βέλτιστες





πρακτικές. Επομένως, η συντήρηση ακριβείας είναι ο καλύτερος τρόπος για να αυξήσουμε τη διάρκεια ζωής ενός εξοπλισμού.

Σαν μειονέκτημα στη συγκεκριμένη μέθοδο θα μπορούσαμε να πούμε ότι απαιτούνται εξαιρετικά καταρτισμένοι εργαζόμενοι σε πολιτικές προβλεπτικής και προληπτικής συντήρησης. Ακόμα, πολλές λειτουργίες της συντήρησης θα χρειαστεί να δοθούν σε εργολάβους που θα πρέπει να συνεργαστούν πολύ στενά με το προσωπικό της συντήρησης αλλά και της παραγωγής έτσι ώστε να έχουμε ένα σωστό RCFA. Τέλος, η όλη διαδικασία απαιτεί την προμήθεια εξειδικευμένου εξοπλισμού και πολλές ώρες εκπαίδευσης για τη χρήση του.





1.2 Η εξέλιξη της συντήρησης με τα χρόνια

Η συντήρηση των μηχανών στη βιομηχανία έχει εξελιχθεί από τη φιλοσοφία της λειτουργίας ως τη βλάβη στην προληπτική συντήρηση. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η πιο δημοφιλής φιλοσοφία της εποχής μας είναι η προβλεπτική – συντήρηση ακριβείας.

Η φιλοσοφία της λειτουργίας ως τη βλάβη εφαρμόστηκε τα πρώτα χρόνια της βιομηχανικής επανάστασης και ονομάζεται αλλιώς πυροσβεστική συντήρηση. Στη συγκεκριμένη φιλοσοφία ο εξοπλισμός αφήνεται να λειτουργεί μέχρι να σταματήσει από κάποιο πρόβλημα. Κατά τη διάρκεια της επισκευής εντοπίζονται και δευτερογενείς βλάβες στον εξοπλισμό επιπλέον αυτής που σταμάτησε τη λειτουργία.

Στη συνέχεια, έχουμε την προληπτική συντήρηση ή αλλιώς συντήρηση βάση χρόνου λειτουργίας. Όπως αποκαλύπτει και το όνομα της συγκεκριμένης μεθόδου, ο εξοπλισμός σταματούσε να παράγει και πήγαινε για επισκευή ανά συγκεκριμένες ώρες λειτουργίας χωρίς να έχει εμφανίσει κάποιο συγκεκριμένο πρόβλημα. Το μεγάλο μειονέκτημα με αυτής της μεθόδου ήταν ότι κατά την επισκευή του εξοπλισμού αντικαθίστανται όλα τα ανταλλακτικά του ακόμα και αν δεν είχαν παρουσιάσει κανένα ελάττωμα και είχαν ακόμα αρκετό χρόνο ζωής. Αυτή η μέθοδος δεν μπορούσε να βοηθήσει στην μείωση του κόστους συντήρησης και σιγά σιγά εγκαταλείφθηκε. Επομένως, πήγαμε προς την προβλεπτική συντήρηση. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να αντικαθιστούμε τα πάντα στον εξοπλισμό μας κάθε φορά που τον επισκευάζουμε και αρχίζουμε να παρακολουθούμε την κατάστασή του, και μόνο όταν εντοπιστεί ένα σφάλμα προγραμματίζουμε τη συντήρησή του. Σήμερα, η προβλεπτική συντήρηση έχει γίνει αποδεκτή από τη βιομηχανία, κυριότερα από βιομηχανίες με συνεχόμενες γραμμές παραγωγής όπως πετρελαιοβιομηχανίες, εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, χαλυβουργεία, εταιρείες παραγωγής χαρτιού και εταιρείες επεξεργασίας αλουμινίου. Αυτό συμβαίνει γιατί σε αυτού του τύπου τις παραγωγικές διαδικασίες, αν κάτι σταματήσει από βλάβη ή βγει για να αντικατασταθεί, τότε όλη η παραγωγική διαδικασία θα σταματήσει.

Προσπαθώντας να συγκεντρώσουμε τα οφέλη της προβλεπτικής συντήρησης έχουμε:

- Αύξηση της παραγωγικότητας: εφαρμόζοντας μεθόδους προβλεπτικής συντήρησης είναι δυνατό να εξαλείψουμε σταματήματα από απρόβλεπτες βλάβες
- Αύξηση του χρόνου ζωής μεταξύ επισκευών του εξοπλισμού μας: μέσω της προβλεπτικής συντήρησης μπορούμε να προγραμματίσουμε καλύτερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια τι θα χρειαστεί να επισκευάσουμε και πότε.
- Ελαχιστοποίηση χαμένων χρόνων στα συνεργεία συντήρησης: η προβλεπτική συντήρηση δείχνει στους μηχανικούς συντήρησης τι ακριβώς έχει χαλάσει με αποτέλεσμα να μειώνεται ο χρόνος ελέγχου και οι καθυστερήσεις από την έλλειψη ανταλλακτικών.





- Βελτίωση του παραγόμενου προϊόντος: οι γραμμές παραγωγής όταν σταματούν και ξεκινούν έχουν την τάση να παράγουν ελαττωματικό προϊόν ή γενικά εκτός προδιαγραφών. Έτσι, λιγότερα σταματήματα από βλάβες σημαίνει λιγότερα ελαττωματικά προϊόντα. Ακόμα όταν ένας εξοπλισμός της γραμμής παραγωγής έχει πρόβλημα λόγω ελλιπούς συντήρησης μπορεί να έχουμε ελαττωματικά προϊόντα. Για παράδειγμα, στα ελασματοουργεία παραγωγής χάλυβα αν τα έλαστρα έχουν μεγαλύτερο διάκενο στα ρουλεμάν από ότι αυτό που προδιαγράφεται το υλικό παραγωγής, θα έχει λάθος διαστάσεις και θα είναι ελαττωματικό.
- Ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης και αύξηση της παραγωγικότητας: Μελέτες έχουν δείξει ότι η εφαρμογή ενός σωστού προγράμματος συντήρησης έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση 15 – 20% σε άμεσο κόστος συντήρησης αλλά και την αύξηση από 30- 40% της παραγωγικότητας της γραμμής.





1.3 Εισαγωγή στην προβλεπτική συντήρηση

1.3.1 Η φιλοσοφία της προβλεπτικής συντήρησης

Η προβλεπτική συντήρηση είναι βασικά προληπτική συντήρηση που βασίζεται όμως σε συνθήκες. Η προβλεπτική συντήρηση δεν χρησιμοποιεί στατιστικά στοιχεία μέσης διάρκειας ζωής του εξοπλισμού για τον προγραμματισμό της συντήρησης αλλά παρακολουθεί τη μηχανική κατάσταση, την απόδοση του εξοπλισμού αλλά και άλλες παραμέτρους και προσπαθεί να εξαγάγει τον κατά προσέγγιση χρόνο ζωής του. Ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα προβλεπτικής συντήρησης χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό εργαλείων που θα αναφερθούν παρακάτω για να αποκρυπτογραφήσει την πραγματική κατάσταση του εξοπλισμού. Με βάση αυτά τα δεδομένα επιλέγεται το πρόγραμμα συντήρησης.

Οι τεχνικές της προβλεπτικής συντήρησης έχουν στην πραγματικότητα πολύ στενή αναλογία με τις ιατρικές διαγνωστικές τεχνικές. Κάθε φορά που το ανθρώπινο σώμα έχει πρόβλημα εμφανίζει ένα σύμπτωμα. Αυτό είναι το στάδιο της ανίχνευσης. Αν χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση διενεργούνται παθολογικές εξετάσεις για την καλύτερη διάγνωση του προβλήματος. Στην συνέχεια και με βάση τα αποτελέσματα των εξετάσεων συνίσταται, η κατάλληλη αγωγή.

Με παρόμοιο τρόπο τα ελαττώματα που εμφανίζονται σε ένα εξοπλισμό παρουσιάζουν πάντα ένα σύμπτωμα π.χ. κραδασμούς, αύξηση της θερμοκρασίας κτλ. Ωστόσο αυτά τα συμπτώματα μπορεί να μην είναι τόσο εύκολα ανιχνεύσιμα από τις ανθρώπινες αισθήσεις και να χρειάζονται, όπως και στην περίπτωση του ανθρώπου, περαιτέρω εξετάσεις. Εδώ βοηθούν οι τεχνικές – μέθοδοι προβλεπτικής συντήρησης. Αυτές οι τεχνικές εντοπίζουν συμπτώματα ελαττωμάτων που έχουν εμφανιστεί σε εξοπλισμούς και βοηθούν στη διάγνωση των αιτιών που προκάλεσαν αυτά τα ελαττώματα. Σε πολλές περιπτώσεις είναι ακόμα δυνατό να εκτιμηθεί η σοβαρότητα της κατάστασης. Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα συνιστάται το κατάλληλο πρόγραμμα συντήρησης.

1.3.2 Μέθοδοι προβλεπτικής συντήρησης

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι προβλεπτικής συντήρησης. Αυτές είναι:

- **Παρακολούθηση των δονήσεων – κραδασμών (Vibration monitoring):** Η μέθοδος αυτή είναι η πιο αποτελεσματική για την εύρεση μηχανολογικών ελαττωμάτων σε περιστρεφόμενους εξοπλισμούς. Είναι η μέθοδος που θα ασχοληθούμε και στην παρούσα εργασία.
- **Ακουστική παρακολούθηση (Acoustic emissions):** Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρει και να παρακολουθήσει ασυνέχειες σε μεταλλικές δομές κατασκευών αλλά και σε μεταλλικούς αγωγούς μεταφοράς.





- **Ανάλυση λαδιού (Oil analysis):** Η ανάλυση του λαδιού λίπανσης και η εύρεση μικροσκοπικών σωματιδίων μέσα σε αυτό μπορεί να συνδεθεί και να φανερώσει την κατάσταση των ρουλεμάν και των γραναζιών.
- **Ανάλυση μικροσωματιδίων (Particle analysis):** Τα φθαρμένα εξαρτήματα παλινδρομικών μηχανών, μειωτήρων κίνησης ακόμα και υδραυλικών συστημάτων απελευθερώνουν υπολείμματα. Η συλλογή και η ανάλυση αυτών μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για την κατάσταση του εξοπλισμού.
- **Παρακολούθηση διάβρωσης και ρωγμών (Corrosion and crack monitoring):** Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για παρακολούθηση του πάχους και της συνέχειας μεταλλικών δομών με υπερήχους ή ραδιογραφία σε αγωγούς, υπεράκτιες κατασκευές αλλά και εξοπλισμούς διεργασίας και μπορεί να βοηθήσει ώστε να αποφευχθούν καταστροφικές συνθήκες για τον εξοπλισμό μας.
- **Θερμογραφία (Thermography):** Η μέθοδος της θερμογραφίας χρησιμοποιείται για την εύρεση προβλημάτων σε ενεργό ηλεκτρολογικό και μηχανολογικό εξοπλισμό. Μπορεί να εντοπίσει προβλήματα σε γεννήτριες ή ηλεκτρικούς κινητήρες, σε boiler αλλά και ανευθυγραμμίσεις σε συνδέσεις με κόμπλερ.
- **Παρακολούθηση απόδοσης (Performance monitoring):** Η μέθοδος αυτή είναι μια πολύ αποτελεσματική τεχνική για τον προσδιορισμό των λειτουργικών προβλημάτων στη γραμμή παραγωγής. Η παραγωγική αποτελεσματικότητα των εξοπλισμών εμπεριέχει μια πολύ σαφή εικόνα για την κατάστασή τους.

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με την παρακολούθηση δονήσεων – κραδασμών (vibration Monitoring). Η παρακολούθηση των δονήσεων είναι η πιο αξιόπιστη μέθοδος αποτίμησης της γενικής κατάστασης ενός περιστρεφόμενου εξοπλισμού. Η ανάλυση των δονήσεων παρέχει σαφή και μετρήσιμα αποτελέσματα και επιτρέπει στον μηχανικό να γνωρίσει την κατάσταση του εξοπλισμού του.





1.4 Παρακολούθηση δονήσεων – κραδασμών (Vibration monitoring)

1.4.1 Παρακολούθηση κραδασμών – εύρεση σφαλμάτων

Η ανάλυση κραδασμών χρησιμοποιείται για να καθορίσει τις συνθήκες λειτουργίας αλλά και την κατάσταση ενός εξοπλισμού. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της είναι ότι μπορεί να εντοπίσει ελαττώματα τα οποία είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο και πρώτου αυτά δημιουργήσουν ένα μεγαλύτερο δύσκολο επισκευάσιμο πρόβλημα. Για να το πετύχουμε αυτό πρέπει να παρακολουθούμε τους κραδασμούς του εξοπλισμού μας είτε σε μόνιμη βάση είτε με κάποια περιοδικότητα. Η παρακολούθηση των κραδασμών μπορεί να εντοπίσει:

- Φθαρμένα ή ελαττωματικά ρουλεμάν
- Μηχανικές χαλαρότητες
- Φθαρμένα ή σπασμένα δόντια
- Κακή ευθυγράμμιση
- Αζυγοσταθμίες
- Ακατάλληλη εγκατάσταση εξοπλισμού

Όλοι οι περιστρεφόμενοι εξοπλισμοί κατά την λειτουργία τους παράγουν κραδασμούς που είναι σε συνάρτηση της κατάστασής τους όπως π.χ. αν είναι ευθυγραμμισμένοι. Η μέτρηση του πλάτους των κραδασμών σε συγκεκριμένες συχνότητες παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την ποιότητα της ευθυγράμμισης, την ποιότητα των ρουλεμάν και των γραναζιών κλπ. Η συγκεκριμένη προβλεπτική μέθοδος είναι εύκολα εφαρμόσιμη σε γραμμές παραγωγής με βαρύ μηχανολογικό εξοπλισμό μεγάλου κόστους απόκτησης όπως ελασματοουργεία, χαλυβουργεία, χαρτοποιίες αλλά και σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως ανεμογεννήτριες. Τα τελευταία χρόνια μαζί με άλλες μεθόδους προβλεπτικής συντήρησης μπορεί να δώσει αποτελέσματα στην παρακολούθηση μεγάλων μηχανών εσωτερικής καύσης αλλά και σε μεγάλες μονάδες παραγωγής συμπιεσμένου αέρα.

Ένα σύστημα παρακολούθησης κραδασμών συνήθως αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη:

- Παραλήπτη σημάτων
- Αναλυτή σημάτων
- Πρόγραμμα ανάλυσης
- Ηλεκτρονικό υπολογιστή για την ανάλυση και αποθήκευση των δεδομένων

Τα παραπάνω βασικά μέρη μπορούν να διαμορφώσουν σε διάφορους συνδυασμούς τους online συστήματα παρακολούθησης, φορητά συστήματα παρακολούθησης ή ακόμα και συστήματα που θα λαμβάνουν μόνο τους αποφάσεις ανάλογα με την περίπτωση. Όπως και να έχει το ποιο σύστημα ανάλυσης κραδασμών θα επιλέξουμε,





έχει να κάνει με την σημασία του εξοπλισμού που παρακολουθούμε και τα αποτελέσματα που θέλουμε να έχουμε.

1.4.2 Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα ανάλυσης κραδασμών

Η εφαρμογή πρακτικών ανάλυσης κραδασμών σε μια γραμμή παραγωγής μπορεί να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα. Αυτά μπορούμε να τα συνοψίσουμε επιγραμματικά στα παρακάτω:

- Ελαχιστοποίηση κόστους συντήρησης και αποθεμάτων σε ανταλλακτικά
- Βελτίωση διαθεσιμότητας του εξοπλισμού
- Βελτίωση του χρόνου μεταξύ σταματημάτων
- Βελτίωση του χρονικού προγραμματισμού της συντήρησης

Πιο συγκεκριμένα και σύμφωνα με μελέτες που έχουν εκπονηθεί αλλά και από πραγματικά δεδομένα εταιρειών που έχουν κάνει τέτοιο μετασχηματισμό στον τρόπο λειτουργίας της συντήρησής τους έχουμε:

- Μείωση του κόστους παραγωγής κατά 1,2%
 - ο Τα 2/3 αυτής της μείωσης ήταν αποτέλεσμα της αύξησης της διαθεσιμότητας λόγω της μείωσης των σταματημάτων
 - ο Το 1/3 της μείωσης ήταν αποτέλεσμα της ελάττωσης του κόστους συντήρησης
- 75% μείωση στα έκτακτα σταματήματα της γραμμής παραγωγής
- 35% μείωση στο κόστος αποθήκης λόγω του καλύτερου προγραμματισμού των εργασιών και κατά συνέπεια των ανταλλακτικών

Παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, όπως κάθε μέθοδος, έτσι και αυτή έχει μειονεκτήματα.

Το ποσοστό επιτυχούς πρόβλεψης ακόμα και για έμπειρο προσωπικό κυμαίνεται κοντά στο 75%- 80% των περιπτώσεων λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας των δεδομένων. Για όχι και τόσο κρίσιμους εξοπλισμούς η συγκεκριμένη μέθοδος δεν έχει μεγάλη αποτελεσματικότητα. Αυτό γιατί με την χρήση της εισάγουμε κόστη εξοπλισμού και εκπαίδευσης προσωπικού. Παράλληλα λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας κατά τις πρώτες φάσεις εισαγωγής της συγκεκριμένης μέθοδο σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον θα εμφανιστούν λάθη και δυσλειτουργίες που πιθανόν θα αυξήσουν τις καθυστερήσεις και τα κόστη.





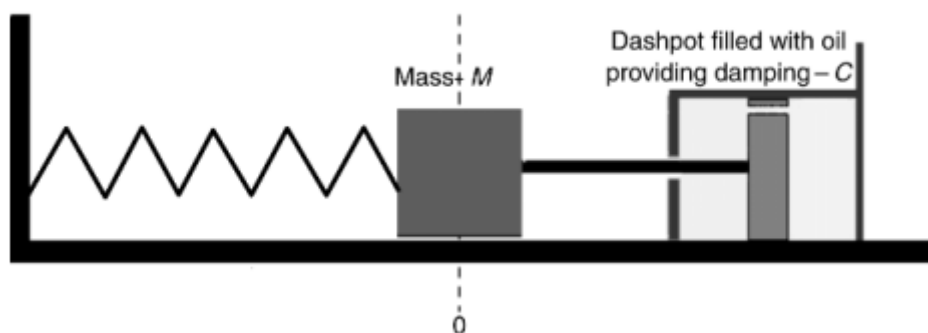
2 Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Ταλαντώσεις

Στο κεφάλαιο αυτό θα προσπαθήσουμε να παρουσιάσουμε με απλό τρόπο όλες τις έννοιες γύρω από τις ταλαντώσεις που θα χρειαστούν, ώστε να καταφέρουμε να κατανοήσουμε την ανάλυση κραδασμών σαν μέθοδο συντήρησης.

2.1.1 Σύστημα ελατηρίου σώματος

Για να μπορέσουμε να αναγνωρίσουμε και να επιλύσουμε πολλά ζητήματα στο κομμάτι της μέτρησης και ανάλυσης κραδασμών πρέπει πρώτα να κατανοήσουμε πώς το μοντέλο σώμα – ελατήριο ανταποκρίνεται σε μια εξωτερική δύναμη. Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να παρατηρήσουμε το σύστημα μάζας ελατηρίου. Η μάζα M είναι αναρτημένη σε ένα ελατήριο σταθεράς k και στο μπροστά μέρος έχει προσαρμοστεί ένας αποσβεστήρας.



Εικόνα 2.1-1: Σύστημα σώματος ελατηρίου με απόσβεση

Όταν εξωτερική δύναμη F μετακινήσει τη μάζα M μπροστά, τότε δυο πράγματα συμβαίνουν.

1. Το ελατήριο συμπιέζεται
2. Το λάδι στο πιστόνι κινείται προς τα πίσω διερχόμενο από το μικρό άνοιγμα πάνω του

Εύκολα είναι κατανοητό ότι η δύναμη F έχει να ξεπεράσει τρία πράγματα:

1. Την αδράνεια της μάζας M
2. Τον συντελεστή ελαστικότητας του ελατηρίου k
3. Την απόσβεση C του αποσβεστήρα

Όλοι οι εξοπλισμοί και τα εξαρτήματα αυτών έχουν τρεις θεμελιώδεις ιδιότητες που συνδυαζόμενες καθορίζουν την αντίδραση σε δυνάμεις που προκαλούν δονήσεις, όπως ακριβώς το σύστημα ελατηρίου μάζας που περιγράψαμε.





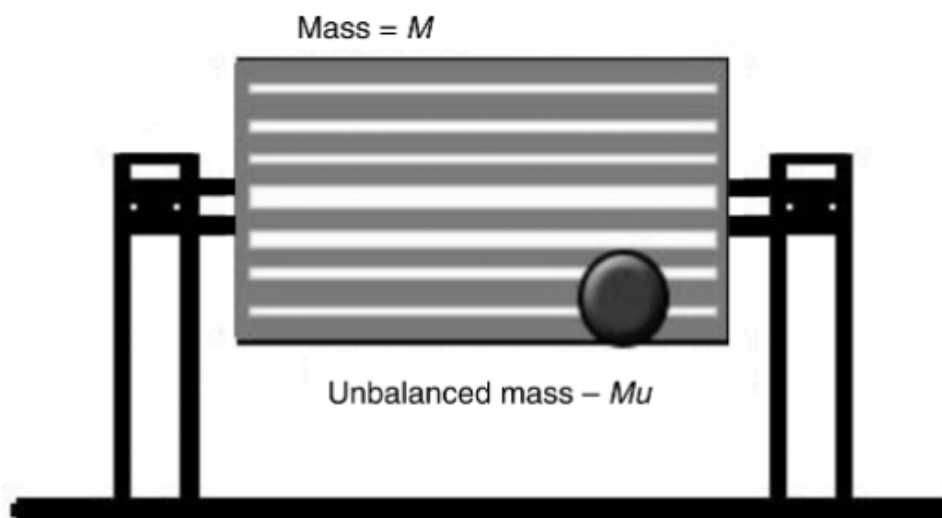
Αυτές οι τρεις βασικές ιδιότητες είναι:

1. Η μάζα – Η μάζα αντιπροσωπεύει την αδράνεια ενός σώματος που παραμένει στην αρχική κατάσταση ηρεμίας του ή κινείται. Μονάδα μέτρησης είναι τα Kg
2. Ελαστικότητα – είναι η ορισμένη δύναμη που απαιτείται για την κάμψη μιας κατασκευής σε μια ορισμένη απόσταση. Το μέτρο αυτής της δύναμης ονομάζεται ελαστικότητα και η μονάδα μέτρησης του είναι το N/m
3. Απόσβεση – Όταν μια δύναμη θέσει σε κίνηση ένα σώμα, το σώμα αυτό θα έχει εσωτερικούς μηχανισμούς για να επιβραδύνει αυτήν την κίνηση. Το χαρακτηριστικό αυτό της μείωσης της ταχύτητας της κίνησης ονομάζεται απόσβεση και η μονάδα μέτρησης του είναι το N/(m/s).

Προσπαθώντας να απλοποιήσουμε όλα τα παραπάνω και να τα θέσουμε στο πλαίσιο εύρεσης ελαττωμάτων σε έναν εξοπλισμό μπορούμε να πούμε ότι κάθε ελάττωμα σε ένα εξοπλισμό προκαλεί μια ταλαντωτή κίνηση. Η αδράνεια, η ελαστικότητα και η απόσβεση αντιτίθενται στην ταλάντωση που προκαλείται από το ελάττωμα. Αν οι ταλαντωτικές δυνάμεις λόγω των ελαττωμάτων είναι μεγαλύτερες από το άθροισμα των αντιτιθέμενων δυνάμεων τότε η ταλάντωση γίνεται αισθητή και το ελάττωμα μπορεί να διαγνωσθεί.

2.1.2 Απόκριση συστήματος

Ας θεωρήσουμε ένα περιστρεφόμενο σύστημα με μάζα M που στηρίζεται σε δυο ρουλεμάν, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Ακόμα, θεωρούμε ότι η μάζα M είναι μεταξύ των δυο ρουλεμάν και περιλαμβάνει μια αζυγοσταθμία μάζας M_u τοποθετημένη σε συγκεκριμένη ακτίνα r . Όλη η κατασκευή περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω .



Εικόνα 2.1-2: Απόκριση περιστρεφόμενου συστήματος





Επομένως έχουμε ότι:

$$\omega = 2 * \pi * (\text{rpm}/60)$$

rpm = στροφές ανά λεπτό

Άρα, η δύναμη της ταλάντωσης που παράγεται από την αζυγοσταθμία της μάζας M_u δίνεται από τον τύπο:

$$F(\text{αζυγοσταθμίας}) = M_u * r * \omega^2 * \sin(\omega t)$$

Όπου t ο χρόνος σε sec

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.1.1 η δύναμη που αντιτίθεται έχει την μορφή:

$$M * (a) + C * (v) + k * (d)$$

Όπου το a = επιτάχυνση, v = ταχύτητα και d = μετατόπιση

Αν το σύστημα είναι σε ισορροπία οι δυο δυνάμεις είναι ίσες τότε η εξίσωση μπορεί να γραφτεί:

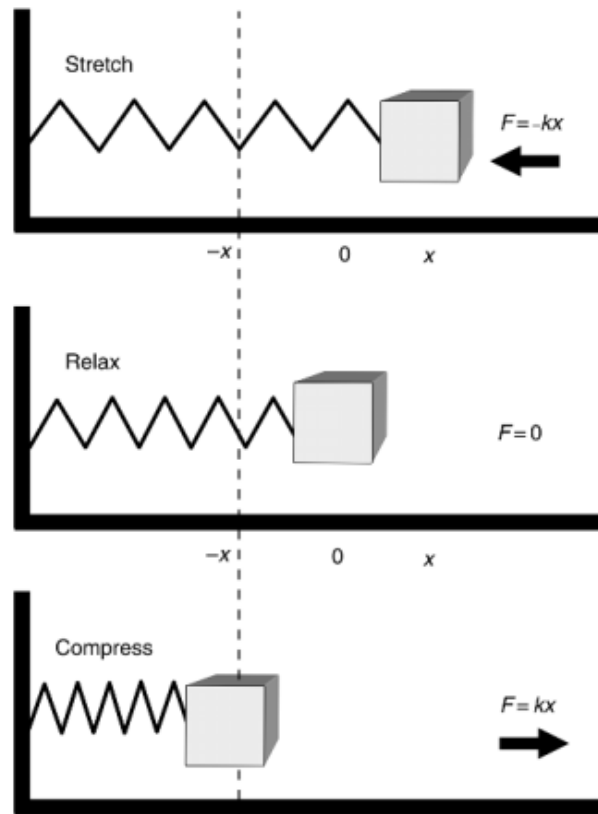
$$M_u * r * \omega^2 * \sin(\omega t) = M * (a) + C * (v) + k * (d)$$

Στην πραγματικότητα, όμως, οι αντιτιθέμενες δυνάμεις δεν δρουν ταυτόχρονα. Κατά την περιστροφή ο ένας παράγοντας μπορεί να αυξηθεί και ο άλλος μπορεί να μειωθεί. Αυτό με την σειρά του προκαλεί μια μεταβλητότητα στη συνισταμένη δύναμη που δρα κάθε φορά στην κατασκευή μας. Έτσι η ταλάντωση που θα προκληθεί από την αζυγοσταθμία θα είναι μεγαλύτερη αν η δύναμη δεξιά στην εξίσωση είναι μικρότερη αυτής στο αριστερό μέρος. Και το αντίθετο, δηλαδή, η κατασκευή μας μπορεί να μην καταλάβει τίποτα από την αζυγοσταθμία αν η δύναμη στο δεξί μέρος είναι πολύ μεγαλύτερη αυτής στο αριστερό.

2.1.3 Τι είναι ταλάντωση;

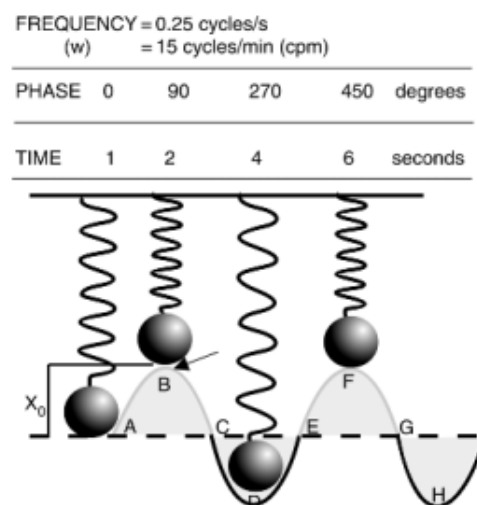
Ταλάντωση ενός σώματος ονομάζουμε την παλινδρομική κίνηση που κάνει το σώμα προς και πίσω από μια θέση ισορροπίας όταν δέχεται κάποια δύναμη. Το πιο κλασικό απλοποιημένο παράδειγμα είναι ένα σώμα με μάζα M το οποίο έχει αναρτηθεί σε ελατήριο σταθεράς k . Με την άσκηση δύναμης στο σώμα, προκαλούμε συσπείρωση του ελατηρίου και κίνηση του σώματος στα αριστερά, όταν η μάζα αφεθεί ελεύθερη κινείται προς τη θέση ισορροπίας υπό την επίδραση της δύναμης του ελατηρίου, την ξεπερνά και φτάνει στο άλλο άκρο τεντώνοντας το ελατήριο, η δύναμη του οποίου τώρα ασκείται προς την αντίθετη κατεύθυνση και τείνει να επιστρέψει το σώμα στη θέση ισορροπίας. Αυτή η παλινδρομική κίνηση τείνει να γίνεται διαρκώς όταν στο σύστημα δεν δρουν μη συντηρητικές δυνάμεις όπως η τριβή και η απόσβεση. Αυτή η κίνηση λέγεται ταλάντωση.





Εικόνα 2.1-3: Ταλάντωση σώματος αναρτημένο σε ελατήριο

Κάθε σώμα και κάθε εξοπλισμός μπορεί να ταλαντωθεί. Από αυτήν την ταλάντωση μπορούμε να καταλάβουμε πολλά για την κατάστασή του. Πρώτα όμως πρέπει να καταλάβουμε τα χαρακτηριστικά της ταλάντωσής του. Κοιτώντας την εικόνα 2.1-4 βλέπουμε το σύστημα μάζας ελατηρίου σε διαφορετικά στιγμιότυπα σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η κίνηση από τη θέση ισορροπίας στο άνω άκρο, μετά πάλι στη θέση ισορροπίας στο κάτω άκρο και πάλι στη θέση ισορροπίας, αποτελεί έναν πλήρη κύκλο της κίνησης. Ο κύκλος αυτός περιέχει όλες τις πληροφορίες για τη μέτρηση της δόνησης ενός συστήματος.



Εικόνα 2.1-4: Απλή αρμονική ταλάντωση





Η κίνηση που κάνει η μάζα ονομάζεται απλή αρμονική ταλάντωση και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$X = X_0 \sin(\omega t)$$

Όπου το X είναι η μετατόπιση στην εκάστοτε χρονική στιγμή t , το X_0 είναι η μέγιστη μετατόπιση από την θέση ισορροπίας, το $\omega = 2\pi \cdot f$ και το f είναι συχνότητα περιστροφής με μονάδες Hz.

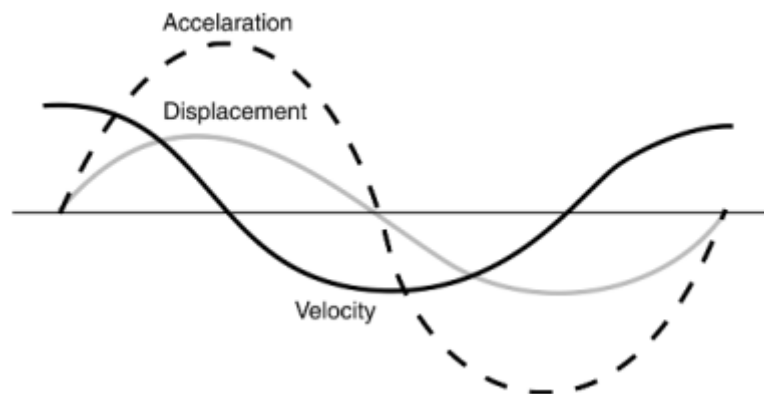
Όταν η μάζα ταξιδεύει πάνω κάτω κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης αλλάζει και η ταχύτητά της. Αυτή κυμαίνεται μεταξύ μιας μέγιστης τιμής και του μηδέν και δίνεται από την σχέση:

$$V = dX/dt = X_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)$$

Παρόμοια, η επιτάχυνση δίνεται από τον τύπο:

$$a = dv/dt = -X_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις γίνεται φανερό ότι η μορφή και η περίοδος του κραδασμού παραμένουν ίδιες ανεξάρτητα αν μετράμε μετατόπιση, ταχύτητα ή επιτάχυνση. Η ταχύτητα προηγείται της μετατόπισης με διαφορά φάσης 90° και η επιτάχυνση της ταχύτητας άλλες 90° . Αυτό είναι εμφανές στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.1-5: Κυματομορφή επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης σε μια απλή αρμονική ταλάντωση



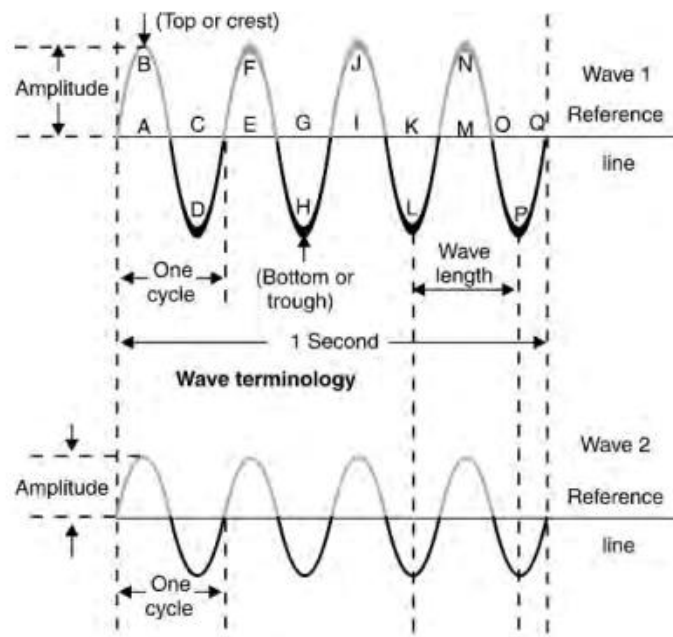


2.2 Κύματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα συζητηθούν όροι που περιγράφουν ένα κύμα όπως για παράδειγμα κύκλος, συχνότητα, μήκος, πλάτος και φάση. Θα παρουσιαστούν έννοιες όπως Κυματομορφή, αρμονικές, μετασχηματισμός Fourier και συνολικές τιμές δόνησης. Ο σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου δεν είναι να μας εντάξει βαθιά στη θεωρία των κυμάτων αλλά να μας δώσει τα βασικά ώστε να μπορέσουμε να καταλάβουμε την ανάλυση κραδασμών σαν μέθοδο προβλεπτικής συντήρησης.

2.2.1 Οι βασικές αρχές των κυμάτων

Στην παρακάτω εικόνα έχουμε δυο κύματα, το κύμα 1 και το κύμα 2. Αυτά έχουν ίδια συχνότητα και μήκος κύματος αλλά διαφορετικά πλάτη. Η γραμμή αναφοράς (γραμμή μηδενικής μετατόπισης ή reference line) είναι η θέση στην οποία θα βρισκόταν ένα σωματίδιο ύλης αν δεν διατασσόταν από την κυματομορφή.



Εικόνα 2.2-1: Δυο κύματα με διαφορετικό πλάτος

Κύκλος (συχνότητα): Παρατηρώντας την εικόνα 2.2-1 βλέπουμε ότι στο σημείο E το κύμα αρχίζει να επαναλαμβάνεται και ακολουθεί είναι δεύτερο κύμα το οποίο τελειώνει στο σημείο I και στη συνέχεια έχουμε ένα τρίτο κύμα που τελειώνει στο M κλπ. Επομένως, ένας κύκλος έχει μια κορυφή και μια κοιλά.

Μήκος Κύματος: Ένα μήκος κύματος είναι η απόσταση στο χώρο που καταλαμβάνεται από ένα κύκλο κύματος σε κάθε δεδομένη στιγμή. Αν μπορούσαμε να παγώσουμε ένα κύμα και να μετρήσουμε το μήκος, από ένα σημείο ενός κύματος μέχρι το ίδιο σημείο του επόμενου κύματος, θα λέγαμε ότι έχουμε μετρήσει το μήκος



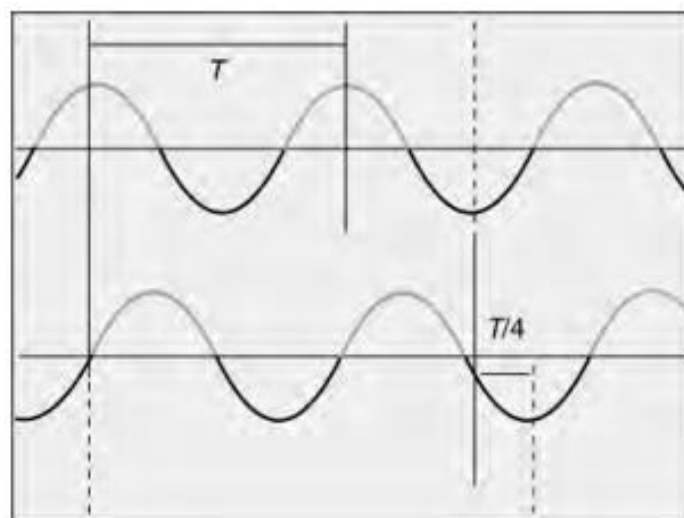


κύματος. Η απόσταση αυτή για το κύμα ποικίλει από μερικά εκατοστά για εξαιρετικά υψηλές συχνότητες μέχρι πολλά χιλιόμετρα για πολύ χαμηλές συχνότητες. Στην εικόνα 2.2-1 μπορούμε να δούμε το μήκος κύματος να απεικονίζεται και είναι η απόσταση από το Α στο Ε, από το Β στο F κλπ. Για να δηλώσουμε το μήκος κύματος χρησιμοποιούμε το γράμμα λ .

Πλάτος Κύματος: Δυο κύματα μπορεί να έχουν το ίδιο μήκος κύματος αλλά μπορεί να έχουν διαφορετικά πλάτη κύματος. Παραδείγματος χάριν, τα δυο κύματα στην εικόνα 2.2-1. Οι κορυφές του κύματος 1 ανεβαίνουν ψηλότερα από τη γραμμή αναφοράς από τις κορυφές του κύματος 2. Το ύψος μιας κορυφής κύματος πάνω από τη γραμμή αναφοράς ονομάζεται πλάτος κύματος. Το πλάτος κύματος δίνει μια σχετική ένδειξη της ποσότητας ενέργειας που εμπεριέχει το κύμα. Τέλος, μια συνεχή σειρά κυμάτων όπως αυτά της εικόνα 2.2-1 π.χ. από το Α – Q που έχουν το ίδιο μήκος κύματος και το ίδιο πλάτος ονομάζονται ακολουθία κυμάτων (wave train).

Συχνότητα και χρόνος: Όταν μια ακολουθία κυμάτων διέρχεται από ένα μέσο, ένας δεδομένος αριθμός κυμάτων διέρχεται από ένα δεδομένο σημείο σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Ο αριθμός των δονήσεων ή των κύκλων μίας ακολουθίας κυμάτων στη μονάδα του χρόνου ονομάζεται συχνότητα και μετριέται σε Hertz (Hz). Δηλαδή, εάν πέντε κύματα περάσουν από ένα σημείο σε ένα δευτερόλεπτο, η συχνότητα της ακολουθίας κυμάτων είναι πέντε κύκλοι ανά δευτερόλεπτο. Στην εικόνα 2.2-1 η συχνότητα των δυο κυμάτων είναι τέσσερις κύκλοι ανά δευτερόλεπτο.

Φάση: Παρατηρώντας την εικόνα 2.2-2 θα δούμε δυο κύματα. Θα καταλάβουμε αμέσως ότι τα δυο αυτά κύματα έχουν το ίδιο πλάτος και την ίδια συχνότητα αλλά οι κορυφές τους έχουν μια απόσταση ίση με $T/4$. Αυτή η χρονική υστέρηση ονομάζεται υστέρηση φάσης και μετριέται από τη γωνιά φάσης. Μια χρονική υστέρηση της τάξης μια περιόδου T είναι μια γωνιά φάσης 360° , άρα μια χρονική υστέρηση $T/4$ θα είναι φάση γωνίας 90° .



Εικόνα 2.2-2: Δυο όμοια κύματα με διαφορά φάσης $T/4$





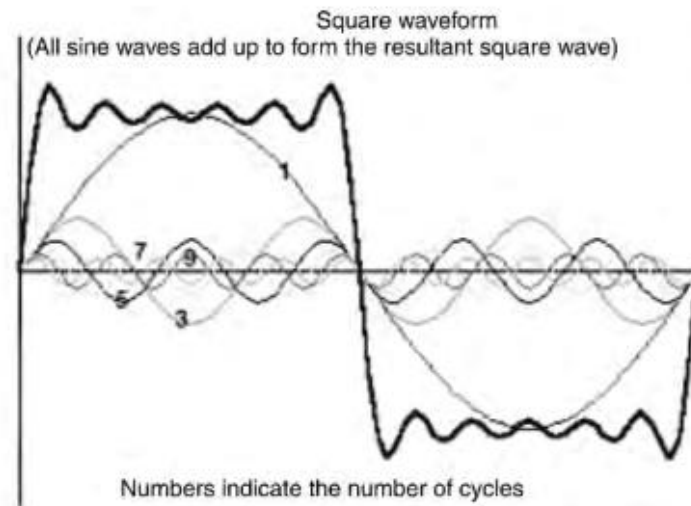
Κυματομορφή : Στο κεφάλαιο 2.1.3 είδαμε ότι η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση ενός συστήματος μάζας ελατηρίου σε κίνηση μπορούν να αναπαρασταθούν από ημιτονοειδή και συν ημιτονοειδή κύματα. Κυματομορφή επομένως είναι μια οπτική αναπαράσταση της στιγμιαίας τιμής κάθε μεγέθους της κίνησης σε σχέση με τον χρόνο.





2.3 Αρμονικές

Στο αμέσως προηγούμενο κεφάλαιο 2.2.1 περιγράψαμε τι είναι η κυματομορφή. Στην εικόνα 2.3-1 παρακάτω απεικονίζονται πολλές κυματομορφές. Στον άξονα Y αναπαρίσταται η μετατόπιση και στον άξονα X έχουμε τον χρόνο με κλίμακα 1 Sec.



Εικόνα 2.3-1: Τετραγωνική κυματομορφή

Θα προσπαθήσουμε να εξηγήσουμε μια μια τις κυματομορφές που βλέπουμε στην εικόνα:

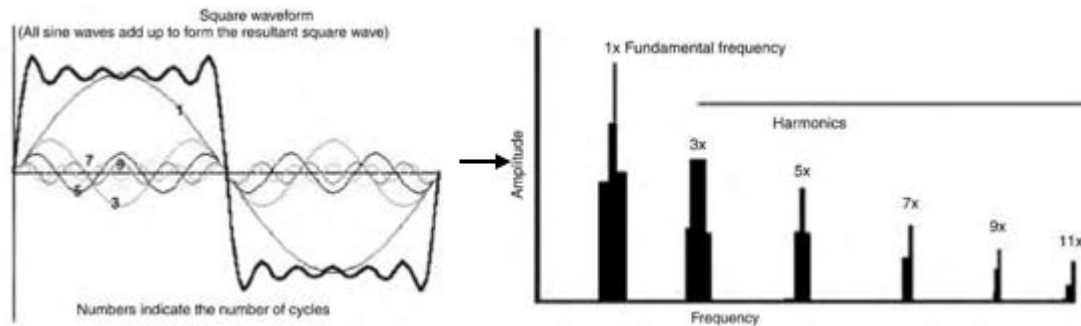
- Η πρώτη κυματομορφή που παρατηρούμε είναι αυτή με τον αριθμό 1. Απεικονίζεται μόνο ένας κύκλος και η συχνότητά της είναι 1Hz .
- Η δεύτερη κυματομορφή που παρατηρούμε είναι αυτή με τον αριθμό 3. Αποτελείται από 3 κύκλους, άρα η συχνότητά της είναι 3Hz.
- Τρίτο παρατηρούμε το κύμα με τον αριθμό 5. Μπορούμε να εντοπίσουμε 5 κύκλους, επομένως η συχνότητά του είναι 5Hz.
- Επόμενο είναι το κύμα με τον αριθμό 7. Παρομοίως παρατηρούμε 7 κύκλους, άρα η συχνότητά του είναι 7Hz.
- Τέλος, βλέπουμε το κύμα με τον αριθμό 9. Παρατηρούμε 9 κύκλους άρα έχει συχνότητα 9Hz.

Όλες οι αρμονικές που περιγράψαμε παραπάνω ονομάζονται περιττές αρμονικές του αρχικού κύματος. Τώρα, αν αθροίσουμε όλες αυτές οι κυματομορφές το κύμα που θα προκύψει θα μοιάζει με το κύμα της εικόνας 2.3-1 με την μαύρη πατημένη γραμμή. Θα είναι δηλαδή μια περίπλοκη τετραγωνική κυματομορφή. Επομένως, αν μπορούμε να προσθέσουμε ημιτονοειδείς κυματομορφές για τον σχηματισμό μιας σύνθετης κυματομορφής, τότε είναι δυνατό και το αντίστροφο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται μετασχηματισμός Fourier. Ο μετασχηματισμός αυτός είναι μια μαθηματική πράξη που μετατρέπει τις κυματομορφές από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων και αντίστροφα. Στη βιβλιογραφία αλλά και στην πράξη, αυτόν τον μετασχηματισμό των





συναντάμε και σαν ανάλυση Fourier ή ανάλυση φάσματος. Στην εικόνα 2.3-2 βλέπουμε πως μια τετραγωνική κυματομορφή μέσω του μετασχηματισμού Fourier καταλήγει να φαίνεται. Για τον μετασχηματισμό Fourier θα αναφερθούμε εκτενέστερα και σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 2.3-2: Αποτέλεσμα μετασχηματισμού Fourier





2.4 Σημαντικές έννοιες για την παρακολούθηση κραδασμών

2.4.1 Ορολογία θεωρίας κραδασμών

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια προσπάθεια σύνδεσης των πληροφοριών που έχουν παρατεθεί παραπάνω με έννοιες που είναι απαραίτητες για την παρακολούθηση κραδασμών σε μηχανολογικό εξοπλισμό. Θα εξηγηθούν:

- Συνολικό πλάτος δόνησης (overall amplitude)
- Μετατόπιση δόνησης (vibration displacement – peak to peak)
- Μέγιστη ταχύτητα δόνησης (vibration velocity – peak)
- Ταχύτητα δόνησης (vibration velocity – rms)
- Μέγιστη επιτάχυνση δόνησης (vibration acceleration – peak)

Συνολικό πλάτος δόνησης (overall amplitude): Σε προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε πώς μοιάζει μια τετράγωνη κυματομορφή στο πεδίο που χρόνου και πώς αυτή προκύπτει. Όπως είπαμε, η κυματομορφή είναι μια αναπαράσταση του στιγμιαίου πλάτους μετατόπισης ή ταχύτητας ή επιτάχυνσης σε σχέση με τον χρόνο.

Το συνολικό επίπεδο δόνησης ενός εξοπλισμού είναι ένα μέτρο του συνολικού πλάτους δόνησης σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων και μπορεί να εκφραστεί σε επιτάχυνση ή σε ταχύτητα ή σε μετατόπιση. Το συνολικό επίπεδο δόνησης μπορεί να μετρηθεί ή να υπολογιστεί από το φάσμα της δόνησης προσθέτοντας όλες τις τιμές πλάτους σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Επομένως, εύκολα γίνεται κατανοητό ότι το συνολικό επίπεδο δόνησης είναι ένα σημαντικό εργαλείο για μια αρχική εκτίμηση της κατάστασης του εξοπλισμού. Σημαντικό είναι να γνωρίζουμε ότι όταν θέλουμε να συγκρίνουμε την τιμή του συνολικού επιπέδου δόνησης δυο διαφορετικών χρονικών περιόδων ώστε να δούμε την κατάσταση του εξοπλισμού πρέπει να σιγουρευτούμε ότι οι τιμές αυτές έχουν υπολογιστεί στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων.

Μετατόπιση δόνησης (vibration displacement – peak to peak): Η συνολική απόσταση που διάνυσε ένας δονούμενος εξοπλισμός, από το ένα ακραίο σημείο στο άλλο, ονομάζεται ως μετατόπιση της δόνησης από κορυφή σε κορυφή. Οι μονάδες μέτρησης της μετατόπισης δόνησης σε SI είναι τα μ (μικρά = 1/1000 του mm).

Μέγιστη ταχύτητα δόνησης (vibration velocity – peak): Καθώς η δονούμενη μάζα κινείται, η ταχύτητά της αλλάζει. Είναι μηδέν στα άνω και κάτω όρια και είναι μέγιστη όταν περνάει από το σημείο ισορροπίας. Τα παραπάνω τα είδαμε και στο κεφάλαιο που έγινε αναφορά στις ταλαντώσεις. Αυτό που είναι σημαντικό για τη μελέτη των κραδασμών σε μηχανολογικό εξοπλισμό είναι η μέγιστη ταχύτητα η οποία ονομάζεται μέγιστη ταχύτητα δόνησης και σχετίζεται με την ένταση της δόνησης. Η μονάδα μέτρησης της μέγιστης ταχύτητας δόνησης είναι mm/s.





Ταχύτητα δόνησης rms (vibration velocity – rms): Ο διεθνής οργανισμός προτύπων (ISO) για την παρακολούθηση των κραδασμών πρότεινε την μέση τετραγωνική ρίζα της ταχύτητας ως μια τυπική μονάδα μέτρησης. Για λόγους ευκολίας την τιμή αυτή θα την αναφέρουμε ως ταχύτητα rms. Η ταχύτητα rms είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος γιατί μας δείχνει το ενεργειακό περιεχόμενο της δόνησης. Αν θα θέλαμε να συγκρίνουμε την ταχύτητα rms με την μέγιστη ταχύτητα δόνησης, θα λέγαμε ότι μεγάλες τιμές της ταχύτητα rms είναι πιο καταστροφικές από τις ίδιες τιμές για την μέγιστη ταχύτητα δόνησης.

Στο σημείο αυτό και αφού έχουμε εξηγήσει τη μέγιστη ταχύτητα δόνησης και την ταχύτητα rms μπορούμε να μιλήσουμε για τον συντελεστή κορυφής (crest factor). Σε μια κυματομορφή σαν συντελεστή κορυφής ονομάζουμε τον λόγο της μέγιστης τιμής προς την τιμή rms. Στην βιβλιογραφία μπορούμε να το συναντήσουμε και σαν αναλογία κορυφής προς rms (peak to rms ratio). Για παράδειγμα, σε ένα ημιτονοειδές κύμα ο συντελεστής κορυφής είναι 1,414. Στη μελέτη των κραδασμών ο συγκεκριμένος λόγος χρησιμοποιείται για να μας δείξει την τάση στην κατάσταση του εξοπλισμού μας.

Μέγιστη επιτάχυνση δόνησης (vibration acceleration – peak): Στην αναφορά που κάναμε στην ταχύτητα δόνησης επισημάνθηκε ότι η ταχύτητα της μάζας είναι μηδέν στα άνω και κάτω όρια της ταλάντωσης. Κάθε φορά που σταματάει επομένως σε ένα από τα δυο όρια πρέπει να επιταχύνει ξανά για να ταξιδέψει στο αντίθετο όριο. Επομένως, επιτάχυνση ονομάζουμε το ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας. Η επιτάχυνση είναι μέγιστη στα ακραία σημεία της ταλάντωσης, όπου η ταχύτητα είναι 0 και 0 στο σημείο ισορροπίας όπου η ταχύτητα είναι μέγιστη. Η επιτάχυνση εκφράζεται σε g που είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Το $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$.

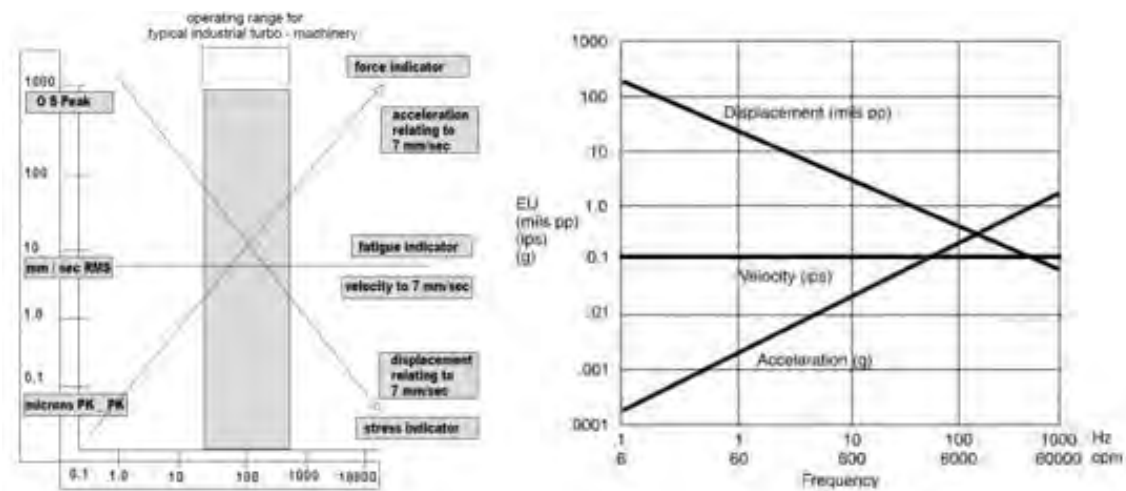
Παραπάνω παρουσιάστηκαν όλα τα μετρήσιμα μεγέθη που ένας μελετητής κραδασμών πρέπει να έχει υπόψιν. Ποιο όμως από αυτά θα δώσει το καλύτερο αποτέλεσμα και την πιο ξεκάθαρη εικόνα για την κατάσταση του εξοπλισμού μας;

Όσον αφορά τη λειτουργία του εξοπλισμού, το πλάτος της ταλάντωσης θα είναι ο πρώτος δείκτης του πόσο καλή ή κακή είναι η κατάσταση του εξοπλισμού. Γενικά, μεγάλα πλάτη κραδασμών αντιστοιχούν σε υψηλά επίπεδα ελαττωμάτων στον εξοπλισμό μας. Έχοντας ως δεδομένο ότι το πλάτος ταλάντωσης μπορεί να είναι είτε μετατόπιση, είτε ταχύτητα, είτε επιτάχυνση ο μελετητής πρέπει να έχει ένα τρόπο να βγάλει το καλύτερο αποτέλεσμα. Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι για κίνηση κάτω του 10 Hz παράγεται λίγος κραδασμός όσον αφορά την επιτάχυνση μέτριος όσον αφορά την ταχύτητα και σχετικά μεγάλος όσον αφορά την μετατόπιση. Επομένως σε αυτό το φάσμα χρησιμοποιούμε την μετατόπιση ταλάντωσης για να έχουμε το θεμιτό αποτέλεσμα. Σε υψηλές συχνότητες οι τιμές της επιτάχυνσής έχουν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την ταχύτητα ή τη μετατόπιση. Επομένως, σε φάσματα 1000 Hz και πάνω η μέγιστη επιτάχυνση ταλάντωσης είναι το καλύτερο μέγεθος για την αξιολόγηση του εξοπλισμού. Τέλος, για συχνότητες από 10 Hz – 1000Hz μέγιστη ταχύτητα ταλάντωσης είναι αυτή που μας δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα. Αν σκεφτούμε τώρα ότι οι περισσότεροι περιστρεφόμενοι εξοπλισμοί γυρνάνε με ταχύτητα περιστροφής μέσα





στα όρια του 10 Hz – 1000Hz, τότε γενικά μπορούμε να παίρνουμε την μέγιστη ταχύτητα ταλάντωσης ως τον δείκτη για τη μέτρηση και την ανάλυση κραδασμών. Όλα όσα αναφερθήκαν στην τελευταία παράγραφο παρουσιάζονται στην εικόνα 2.4-1.



Εικόνα 2.4-1: Σχέση μεταξύ επιτάχυνσης ταχύτητας και μετατόπισης

2.4.2 Όρια και πρότυπα των δονήσεων

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το πλάτος της ταλάντωσης είτε αυτό είναι της επιτάχυνσης, είτε της ταχύτητας, είτε της μετατόπισης είναι ένας δείκτης του πόσο καλή η κακή είναι η κατάσταση του εξοπλισμού. Για τον αναλυτή, όμως, πρέπει να γίνει σαφές αν η δόνηση που μετράει είναι αποδεκτή και επιτρέπεται η περαιτέρω λειτουργία του εξοπλισμού ή όχι και πρέπει να σταματήσει. Πρέπει να θυμόμαστε ότι η προβλεπτική συντήρηση είναι αυτή που εμπεριέχει μέσα της τη φιλοσοφία της ανάλυσης κραδασμών, έτσι στόχος είναι να γίνονται μετρήσεις στους εξοπλισμούς και όχι να βρούμε ποιο είναι εκείνο το επίπεδο δόνησης που καταστρέφει τον εξοπλισμό μας. Άρα στόχος είναι μέσω των μετρήσεων να βρούμε εκείνο το επίπεδο δόνησης που να προειδοποιεί για ένα επικείμενο πρόβλημα στον εξοπλισμό και αυτό να κινητοποιήσει τη συντήρηση να ασχοληθεί για την επισκευή του.

Εδώ όμως τα πράγματα δυσκολεύουν αρκετά. Ο ορισμός ενός απόλυτου ορίου δόνησης για οποιαδήποτε μηχανή είναι μια ουτοπία. Ωστόσο, θα ήταν αδύνατο να χρησιμοποιήσουμε αποτελεσματικά τις δονήσεις ως ένδειξη της κατάστασης ενός εξοπλισμού αν δεν είχαμε γενικές κατευθυντήριες γραμμές. Η εμπειρία σε διάφορους τύπους εξοπλισμού μας έχει βοηθήσει να δημιουργήσουμε αυτές τις οδηγίες που χρειαζόμαστε. Στο κομμάτι των οδηγιών υπάρχουν αρκετοί φορείς που έχουν εκδώσει τέτοιες οδηγίες. Ορισμένοι από αυτούς είναι :

- Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO)
- Αμερικανικό ινστιτούτο Πετρελαίου (API)
- Ομοσπονδία κατασκευαστών γραναζιών Αμερικής (AGMA)





Στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα παρουσιάσουμε μόνο το πρότυπο από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης που είναι και το πιο ευρέως διαδεδομένο. Για να χρησιμοποιηθεί το πρότυπο του ISO, είναι απαραίτητο να ταξινομηθεί αρχικά ο εξοπλισμός που θα μετρηθεί. Υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες εξοπλισμού που θα αναλυθούν παρακάτω. Το πρότυπο χρησιμοποιεί την ταχύτητα δόνησης rms και την μέγιστη ταχύτητα δόνησης για να περιγράψει την δριμύτητα. Αναλυτικά αυτό φαίνεται την εικόνα 2.4-2.

ISO 2372 – ISO Guideline for Machinery Vibration Severity					
Ranges of vibration Severity		Examples of quality judgment for separate classes of machines			
Velocity – in/s - Peak	Velocity – mm/s - rms	Class I	Class II	Class III	Class IV
0.015	0.28				
0.025	0.45				
0.039	0.71				
0.062	1.12				
0.099	1.8				
0.154	2.8				
0.248	4.5				
0.392	7.1				
0.617	11.2				
0.993	18				
1.54	28				
2.48	45				
3.94	71				

A – Good

B – Acceptable

C – Still Acceptable

D – Not Acceptable

Εικόνα 2.4-2: ISO 2372-1974 - Οδηγία για τη δριμύτητα δόνησης εξοπλισμού

Κατηγορία I: Μεμονωμένα εξαρτήματα ενός εξοπλισμού που είναι κομμάτι μιας γραμμής παραγωγής (χαρακτηριστικά παραδείγματα των μηχανών σε αυτήν την κατηγορία είναι ηλεκτροπαραγωγές μηχανές μέχρι 15 kW).

Κατηγορία II : Μεσαίου μεγέθους εξοπλισμοί (ηλεκτρικά μοτέρ με ισχύ εξόδου 15-75 kW) χωρίς κάποια ειδική βάση, πακτωμένοι κινητήρες ή εξοπλισμοί – μοτέρ (έως 300 kW) πάνω σε ειδική θεμελίωση.

Κατηγορία III : Μεγάλοι εξοπλισμοί κίνησης και άλλοι μεγάλοι εξοπλισμοί με περιστρεφόμενες μάζες τοποθετημένες σε στερεά και βαριά θεμέλια, τα οποία είναι σχετικά δύσκαμπτα στην κατεύθυνση της δόνησης (μεγάλοι μειωτήρες μετάδοσης κίνησης).

Κατηγορία IV : Μεγάλοι εξοπλισμοί κίνησης και άλλοι μεγάλοι εξοπλισμοί με περιστρεφόμενες μάζες τοποθετημένες σε στερεά, τα οποία είναι σχετικά εύκαμπτα στην κατεύθυνση της δόνησης (στροβιλομηχανές)

Το πρότυπο που παρουσιάστηκε παραπάνω είναι το ISO 2372 – 1974. Αυτό φυσικά έχει εξελιχθεί και προσαρμόστηκε με τα χρόνια ώστε η φιλοσοφία και ο τρόπος λειτουργίας του δεν έχει αλλάξει. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το ISO 10816 – 2009. Το ποιο σύγχρονο όμως είναι το ISO 20816 – 2022.



DIN ISO 10816-3	Group 1		Group 2	
Machine type	Large machines 300 kW < P < 50 MW		Medium sized machines 15 kW < P < 300 kW	
	Motor H > 315 mm		Motor 160 mm < H < 315 mm	
Foundation	flexible	rigid	flexible	rigid

Velocity v_R mm/s rms	11,0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
----------------------------	------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

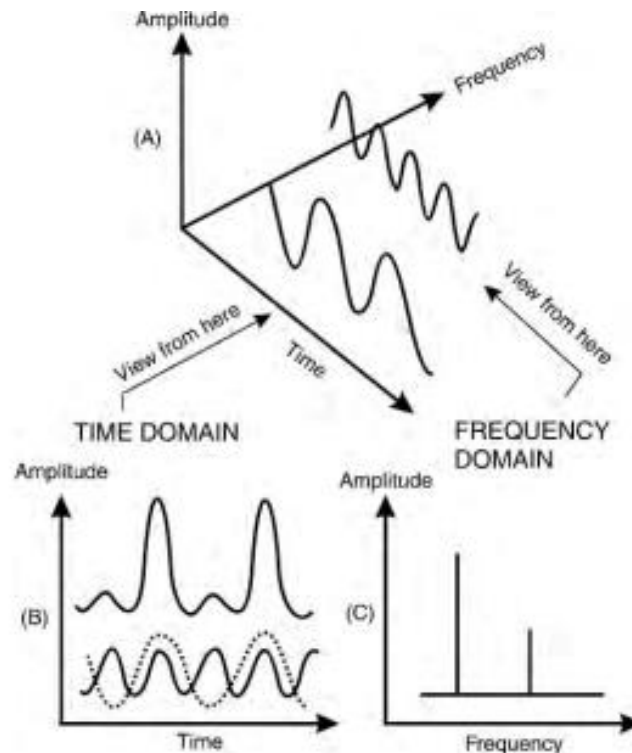
Εικόνα 2.4-3: 10816 – 2009- Οδηγία για τη δριμύτητα δόνησης εξοπλισμού

Στην πράξη αυτό που καθορίζουν τα πρότυπα είναι το αποδεκτό ή μη πλάτος της δόνησης που εμφανίζεται σε μία συγκεκριμένη συχνότητα για κάθε μετρούμενο στοιχείο. Βλέπουμε έτσι άμεσα την οξύτητα της βλάβης. Όπως έχει προαναφερθεί, το πλάτος της δόνησης αντιπροσωπεύει στην πραγματικότητα την ενέργεια το κραδασμού. Όσο πιο σοβαρή η βλάβη, τόσο μεγαλύτερο το ποσό της μεταδιδόμενης ενέργειας και τόσο μεγαλύτερο το εμφανιζόμενο πλάτος στο μετρούμενο φάσμα. Τα πρότυπα όμως δεν μας δίνουν να καταλάβουμε ποιο είναι το εξάρτημα του εξοπλισμού που έχει πρόβλημα και τι πρέπει να αλλάχθει. Μας δίνει μόνο μια συνολική εικόνα. Το πως διαβάζουμε τα αποτελέσματα των κραδασμών και καταλαβαίνουμε ακριβώς τι συμβαίνει στον εξοπλισμό μας που ουσιαστικά είναι και το ζητούμενο της προβλεπτικής συντήρησης, θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο.



2.5 Μετασχηματισμός Fourier

Ο μετασχηματισμός Fourier είναι το πιο χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση κυμάτων σε σχέση με την ανάλυση κραδασμών σε έναν εξοπλισμό, ώστε να εντοπίσουμε ελαττώματα. Είναι μια μαθηματική πράξη που αποσυνθέτει μια κυματομορφή στο πεδίο του χρόνου στα συστατικά της στο πεδίο των συχνοτήτων.



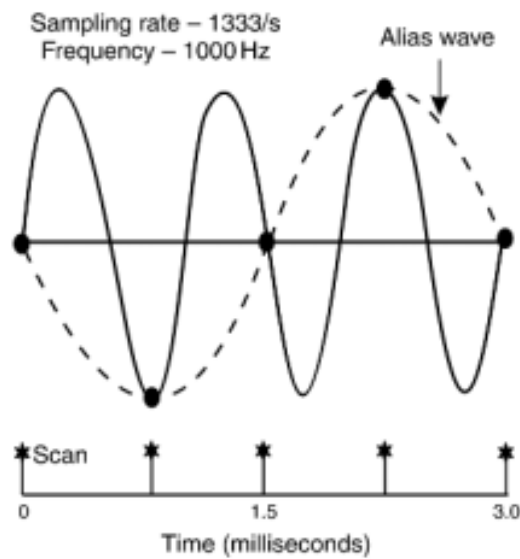
Εικόνα 2.5-1: Μετασχηματισμός Fourier από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η μέτρηση της ταλάντωσης γίνεται πάντα στο πεδίο του χρόνου όμως για την καλύτερη ανάλυση και κατανόησή της πρέπει να μετατραπεί στο πεδίο των συχνοτήτων. Άρα, πρόκειται για ένα υπολογισμό σε ένα μετρούμενο σήμα. Επομένως, μεγάλη σημασία έχει να καθορίσουμε αυτό το σήμα και να καθορίσουμε τη συχνότητα δειγματοληψίας. Η συχνότητα δειγματοληψίας θα καθοριστεί από τη θεωρία του Nyquist που αναφέρει:

Αν δεν θέλουμε να μην χάσουμε πληροφορία πρέπει να δειγματολήσουμε σε συχνότητες τουλάχιστον δυο φορές υψηλότερη από την υψηλότερη συχνότητα που μας ενδιαφέρει. Στην εικόνα 2.5.2 φαίνεται μια περίπτωση όπου η συχνότητα δειγματοληψίας δεν είναι διπλάσια της συχνότητας του σήματος. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ψευτο-συχνότητα και έχει ως αποτέλεσμα να χάνουμε πληροφορία.

Όλα τα προγράμματα, έτσι και αυτό που θα χρησιμοποιήσουμε για τα πειράματά μας, έχει φίλτρα που ονομάζονται anti-aliasing filters και εμποδίζουν το φαινόμενο των ψευτο-συχνοτήτων. Είναι, δηλαδή, φίλτρα που αφήνουν τις χαμηλές συχνότητες και μπλοκάρουν τις υψηλές.





Εικόνα 2.5-2: Παράδειγμα μικρής συχνότητας δειγματοληψίας

Άλλες λεπτομέρειες για την επεξεργασία του σήματος όπως:

- Αναλογική – ψηφιακή μετατροπή
- Υπέρθεση
- Παραθυροποίηση
- Τελική επεξεργασία σήματος
- Προβολή

δεν θα αναφερθούν στην παρούσα εργασία μιας και τα προγράμματα ανάλυσης τα κάνουν αυτόματα. Ακόμα, δεν θα γίνει περαιτέρω αναφορά στα μαθηματικά πίσω από τον μετασχηματισμό Fourier.





3 Διάγνωση σφαλμάτων εξοπλισμών με χρήση της ανάλυσης κραδασμών

Έχοντας αναλύσει σε προηγούμενα κεφάλαια τη φιλοσοφία της προβλεπτικής συντήρησης, τη θεωρία των ταλαντώσεων, των φασμάτων και τον μετασχηματισμό Fourier, ήρθε η ώρα να εξετάσουμε πώς όλα αυτά βοηθούν τον μελετητή να καταλάβει την κατάσταση ενός εξοπλισμού σε σχέση με τις βλάβες του.

Η πηγή των δονήσεων σε ένα εξοπλισμό προέρχεται κατά κύριο λόγο από σφάλματα στα εξαρτήματά του. Αυτά τα σφάλματα οφείλονται σε κακό σχεδιασμό – κακή κατασκευή, επισκευή – κακή κατάσταση μετά από ώρες λειτουργίας. Με άλλα λόγια, οι ατέλειες είναι πηγές δόνησης. Επομένως, γίνεται κατανοητό ότι ο μελετητής πρέπει να καταλάβει από πού προέρχεται η δόνηση που βλέπει και στη συνέχεια να καταλάβει πόσο σοβαρό είναι το πρόβλημα, ώστε να καθορίσει τις επόμενες ενέργειες στα πλαίσια της συντήρησης. Κάνοντας μια αναδρομή σε αυτά που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2.4 ότι τα δυο κύρια κριτήρια που ο μελετητής έχει για να κατανοήσει την ταλάντωση και στη συνέχεια την κατάσταση του εξοπλισμού είναι η συχνότητα εμφάνισης αλλά και το πλάτος. Πιο συγκεκριμένα, μπορούμε να πούμε ότι η συχνότητα εμφάνισης αποτελεί ένα στοιχείο ταυτοποίησης της πηγής και το πλάτος είναι το μέτρο δηλαδή η οξύτητά της.

Σκοπός του τρίτου κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει τις απαιτούμενες γνώσεις ώστε να μπορέσει ένα μελετητής να εξάγει συμπεράσματα από ένα φάσμα στο πεδίο των συχνοτήτων. Θα παρουσιαστούν στο παρόν κεφάλαιο διαγράμματα και θα γίνει ανάλυση για τα παρακάτω:

- Αξυγοσταθμία
- Εκκεντρότητα
- Λυγισμός άξονα
- Ανευθυγραμμία
- Χαλαρότητα
- Ελαττώματα σε έδρανα ολισθήσεως
- Ελαττώματα εδράνων κυλίσεως
- Ελαττώματα γραναζοκινισεων
- Προβλήματα κίνησης με ιμάντες
- Προβλήματα αεροδυναμικής και υδραυλικής φύσης
- Προβλήματα σε ηλεκτρικούς κινητήρες AC και DC
- Ρωγμές άξονα
- Φθορές άξονα





3.1 Αζυγοσταθμία

Η πιο συνηθισμένη κατηγορία δονήσεων που θα χρειαστεί να αντιμετωπίσει ένας μελετητής είναι οι δονήσεις αζυγοσταθμίας. Η αζυγοσταθμία εύκολα εντοπίζεται και εύκολα επιδιορθώνεται. Τι είναι όμως;

Αζυγοσταθμία είναι η άνιση κατανομή της μάζας γύρω από έναν άξονα μεταστροφής.

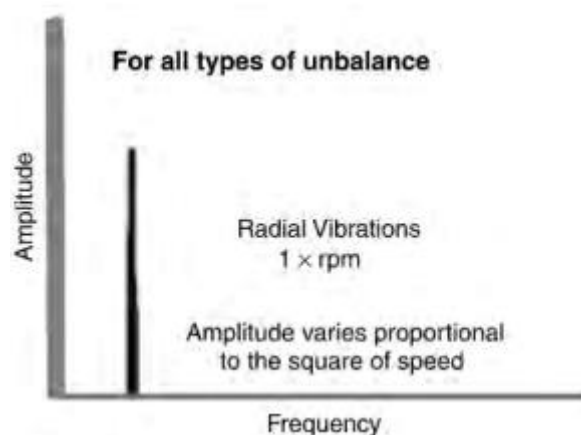
Για να μπορέσουμε να αναλύσουμε το φαινόμενο αυτό, θα εισάγουμε δυο έννοιες:

- Άξονας περιστροφής – είναι ο άξονας περιστροφής μιας μάζας αν δεν είχαμε τον περιορισμό που δημιουργούν τα ρουλεμάν, αλλιώς ονομάζεται άξονας αδράνειας.
- Άξονας συμμετρίας – είναι ο άξονας που χωρίζει τη μάζα μας σε δυο ίσα μέρη.

Όταν οι δυο παραπάνω άξονες δεν συμπίπτουν, τότε έχουμε αζυγοσταθμία. Έχουμε τέσσερα είδη αζυγοσταθμίας.

1. Στατική αζυγοσταθμία (άξονας περιστροφής και άξονας συμμετρίας είναι παράλληλοι)
2. Αζυγοσταθμία ζεύγους (άξονας περιστροφής και άξονας συμμετρίας τέμνονται στο κέντρο)
3. Δυναμική αζυγοσταθμία (άξονας περιστροφής και άξονας συμμετρίας δεν συμπίπτουν, δεν είναι παράλληλοι και δεν τέμνονται)
4. Αζυγοσταθμία προεξέχοντος ρότορα

Για όλα τα ήδη αζυγοσταθμίας που αναφέρθηκαν παραπάνω το διάγραμμα στο φάσμα των συχνοτήτων, από εδώ και πέρα θα ονομάζουμε διάγραμμα FFT, θα δείχνει σαν κυρίαρχη συχνότητα δόνησης την 1 x στροφές περιστροφής. Το πλάτος της ταλάντωσης θα είναι ανάλογο του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής και μεγαλώνει όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση άξονας περιστροφής και άξονας συμμετρίας. Το διάγραμμα FFT μοιάζει με αυτό της εικόνας 3.1-1.

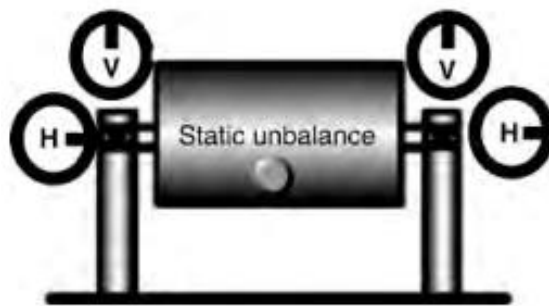


Εικόνα 3.1-1: Διάγραμμα FFT για την αζυγοσταθμία



3.1.1 Στατική αζυγοσταθμία

Στατική αζυγοσταθμία έχουμε όταν ο άξονας περιστροφής του σώματος και ο άξονας συμμετρίας είναι παράλληλοι. Είναι το πιο εύκολο είδος αζυγοσταθμίας για να αναγνωριστεί. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω μίας και όλες οι αζυγοσταθμίες έχουν το ίδιο διάγραμμα FFT έτσι και εδώ η μορφή που θα βρούμε είναι αυτής της εικόνας 3.1-1. Μάλιστα, αν μεταφέρουμε το σημείο μέτρησης ταλάντωσης από την κατακόρυφη θέση στην οριζόντια του ίδιου κουζινέτου και μετρήσουμε θα βρούμε διαφορά φάσης στην ταλάντωση 90° ενώ αν μεταφέρουμε από την οριζόντια θέση του ενός κουζινέτου στον άλλου θα έχουμε διαφορά φάσης στην ταλάντωση 0° αντίστοιχα συμβαίνει το ίδιο και στην κατακόρυφη θέση (Εικόνα 3.1-2).

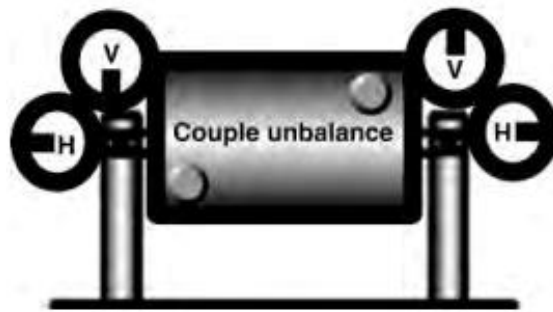


Εικόνα 3.1-2: Σχέση φάσεων ταλάντωσης σε οριζόντιο και κατακόρυφο σημείο μέτρησης

Στο σημείο αυτό θα κάνουμε μια μικρή αναφορά στα σημεία μέτρησης. Ένας άξονας που περιστρέφεται έχει τουλάχιστον δυο σημεία έδρασης. Σε αυτά μπορούμε να πάρουμε μέτρηση είτε οριζόντια είτε κατακόρυφα. Ο τρόπος με τον οποίο θα μετρήσουμε έχει να κάνει με τους βαθμούς ελευθερίας του σημείου που μετράμε αν είναι δηλαδή πλωτή ή σταθερή έδραση αλλά και από την ταλάντωση που περιμένουμε να έχουμε. Παρόλα αυτά, η καλύτερη μέθοδος είναι να παίρνουμε μετρήσεις σε όλες τις διευθύνσεις.

3.1.2 Αζυγοσταθμία ζεύγους

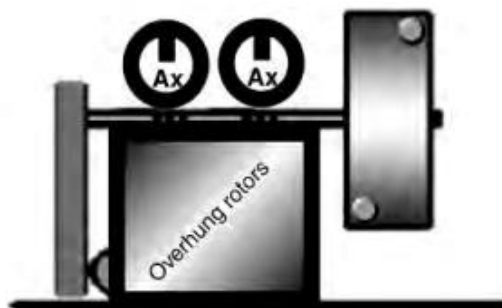
Αζυγοσταθμία ζεύγους έχουμε όταν άξονας περιστροφής και άξονας συμμετρίας τέμνονται στο κέντρο και σε αυτήν την περίπτωση το διάγραμμα FFT έχει την ίδια μορφή με αυτό της εικόνας 3.1-1. Η διαφορά φάσης της ταλάντωσης για την αζυγοσταθμία ζεύγους είναι για τον ίδιο άξονα 180° και στην οριζόντια και στην κατακόρυφη θέση μέτρησης.



Εικόνα 3.1-3: Σχέση φάσεων ταλάντωσης σε οριζόντιο και κατακόρυφο σημείο μέτρησης

3.1.3 Αζυγοσταθμία προεξέχοντος ρότορα

Τέλος και σε αυτήν την περίπτωση αζυγοσταθμίας η μορφή του διαγράμματος FFT απεικονίζεται στην εικόνα 3.1-1. Εδώ το πλάτος της ταλάντωσης είναι ανάλογο του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής. Αυτό το είδος αζυγοσταθμίας μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερα πλάτη ταλάντωσης και παρατηρείται συνήθως σε φτερωτές που έχουν συνήθως και αυτήν την έδραση εικόνα 3.1-4. Κατακόρυφα η φάση και στα δύο ρουλεμάν είναι ίδια ενώ οριζόντια τείνει να είναι ασταθής και να αλλάζει συνέχεια. Το συγκεκριμένο είδος ταλάντωσης έχει στοιχεία από την Στατική αζυγοσταθμία αλλά και Αζυγοσταθμία ζεύγους.



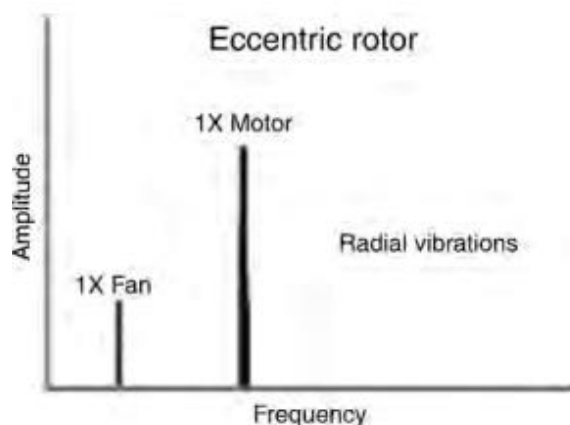
Εικόνα 3.1-4: Ιμαντοκίνηση φτερωτής σε προεξέχων ρότορα. Σχέση φάσης σε κατακόρυφο άξονα.





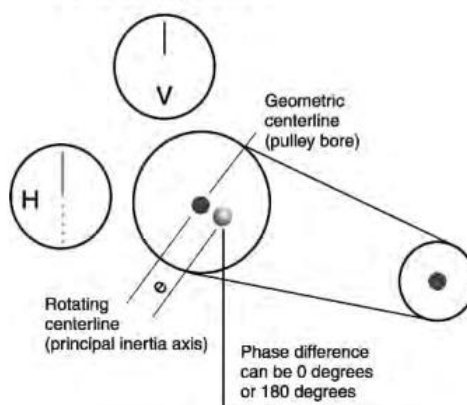
3.2 Εκκεντρότητα

Το φαινόμενο της εκκεντρότητας εμφανίζεται όταν ο άξονας περιστροφής και ο άξονας συμμετρίας ενός εξαρτήματος εξοπλισμού (π.χ τροχαλία, γρανάζι, ρουλεμάν) βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους λόγω σφάλματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε περισσότερο βάρος στη μια πλευρά του άξονα περιστροφής και το εξάρτημά μας να ταλαντώνεται. Το διάγραμμα FFT θα κυριαρχείται όπως και στην αζυγοσταθμία από την συχνότητα 1 x στροφές περιστροφής του εξαρτήματος που έχει εκκεντρότητα. Το πλάτος της ταλάντωσης σε αυτήν την περίπτωση ποικίλει ανάλογα με το σημείο μέτρησης ακόμα και με το φορτίο σε σταθερές στροφές.



Εικόνα 3.2-1: Διάγραμμα FFT για την εκκεντρότητα

Στην εκκεντρότητα όταν μετακινούμε το σημείο καταγραφής από την κατακόρυφη στην οριζόντια θέση η φάση αλλάζει κατά 0° ή 180° . Παρατηρώντας την εικόνα 3.2-2 θα δούμε ότι μια μικτή κινητήρια τροχαλία κινεί μια μεγαλύτερη τροχαλία με εκκεντρότητα. Η μεγαλύτερη ταλάντωση σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζεται στην κατεύθυνση του ιμάντα κίνησης. Μερικές φορές είναι δυνατόν να σβήνουμε μέρος της ταλάντωσης από την εκκεντρότητας μέσω ζυγοστάθμισης. Στην πραγματικότητα όμως αυτό που πετυχαίνουμε είναι να μειώσουμε την επίδραση στη μια μεριά αλλά να την μεγαλώσουμε στην ακτινική της κατεύθυνση.

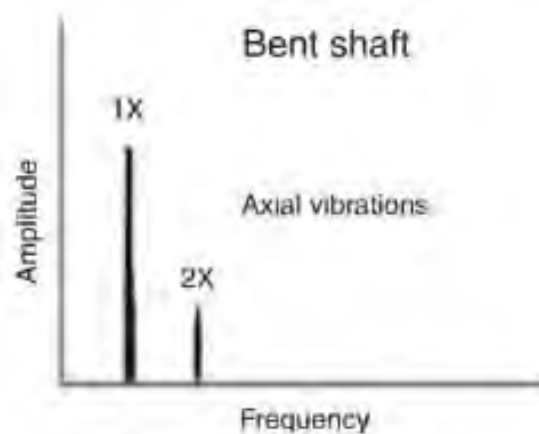


Εικόνα 3.2-2: Εκκεντρότητα ρότορα



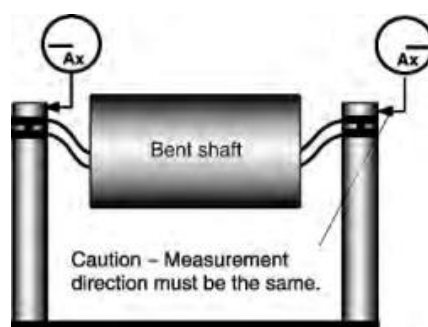
3.3 Λυγισμός άξονα

Ένας κυρτός άξονας μπορεί να προκαλέσει υπερβολικούς κραδασμούς σε ένα μηχάνημα ανάλογα με την θέση αλλά και το μέγεθος της κάμψης. Όπως και η εκκεντρότητα έτσι και το φαινόμενο που αναλύουμε σε αυτό το κεφάλαιο μπορεί να μπερδευτεί με την αζυγοσταθμία. Η ζυγοσταθμία μπορεί να μειώσει την ταλάντωση αυτού του φαινομένου όμως δεν μπορεί να το εξαλείψει. Στην εικόνα 3.3-1 βλέπουμε το διάγραμμα FFT που δημιουργείται όταν έχουμε το συγκεκριμένο πρόβλημα. Κυριαρχείται από τη στυγνότητα 1 x στροφές περιστροφής και συχνότητα 2 x στροφές περιστροφής. Το πλάτος της στυγνότητας 1 x στροφές περιστροφής είναι μεγαλύτερο όταν έχουμε λυγισμό κοντά στο κέντρο του άξονα, ενώ όταν στο διάγραμμα κυριαρχεί το πλάτος της συχνότητας 2 x στροφές περιστροφής, τότε ο λυγισμός είναι κοντά στις εδράσεις του άξονα.



Εικόνα 3.3-1: Διάγραμμα FFT για λυγισμό σε άξονα κοντά στο κέντρο του

Αξονικά, η αλλαγή φάσης μεταξύ των δυο ρουλεμάν είναι 180° . Ακόμα, αν πάρουμε πολλές μετρήσεις στο ίδιο ρουλεμάν στην αξονική κατεύθυνση θα βρούμε ότι διαφορά φάσης 180° θα έχουμε και στις μετρήσεις που πήραμε από τη δεξιά – αριστερή μεριά του ρουλεμάν αλλά και από την πάνω και κάτω της ίδιας πλευράς. Τέλος, το πρόβλημα λογισμού σε άξονα παρουσιάζεται πολύ συχνά σε ηλεκτρικούς κινητήρες. Όταν ο κινητήρας ανεβάζει θερμοκρασία ο άξονας λυγίζει και η ταλάντωση ανεβαίνει. Όταν ο κινητήρας κρυώσει ο άξονας επανέρχεται στην κανονική του μορφή.



Εικόνα 3.3-1: Διαφορά φάσης 180° στην αξονική διεύθυνση

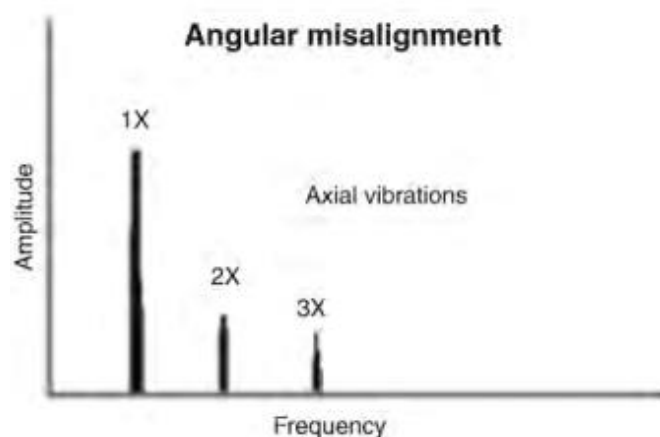
3.4 Ανευθυγραμμία

Η Ανευθυγραμμία όπως και η αζυγοσταθμία είναι οι κύριοι λόγοι δημιουργίας κραδασμών σε εξοπλισμούς. Τα υψηλά επίπεδα ανευθυγραμμίας οδηγούν σε αύξηση των κραδασμών και αυτοί με την σειρά τους σε πρόωρη αστοχία ακριβών εξαρτημάτων εξοπλισμών. Επιπρόσθετα, η κακή ευθυγράμμιση είναι μια από τις κυρίες αιτίες αστοχίας των ρουλεμάν. Υπάρχουν βασικά δυο τύποι ανευθυγραμμίας με τα δικά τους ξεχωριστά χαρακτηριστικά:

1. Γωνιακή ανευθυγραμμία: οι αξονικές γραμμές των δυο αξόνων έχουν μια γωνία μεταξύ τους
2. Παράλληλη ανευθυγραμμία: οι αξονικές γραμμές των δυο αξόνων είναι παράλληλες μεταξύ τους όμως δεν συμπίπτουν έχουν μια απόσταση.

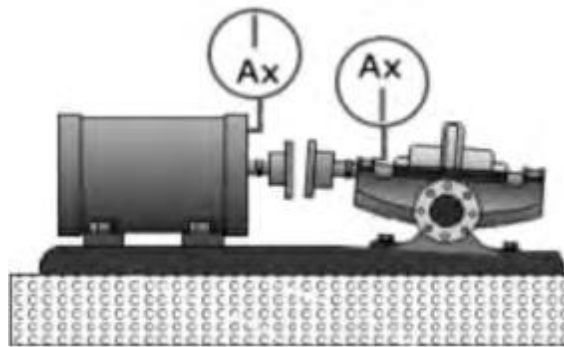
3.4.1 Γωνιακή ανευθυγραμμία

Η γωνιακή ανευθυγραμμία υποβάλει τους άξονες του κινητήρα και του κινητήριου εξοπλισμού σε αξονικές δονήσεις με συχνότητα 1 x στροφές περιστροφής. Όμως είναι πολύ σπάνιο στην πραγματικότητα να έχουμε μόνο γωνιακή ανευθυγραμμία και το διάγραμμα FFT να κυριαρχείται από την συχνότητα 1 x στροφές περιστροφής. Στην εικόνα 3.4.1 βλέπουμε ένα τυπικό διάγραμμα αυτού του είδους προβλήματος. Επομένως, ο μελετητής πρέπει να περιμένει υψηλό πλάτος ταλάντωσης στη συχνότητα 1 x στροφές περιστροφής και λίγο χαμηλότερο στην 2 x στροφές περιστροφής. Πολλές φορές έχουμε την εμφάνιση της συχνότητας 3 x στροφές περιστροφής και αυτό υποδηλώνει προβλήματα και στην σύζευξη των δυο αξόνων (χαλαρότητες, προβλήματα στο κόμπλερ).



Εικόνα 3.4-1: Διάγραμμα FFT για γωνιακή ανευθυγραμμία

Μετρώντας αξονικά τα ρουλεμάν του κινητήρα και του κινητήριου εξοπλισμού (μπροστά και πίσω από το κόμπλερ) παρατηρούμε μια διαφορά φάσης 180°.

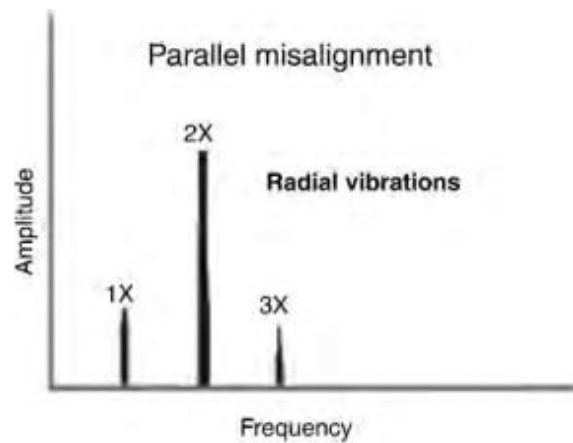


Εικόνα 3.4-2: Διαφορά φάσης 180° στις αξονικές μετρήσεις στην γωνιακή ανευθυγραμμία

Παρατηρώντας τα διαγράμματα της εικόνας 3.4.1 και της 3.3.1, που αναφέρονται στα διαγράμματα FFT της γωνιακής ανευθυγραμμίας και του λογισμού άξονα αντίστοιχα, εύκολα γίνεται κατανοητό ότι έχουν μεγάλη ομοιότητα. Για να μπορέσουμε να καταλάβουμε ποια περίπτωση είναι αυτή της μέτρησής μας πρέπει να προχωρήσουμε σε ανάλυση φάσης. Σε ένα εξοπλισμό με λογισμό άξονα θα παρατηρήσουμε διαφορά φάσης στα ρουλεμάν του ιδίου άξονα ενώ στην περίπτωση της γωνιακής ανευθυγραμμίας, η διαφορά φάσης είναι ορατή στα ρουλεμάν εκατέρωθεν του κόμπλερ.

3.4.2 Παράλληλη ανευθυγραμμία

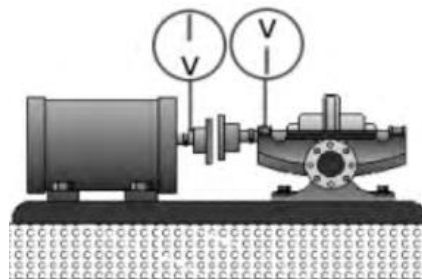
Η παράλληλη ανευθυγραμμία υποβάλλει τους άξονες του κινητήρα και του κινητήριου εξοπλισμού σε ακτινικές δονήσεις με συχνότητα 2 x στροφές περιστροφής. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.4.1 της αξονικής ανευθυγραμμίας έτσι και εδώ είναι πολύ σπάνιο να έχουμε μόνο παράλληλη ανευθυγραμμία. Συνήθως παρατηρούμε και τα δύο είδη μαζί με ένα από αυτά να υπερθέτει. Όταν η παράλληλη ανευθυγραμμία είναι αυτή που ξεχωρίζεις, το τυπικό διάγραμμα FFT που περιμένουμε είναι αυτό της εικόνας 3.4.3. Πρέπει να περιμένουμε υψηλό πλάτος ταλάντωσης στις συχνότητες 1 x στροφές περιστροφής και 2 x στροφές περιστροφής. Όμως σ' αυτήν την συχνότητα 2 x στροφές περιστροφής έχει πολύ μεγαλύτερο πλάτος.



Εικόνα 3.4-3: Διάγραμμα FFT για παράλληλη ανευθυγραμμία

Μετρώντας ακτινικά τα ρουλεμάν του κινητήρα και του κινητήριου εξοπλισμού (μπροστά και πίσω από το κόμπλερ) παρατηρούμε μια διαφορά φάσης 180° , εικόνα 3.4.4.

Όταν είτε η παράλληλη ανευθυγραμμία, είτε η γωνιακή ανευθυγραμμία αλλά είτε και οι δυο μαζί γίνονται πολύ σοβαρές τότε έχουμε μεγάλα πλάτη ταλάντωσης και σε άλλες αρμονικές της ταχύτητας περιστροφής πχ 3 x στροφές περιστροφής, 4 x στροφές περιστροφής, 5 x στροφές περιστροφής μπορεί όμως και πολύ παραπάνω. Ακόμα σε αυτές τις ακραίες περιπτώσεις το είδος του κόμπλερ μπορεί να επηρεάσει το σχήμα του φάσματος που θα έχουμε.



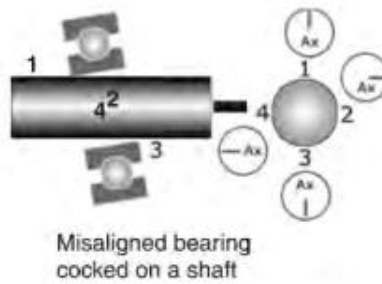
Εικόνα 3.4-4: Διαφορά φάσης 180° στις αξονικές μετρήσεις στην παράλληλη ανευθυγραμμία

3.4.3 Ανευθυγραμμία ρουλεμάν σε άξονα

Η ανευθυγραμμία δεν εμφανίζεται μόνο μεταξύ δυο αξόνων στην σύνδεσή τους με κόμπλερ. Πολλές φορές τα ρουλεμάν στις εδράσεις ενός άξονα δεν είναι πλήρως ευθυγραμμισμένα με αυτόν. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές αξονικές δονήσεις. Η δόνηση που εμφανίζεται έχει διαφορά φάσης όταν μετράμε αξονικά στο ρουλεμάν 180° πάνω με κάτω σε αυτό και την ίδια διαφορά φάσης με πριν δηλαδή 180° μπροστά με πίσω. Το διάγραμμα FFT αυτής της περίπτωσης θα έχει μεγάλο πλάτος ταλάντωσης στην συχνότητα 1 x στροφές περιστροφής και 2 x στροφές περιστροφής. Κάθε προσπάθεια ευθυγράμμισης ή ζυγοστάθμισης του συγκεκριμένου άξονα δεν θα



βοηθήσει και το μόνο που θα πετύχει είναι να κάνει χειρότερα τα πράγματα. Η μόνη λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η αλλαγή του προβληματικά τοποθετημένου ρουλεμάν.



Εικόνα 3.4-5: Διαφορά φάσης σε λάθος τοποθετημένο ρουλεμάν





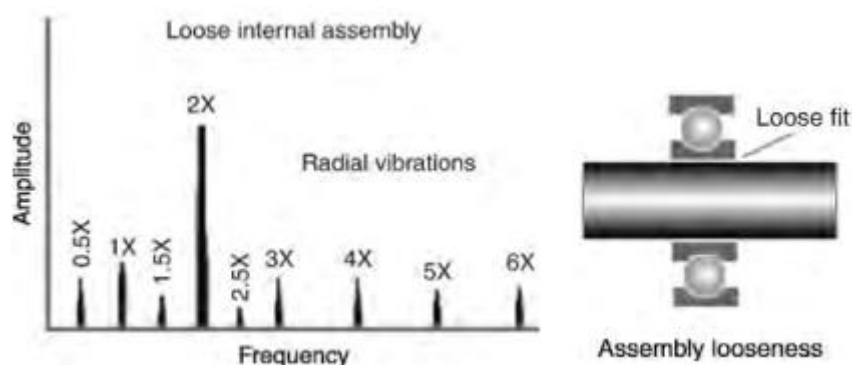
3.5 Χαλαρότητα

Το φαινόμενο της χαλαρότητας αν και θεωρητικά είναι ένα από τα πιο εύκολα να αναγνωριστεί, γιατί αμέσως κάποιος θα πει «έχουμε ελέγξει όλες τις βίδες – είναι όλα καλά σφιγμένα», στην πραγματικότητα είναι ένα από τα πιο πολύπλοκα και δύσκολα. Υπάρχουν τρία είδη χαλαρότητας σε έναν εξοπλισμό. Κάθε ένα έχει το δικό του διάγραμμα FFT, τη δική του διαφορά φάσης άλλα και τα δικά του μοναδικά χαρακτηριστικά. Τα είδη χαλαρότητας είναι τα παρακάτω:

- Χαλαρότητες εσωτερικά του εξοπλισμού
- Χαλαρότητα μεταξύ της βάσης και του εξοπλισμού
- Δομικές χαλαρότητες

3.5.1 Χαλαρότητες εσωτερικά του εξοπλισμού

Αυτό το είδος χαλαρότητας αναφέρεται σε προβλήματα μεταξύ ενός ρουλεμάν και του άξονά του ή μιας φτερωτής και του άξονά της. Δημιουργείται, δηλαδή, από τη λάθος συναρμογή μεταξύ δυο ανταλλακτικών σε ένα εξοπλισμό (φθορά σε άξονες, κατεστραμμένα έδρανα). Το διάγραμμα FFT που παρατηρούμε σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πολύ δυσνόητο λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου. Μεγάλα πλάτη ταλάντωσης εμφανίζονται στη συχνότητα 1 x στροφές περιστροφής και στις αρμονικές τους. Η φάση είναι τελείως ασταθής χωρίς κάποιο μοτίβο όπως σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις. Μάλιστα, μπορεί να αλλάξει από μέτρηση σε μέτρηση και από εκκίνηση του εξοπλισμού σε εκκίνηση ανάλογα με το πού θα σταματήσει το προβληματικό ανταλλακτικό. Έχουν παρατηρηθεί και περιπτώσεις όπου έχουμε υπό-αρμονικές, όπως πχ 1/2 x στροφές περιστροφής ή 1*1/2 x στροφές περιστροφής. Σε αυτό το είδος χαλαρότητας ο μελετητής πρέπει με μεγάλη προσοχή να εντοπίσει ποιο είναι αυτό το κομμάτι του εξοπλισμού που γυρνάει με τις συγκεκριμένες στροφές, που αναγνωρίζει με μεγάλο πλάτος στο διάγραμμα FFT και στην συνέχεια να προχωρήσει σε οπτικό έλεγχο ώστε να βρει το σφάλμα.

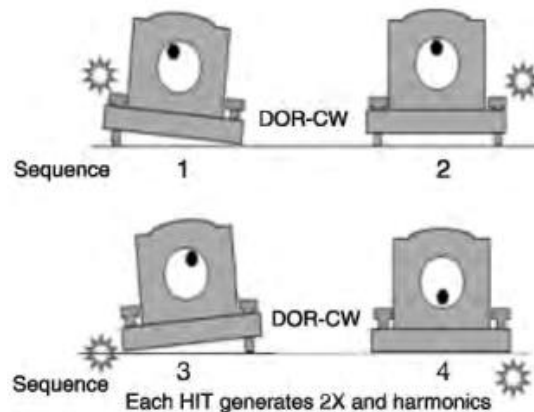


Εικόνα 3.5-1: Διάγραμμα FFT για χαλαρότητα εσωτερικά σε εξοπλισμό – χαλαρότητα σε έδραση ρουλεμάν

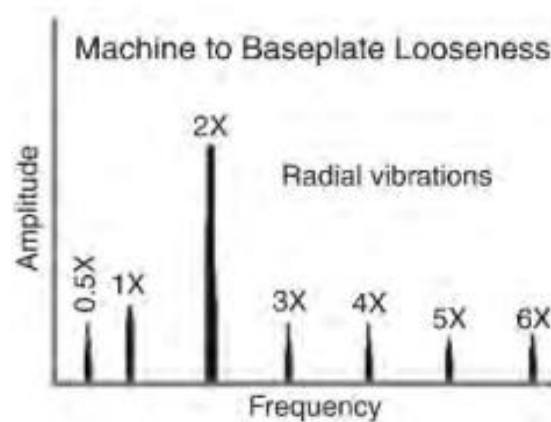


3.5.2 Χαλαρότητα μεταξύ της βάσης και του εξοπλισμού

Αυτό το είδος χαλαρότητας σχετίζεται με χαλαρά μπουλόνια σε κουζινέτο ρουλεμάν ή ρωγμές στο σώμα της έδρας – κουζινέτο. Σε αυτήν την περίπτωση όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.5-2 κάθε χτύπημα παράγει ταλάντωση με μεγάλο πλάτος και συχνότητα 2 x στροφές περιστροφής, επίσης έχουμε και την εμφάνιση των υπόλοιπων αρμονικών. Το διάγραμμα FFT παρουσιάζεται στην εικόνα 3.5-3



Εικόνα 3.5-2: Χαλαρότητα μεταξύ βάσης και εξοπλισμού λόγω χαλαρών μπουλονιών.

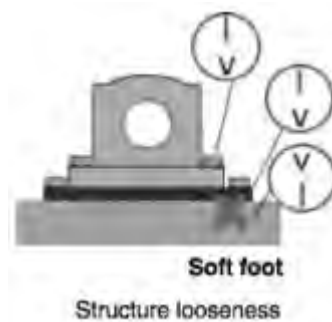


Εικόνα 3.5-3: Διάγραμμα FFT Χαλαρότητα μεταξύ βάσης και εξοπλισμού

Τέλος, για αυτό το είδος χαλαρότητας πρέπει να συμπληρώσουμε ότι μόνο του δεν είναι ικανό να εμφανίσει συμπτώματα ταλάντωσης στον εξοπλισμό εκτός και αν υπάρχουν και άλλα ελαττώματα όπως π.χ. ανευθυγραμμία ή αζυγοσταθμία. Έτσι εύκολα γίνεται κατανοητό ότι, μιας και τα διαγράμματα FFT του ελαττώματος του κεφαλαίου και των προηγούμενων που αναφέρθηκαν καθιστούν δύσκολο να μπορέσουμε να κάνουμε ευθυγράμμιση ή ζυγοστάθμιση αν δεν εξαλείψουμε πρώτα το πρόβλημα της χαλαρότητας.

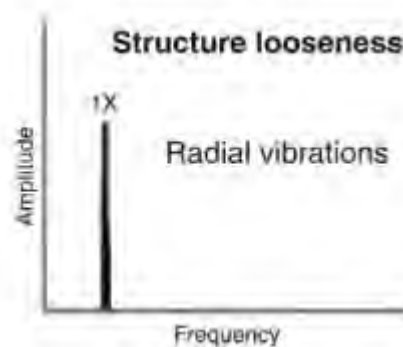
3.5.3 Δομικές χαλαρότητες

Αυτό το είδος χαλαρότητας σχετίζεται με δομικές χαλαρότητες ή προβλήματα στην βάση του εξοπλισμού όπως κατεστραμμένη θεμελίωση βάσης, κατεστραμμένα πόδια στήριξης εξοπλισμού (Soft foot), κομμένες – κατεστραμμένες αγκυρώσεις. Η δόνηση που εμφανίζεται έχει διαφορά φάσης 180° για κάθετες μετρήσεις στα πόδια και στην ίδια την βάση του εξοπλισμού.



Εικόνα 3.5-4: Διαφορά φάσης σε δομική χαλαρότητα

Στη δομική χαλαρότητα το διάγραμμα FFT που εμφανίζεται έχει τη μορφή της εικόνας 3.5-5. Έχουμε την εμφάνιση ταλάντωσης με μεγάλο πλάτος στην συχνότητα $1x$ στροφές περιστροφής. Ένα από τα πιο κοινά ευρήματα σε αυτήν την κατηγορία, εκτός από την καταστροφή της θεμελίωσης και το κόψιμο των αγκυρώσεων που είναι δύσκολο να συμβούν άλλα όχι απίθανο, είναι το λεγόμενο Soft foot. Το παρατηρούμε κυρίως σε κινητήρες όπου μας εμφανίζεται μια δόνηση μεταξύ του κινητήρα και του κινούμενου σώματος που μοιάζει πιο πολύ σε αζυγοσταθμία. Ακόμα και αν ζυγοσταθμίσουμε τον κινούμενο εξοπλισμό η ταλάντωση δεν σταματάει να υπάρχει. Για την αποφυγή αυτού το φαινομένου υπάρχουν εμπειρικοί τρόποι επίλυσης αλλά και πιο σύγχρονοι με τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού. Ουσιαστικά η φιλοσοφία επίλυσης εμπεριέχει τη χαλάρωση των ποδιών του κινητήρα ένα προς ένα και την παρατήρηση στην αλλαγή της ταλάντωσης. Το πόδι που δεν επηρεάζει την ταλάντωση είναι το προβληματικό και πρέπει να τοποθετηθούν προσθήκες για να σταθεροποιηθεί.

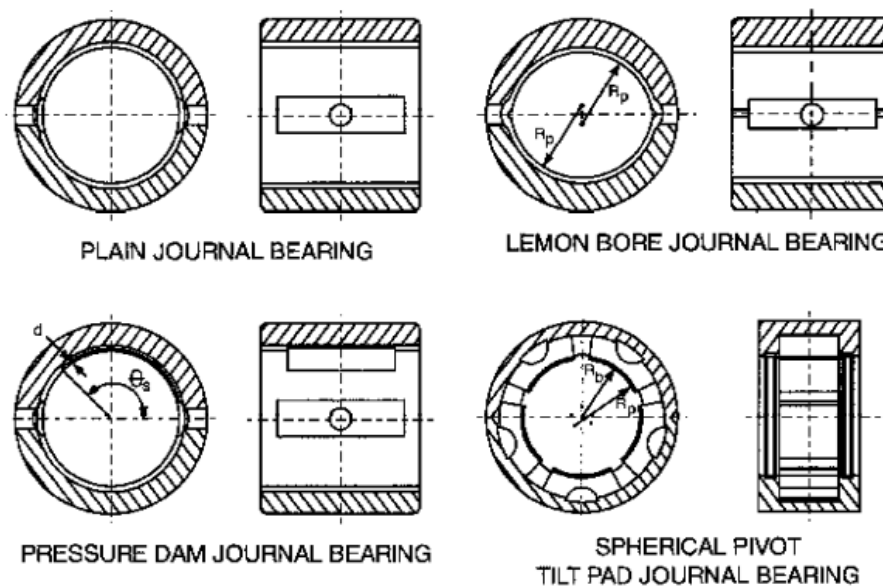


Εικόνα 3.5-5: Διάγραμμα FFT δομικής χαλαρότητας



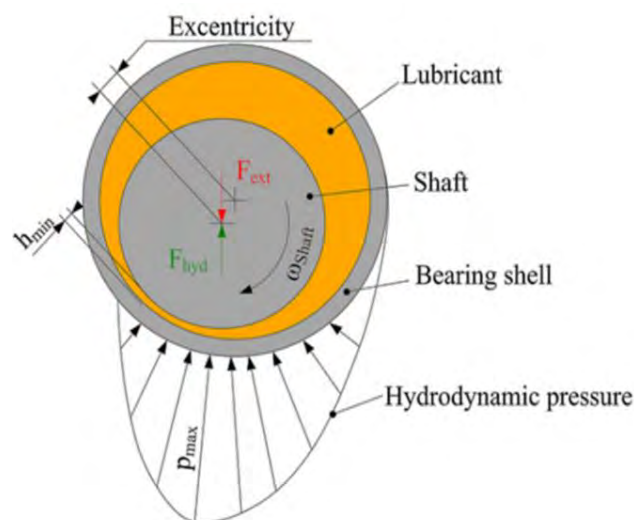
3.6 Ελαττώματα σε έδρανα ολισθήσεως

Τα έδρανα ολισθήσεως ονομάζονται αλλιώς υδραυλικά έδρανα (τεχνικά πιο σωστή ονομασία), έδρανα με χιτώνιο ή έδρανα υδραυλικού φιλμ. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία αυτών των εδράνων, μερικά από αυτά φαίνονται στην εικόνα 3.6-1.



Εικόνα 3.6-1: Διάφορα έδρανα ολισθήσεως

Τα έδρανα ολισθήσεως λειτουργούν αναπτύσσοντας ένα φιλμ λιπαντικού, μεταξύ του περιστρεφόμενου άξονα και της σταθερής οπής – έδρασης. Στο σχήμα 3.6-2 φαίνεται το υδροδυναμικό προφίλ πίεσης που αναπτύσσεται σε αυτά τα ρουλεμάν αλλά και πώς αυτό κατανέμεται σε σχέση με τον περιστρεφόμενο άξονα. Στην εικόνα 3.6-2 ο άξονας περιστρέφεται ορολογικά και η μέγιστη πίεση εμφανίζεται περίπου 15° - 20° αριστερά της κάθετης.



Εικόνα 3.6-2: Κατανομή πίεσης σε έδρανο ολίσθησης





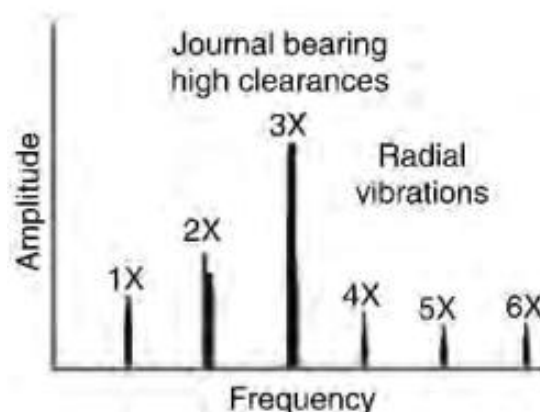
Στα έδρανα ολισθήσεως έχουμε τρεις κατηγορίες προβλημάτων. Κάθε μια έχει το δικό της διάγραμμα FFT αλλά και τα δικά της μοναδικά χαρακτηριστικά. Τα προβλήματα που εμφανίζουν τα έδρανα ολισθήσεως είναι:

- Μεγάλο διάκενο μεταξύ του άξονα και της έδρας
- Αστάθεια από στροβιλισμούς λαδιού
- Αστάθεια λόγω σοβαρών στροβιλισμών λαδιού
- Αστάθεια από ελλειπές φιλμ λαδιού

3.6.1 Μεγάλο διάκενο μεταξύ του άξονα και της έδρας

Όπως κάθε μηχανολογικός εξοπλισμός έτσι και τα έδρανα ολίσθησης παρουσιάζουν φθορά. Μέσω της ανάλυσης κραδασμών μπορούμε να βρούμε και να αξιολογήσουμε αυτή την φθορά.

Στα τελευταία στάδια της φθοράς σε ένα έδρανο ολίσθησης έχουμε την εμφάνιση μιας ολόκληρης σειράς αρμονικών που φτάνουν έως και το 15-20 * ταχύτητα περιστροφής. Το διάγραμμα FFT μοιάζει πάρα πολύ με αυτό της χαλαρότητας και φαίνεται στην εικόνα 3.6-3. Όταν σε αυτό το είδος έδρασης έχουμε εκτεταμένες φθορές έστω και μια μικρή ανευθυγραμμία ή αζυγοσταθμία μπορούν να προκαλέσουν μεγάλα πλάτη ταλάντωσης. Αυτό οφείλεται στη μείωση της ακαμψίας του φιλμ λαδιού λόγω των μεγάλων διακενων που έχει το έδρανο.



Εικόνα 3.6-3: Διάγραμμα FFT σε έδρανο ολίσθησης με διάκενα εκτός προδιαγραφής

Στο σημείο αυτό είναι πολύ σημαντικό να αναφέρουμε ότι τα έδρανα ολίσθησης συνήθως αστοχούν μέσα σε λίγα λεπτά ή ακόμα και δευτερόλεπτα από την στιγμή που παρουσιάζουνε αστάθεια. Σε εκείνες όμως τις περιπτώσεις όπου η φθορά λαμβάνει χώρα για μεγάλο χρονικό διάστημα και τα χαρακτηριστικά του φιλμ λαδιού αλλάζουν και παρουσιάζεται αστάθεια στο σύστημα, η ανάλυση κραδασμών μπορεί να βοηθήσει ώστε να βρεθεί το πρόβλημα και να μην έχουμε αστοχία.

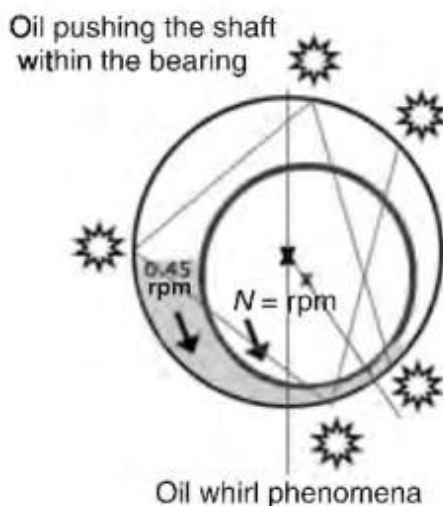


3.6.2 Αστάθεια από στροβιλισμούς λαδιού

Η αστάθεια από στροβιλισμούς λαδιού είναι μια δόνηση που διεγείρεται από το φιλμ λαδιού. Εμφανίζεται σε εξοπλισμούς με εδράνα ολίσθησης σε κύκλωμα λαδιού υπό πίεση που λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες.

Στο σημείο αυτό θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε τη φιλοσοφία λειτουργίας των εδράνων ολίσθησεως. Θεωρούμε έναν άξονα που περιστρέφεται με ταχύτητα περιστροφής N . Η ταχύτητα περιστροφής του εδράνου είναι 0 και του λαδιού που σφηνώνεται μεταξύ του άξονα και του εδράνου είναι $N*0,5$. Υπό φυσιολογικές συνθήκες το φιλμ λαδιού σπρώχνει τον ρότορα σε γωνία 20° σε σχέση με το κέντρο του εδράνου και έτσι δημιουργείται μια έκκεντρη σφήνα σε σχήμα «μισοφέγγαρου» που δημιουργεί επαρκή πίεση για να κρατήσει τον ρότορα ανυψωμένο στην θέση του. Το προφίλ της πίεσης παρουσιάστηκε στην αρχή αυτού το κεφαλαίου στην εικόνα 3.6-2. Έτσι, υπό κανονικές συνθήκες ο ρότορας μένει στη θέση του χωρίς κραδασμούς.

Όμως κάποιες συνθήκες θα τείνουν να δημιουργήσουν πίεση στο φιλμ λαδιού πολύ μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για να συγκρατηθεί ο άξονας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε αυξημένη φθορά και η εκκεντρότητα του εδράνου μας κατεβαίνει προκαλώντας μείωση στην πίεση του λαδιού αλλά και στη θερμοκρασία του. Έχοντας αλλάξει τις συνθήκες του φιλμ θα έχουμε και τον άξονα σε άλλη θέση. Αυτό θα συνεχιστεί ξανά και ξανά. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται στροβιλισμός λαδιού και είναι ασταθές. Η εικόνα 2.6-4 απεικονίζει το φαινόμενο.



Εικόνα 3.6-4: Αστάθεια από στροβιλισμό λαδιού

Το φαινόμενο αυτό εμφανίζει κραδασμούς σε συχνότητες $0,42 - 0,48$ *στροφές περιστροφής. Αυτό είναι σε κρίσιμο σημείο όταν το πλάτος της μετατόπισης στις παραπάνω συχνότητες είναι στο 50% της ανοχής του εδράνου ολίσθησεως. Τέλος, το φαινόμενο μπορεί να εξαλειφθεί αλλάζοντας την πίεση λειτουργίας ή το ιξώδες του λαδιού.



3.6.3 Αστάθεια από σοβαρούς στροβιλισμούς λαδιού

Αστάθεια από σοβαρούς στροβιλισμούς λαδιού μπορεί να έχουμε σε ένα εξοπλισμό που υπόκειται σε στροβιλισμούς λαδιού όταν η συχνότητα στροβιλισμών συμπίπτει με τη φυσική συχνότητα συντονισμού. Όταν ένας άξονας μπαίνει σε σοβαρούς στροβιλισμούς λαδιού τότε το πλάτος της ταλάντωσης που μπορεί να κάνει είναι ίσο με την ανοχή του εδράνου. Αν δεν διορθωθεί γρήγορα το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να προκαλέσει καταστροφή του εδράνου και αστοχία του εξοπλισμού.

3.6.4 Αστάθεια από ελλιπή φιλμ λαδιού

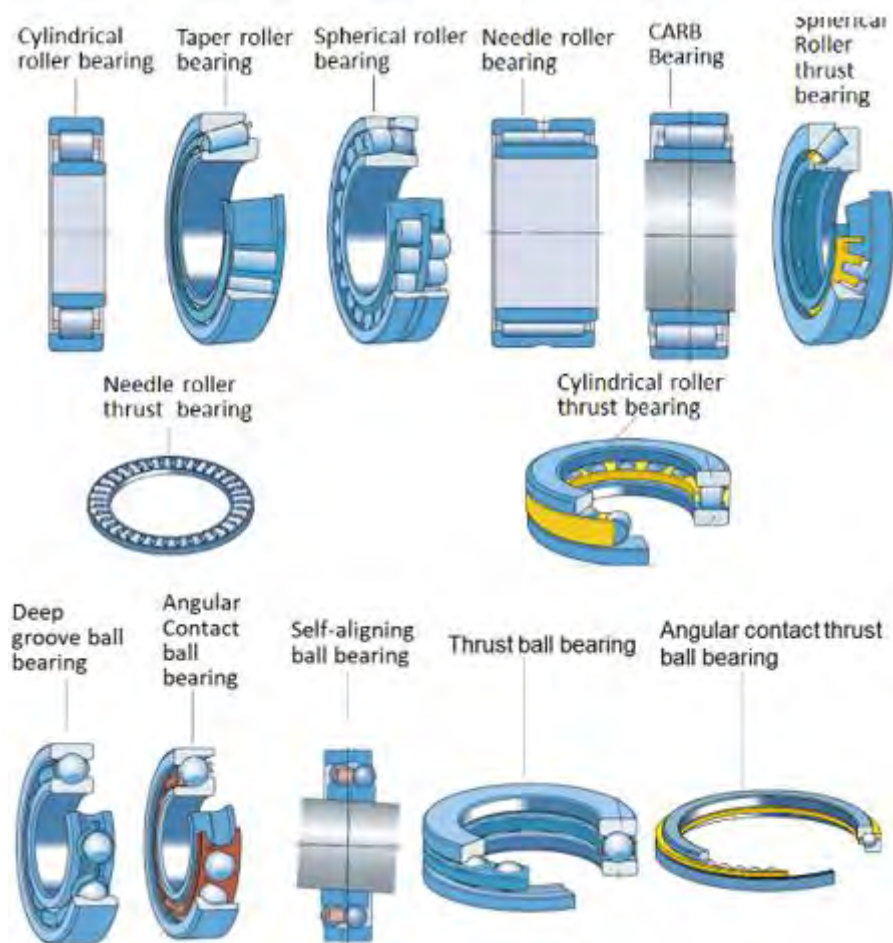
Η ανεπαρκής ή η ακατάλληλη λίπανση μπορεί να προκαλέσει κραδασμούς σε ένα έδρανο ολισθήσεως. Αυτό συμβαίνει επειδή η έλλειψη λίπανσης έχει ως αποτέλεσμα την τριβή μεταξύ του άξονα και του εδράνου. Η δόνηση θα τείνει να διεγείρει και άλλα μέρη του εξοπλισμού. Αυτή η δόνηση είναι παρόμοια με την κίνηση ενός υγρού δαχτύλου πάνω σε ένα τζαμί. Αυτός ο κραδασμός είναι γνωστός και ως αστάθεια από ελλιπή φιλμ λαδιού ή ξηρή δόνηση. Ο κραδασμός είναι γενικά σε υψηλές συχνότητες και μπορεί να υπάρχουν και αρμονικές. Η φάση της δεν έχει κανένα νόημα για την παρακολούθηση.





3.7 Ελαττώματα εδράνων κυλίσεως

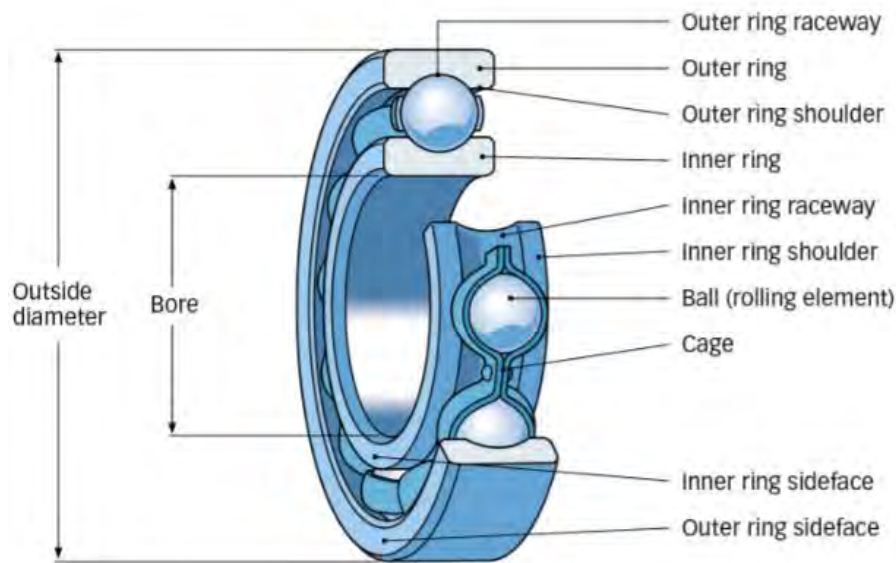
Τα έδρανα κυλίσεως ονομάζονται αλλιώς και ρουλεμάν. Υπάρχει μια πολύ μεγάλη ποικιλία ρουλεμάν που το καθένα έχει τα δικά του ειδικά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, ας πάρουμε το πρώτο ρουλεμάν της εικόνας 3.7-1 που έχει για σώματα κύλισης κυλίνδρους. Το συγκεκριμένο ρουλεμάν της εικόνας μπορεί να παραλάβει μεγάλα ακτινικά φορτία αλλά καθόλου αξονικά. Έτσι, ανάλογα με το σκοπό που θα επιτελέσει το ρουλεμάν στην κατασκευή που θα δουλέψει επιλέγεται και ο κατάλληλος τύπος.



Εικόνα 3.7-1: Τύποι εδράνων κυλίσεως

Πάρα τα πολλά είδη των εδράνων κυλίσεως, όλα έχουν κοινά χαρακτηριστικά. Τα ρουλεμάν έχουν μια εξωτερική και μια εσωτερική διάμετρο που τα καθορίζει. Έχουν ένα εσωτερικό και ένα εξωτερικό δαχτυλίδι, τα σώματα κύλισης και ένα κλωβό που τα κρατάει. Τα βασικά μέρη και χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω μαζί με επιπλέον πληροφορίες παρουσιάζονται στην εικόνα 3.7-2.





Εικόνα 3.7-2: Βασικά μέρη και χαρακτηριστικά ενός εδράνου κολλήσεως

Στα μέρη των εδράνων που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορεί να προκύψουν ελαττώματα που θα προκαλέσουν κραδασμούς υψηλής συχνότητας. Οι συχνότητες ελαττωμάτων στα ρουλεμάν δεν είναι αρμονικές της ταχύτητας περιστροφής όπως σε όλες τις περιπτώσεις που μέχρι τώρα αναλύσαμε. Είναι μοναδικές για κάθε είδος ρουλεμάν και μπορούμε να τις υπολογίσουμε. Οι τύποι υπολογισμού παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω.

$BPFO = f_{outer} = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \phi \right) (\alpha)$	Συχνότητα διέλευσης σφαιρών στον εξωτερικό δακτύλιο (BallPass Frequency Outer race)
$BPFI = f_{inner} = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \phi \right) (\beta)$	Συχνότητα διέλευσης σφαιρών στον εσωτερικό δακτύλιο (BallPass Frequency Inner)
$BSF = f_{ball} = f_r \frac{PD}{BD} \left[1 - \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \phi \right)^2 \right] (\gamma)$	Συχνότητα περιστροφής σφαιρών (Ball Spin Frequency)
$FTF = f_{cage} = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \phi \right) (\delta)$ - Cage	Συχνότητα περιστροφής κλωβού (Fundamental Train Frequency)

Όπου n ο αριθμός σφαιρών του ρουλεμάν, f_r η συχνότητα περιστροφής του άξονα, BD είναι η διάμετρος των σωμάτων κύλισης, PD η απόσταση των κέντρων δυο αντιδιαμετρικών στοιχείων κύλισης και τέλος το ϕ είναι η γωνία επαφής του σώματος κύλισης με τα δακτυλίδια του ρουλεμάν.



Οι κατασκευαστές των ρουλεμάν δίνουν για κάθε ένα από τα ρουλεμάν που κατασκευάζουν τους τέσσερις παραπάνω αριθμούς BPFO, BPFI, BSF, FTF έτοιμους για πολλαπλασιασμό μόνο με την ταχύτητα περιστροφής. Για παράδειγμα, το ρουλεμάν N220 από την SKF έχει:

- $BPFI = 9.13 * RPM$
- $BPFO = 6.86 * RPM$
- $BSF = 3.43 * RPM$
- $FTF = 0.43 * RPM$

Έτσι, όταν μια ατέλεια σε κάποιο από τα μέρη ενός εδράνου γίνει πολύ μεγάλη τότε θα παρατηρήσουμε τη συχνότητα του στο διάγραμμα FFT να έχει μεγάλο πλάτος. Παραδειγματικά, αν έχουμε εκτεταμένη φθορά στο εσωτερικό δαχτυλίδι του ρουλεμάν τότε η συχνότητα διέγερσης σφαιρών στο εσωτερικό δαχτυλίδι πολλαπλασιασμένη με την ταχύτητα περιστροφής θα φαίνεται με μεγάλη συχνότητα στο διάγραμμα FFT. Πιο συγκεκριμένα, όμως, η φθορά ενός ρουλεμάν εξελίσσεται σε τέσσερα στάδια τα οποία θα παρουσιαστούν με λεπτομέρεια παρακάτω.

3.7.1 Πρώτο στάδιο φθοράς εδράνου κυλίσεως

Το διάγραμμα FFT ενός ρουλεμάν μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα διακριτά μέρη όπου ο μελετητής μπορεί να παρατηρήσει διάφορες όσο η φθορά του ρουλεμάν προχωράει. Τα μέρη αυτά ονομάζονται ζώνες φθοράς και είναι:

- Ζώνη Α: Στροφές επιστροφής του εξοπλισμού μας και οι αρμονικές.
- Ζώνη Β: Συχνότητες ελαττωμάτων ρουλεμάν (80Hz - 500Hz)
- Ζώνη Γ: Ιδιοσυχνότητες εξαρτημάτων ρουλεμάν (500Hz – 2000Hz)
- Ζώνη Δ : Υψηλές συχνότητες (2000Hz και πάνω)

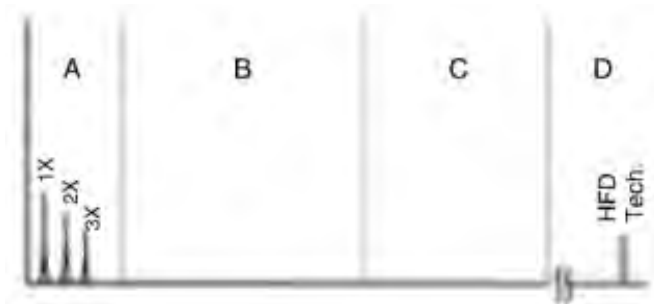
Στο πρώτο στάδιο φθοράς οι συχνότητες που παράγονται είναι στο φάσμα των 20-60 kHz. Πρόκειται για συχνότητες που αξιολογούνται με άλλες τεχνικές και δεν είναι ζητούμενο αυτής της εργασίας. Στην εικόνα 3.7-3 βλέπουμε τον εσωτερικό δακτύλιο ενός ρουλεμάν. Παρατηρούμε ότι δεν έχει ορατά ελαττώματα. Το μόνο που παρατηρούμε είναι ο δακτύλιος αλλά και οι μπίλιες (που δεν είναι στην εικόνα) έχουν χάσει την λάμψη τους σε σύγκριση με ένα καινούργιο.



Εικόνα 3.7-3: Πολύ μικρά ελαττώματα στην επιφάνεια του εσωτερικού δακτυλιδιού



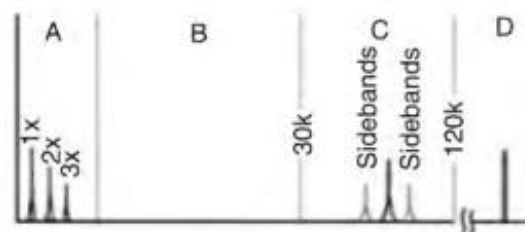
Το διάγραμμα FFT στο πρώτο στάδιο είναι καθαρό. Παρατηρούνται η συχνότητα περιστροφής και οι αρμονικές της με χαμηλό πλάτος και όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην Δ ζώνη οι συχνότητες των μικρών ελαττωμάτων.



Εικόνα 3.7-4: Διάγραμμα FFT για μικρό ελαττώματα σε ρουλεμάν

3.7.2 Δεύτερο στάδιο φθοράς εδράνου κυλίσεως

Στο δεύτερο στάδιο η θαμπάδα που παρατηρήθηκε στο προηγούμενο στάδιο σιγά σιγά αρχίζει να κάνει αποκολλήσεις υλικού. Υπάρχουν πολύ μικροί κρατήρες, δηλαδή, όπως φαίνεται στο αριστερό κομμάτι της εικόνας 3.7-5. Κάθε φορά που μια μπίλια περνάει από αυτόν τον κρατήρα ξεκινάει να ταλαντώνει τα εξαρτήματα του ρουλεμάν στην ιδιοσυχνότητά τους. Αυτοί οι κραδασμοί εμφανίζονται στην ζώνη Γ. Ανάλογα με την σοβαρότητα και το μέγεθος των αποκολλήσεων έχουμε και την εμφάνιση πλευρικών συχνοτήτων γύρω από την κύρια συχνότητα.

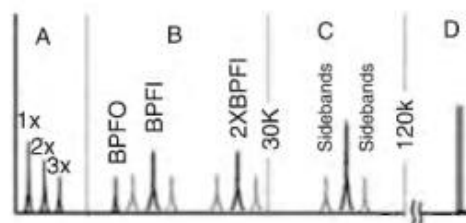


Εικόνα 3.7-5: Απαρχή αποκολλήσεων και δημιουργίας κρατήρων – διάγραμμα FFT για μικρές αποκολλήσεις



3.7.3 Τρίτο στάδιο φθοράς εδράνου κυλίσσεως

Καθώς μπαίνουμε στο τρίτο στάδιο οι διακριτές συχνότητες που δείξαμε στην αρχή αυτού το κεφαλαίου αρχίζουν να εμφανίζονται στο διάγραμμα FFT. Ακόμα έχουμε και την εμφάνιση αρμονικών σε αυτές τις συχνότητες. Η φθορά στα ρουλεμάν είναι πλέον ορατή και επεκτείνεται ανάλογα με την σοβαρότητα ακόμα και σε όλο το δακτυλίδι. Αυτό που πριν ήταν πολύ μικρές αποκλίσεις τώρα είναι βαθιές εγκάρσιες σχεδόν τομές. Στο σημείο αυτό δεν μπορούμε να κάνουμε εκτίμηση για τον χρόνο ζωής που θα έχει το ρουλεμάν και συνήθως συνίσταται η αντικατάστασή του. Μια καλή εκτίμηση, εφόσον έχουμε μεγάλο όγκο δεδομένων σε συγκεκριμένο εξοπλισμό, για την κατάσταση του ρουλεμάν μπορούμε να έχουμε παρακολουθώντας το πλάτος της ταλάντωσης. Όσο μεγαλύτερο το πλάτος τόσο πιο άσχημα είναι τα πράγματα.



Εικόνα 3.7-6: Οι αποκολλήσεις μεγαλώνουν και ποια είναι ευδιάκριτες – οι συχνότητες του ρουλεμάν εμφανίζονται στο διάγραμμα FFT

3.7.4 Τέταρτο στάδιο φθοράς εδράνου κυλίσσεως

Στην τελική φάση οι εγκάρσιες αποκολλήσεις που παρατηρήσαμε στην φάση τρία τώρα συγχωνεύονται όλες μαζί δημιουργώντας μια πολύ τραχιά επιφάνεια στα δακτυλίδια του ρουλεμάν αλλά και στις μπίλιες. Το ρουλεμάν είναι τώρα σε πολύ κακή κατάσταση. Αυτή η κατάσταση απεικονίζεται στο ρουλεμάν με μεγάλα διάκενα, αύξηση του θορύβου κατά την περιστροφή αλλά και αύξηση της θερμοκρασίας.

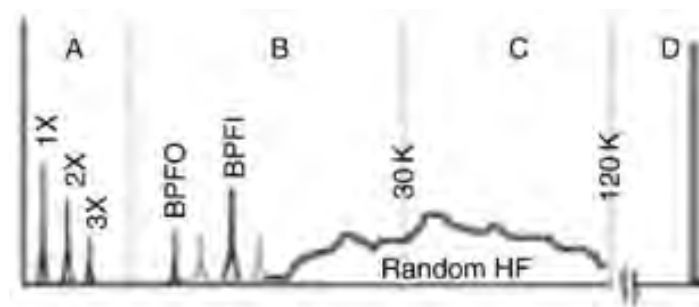


Εικόνα 3.7-7: Κατεστραμμένο ρουλεμάν στο τελικό στάδιο φθοράς



Σε αυτό το στάδιο φθοράς το διάγραμμα FFT γεμίζει με πάρα πολύ θόρυβο. Οι 1 x στροφές επιστροφής αλλά και όλες οι χαρακτηριστικές συχνότητες του ρουλεμάν εμφανίζονται πια με πολύ μεγάλο πλάτος. Οι τελευταίες συγχωνεύονται με τις ιδιοσυχνότητες του ρουλεμάν και δημιουργούν ένα κομμάτι τυχαίων συχνοτήτων στην περιοχή B και C. Λίγο πριν την αστοχία, όλα τα παραπάνω ανεβαίνουν σε πολύ μεγάλα πλάτη.

Αν παρόλα αυτά το ρουλεμάν αφεθεί να δουλεύει στο εξοπλισμό τότε θα αρχίσει να δονείται υπερβολικά, ο κλωβός θα σπάσει και τα στοιχεία κύλισης θα χαλαρώσουν και θα ακουμπήσει το ένα το άλλο. Πιθανότατα θα περιστραφούν και στον άξονά τους και θα σέρνονται πάνω στους κλωβούς. Τελικά, θα συγκολληθούν μεταξύ τους και με τους κλωβούς ως ότου ο εξοπλισμός σταματήσει από υπερφόρτωση. Αυτό κατά πάσα πιθανότητα θα προκαλέσει πολύ σημαντική ζημιά και στον άξονα.



Εικόνα 3.7-8: Διάγραμμα FFT για τελικό στάδιο φθοράς ρουλεμάν



3.8 Ελαττώματα γραναζοκινήσεων

Σε ένα ακόμα κομμάτι που η ανάλυση κραδασμών μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό ελαττωμάτων είναι η μετάδοση κίνησης με γρανάζια. Τα ελαττώματα που μπορούμε να εντοπίσουμε εντάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Φθορά οδόντωσης
- Αυξημένο φορτίο οδόντωσης
- Εκκεντρότητα γραναζιών – υπερβολική χάρη συμπλεξης (backlash)
- Ανευθυγραμμία γραναζιών
- Ραγισμένη – σπασμένη οδόντωση

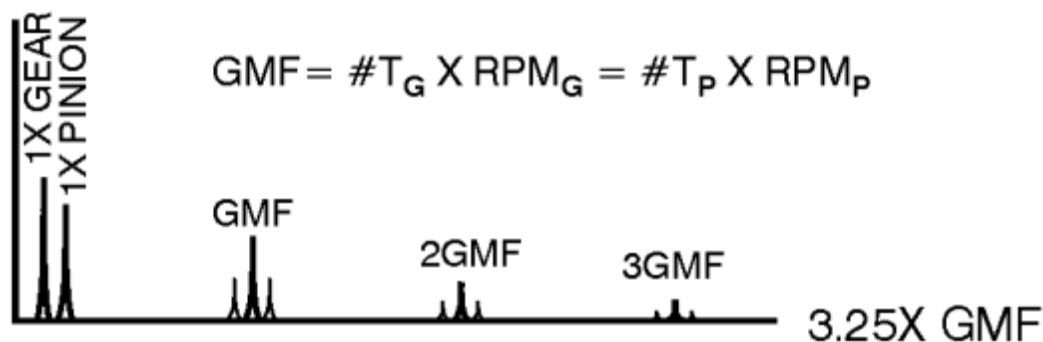
Άλλα φαινόμενα που μπορούμε να συναντήσουμε στην ενότητα αυτή, αλλά δεν θα αναλυθούν μιας και είναι φαινόμενα κατασκευαστικά είναι τα:

- Πρόβλημα Hunting Tooth
- Χαλαρότητα στην έδραση του άξονα

Η βασική συχνότητα που βοηθάει στην αξιολόγηση της κατάστασης των γραναζιών μιας γραναζοκίνησης είναι η αποκαλούμενη συχνότητα σύμπλεξης γραναζιών ή όπως θα την αποκαλούμε για ευκολία στη συνέχεια αυτής της εργασίας GMF (gear mesh frequency). Η GMF υπολογίζεται από το γινόμενο:

αριθμός δοντιών γραναζιού x συχνότητα περιστροφής άξονα

Στο σημείο αυτό είναι πολύ σημαντικό να επισημάνουμε ότι η GMF δεν είναι συχνότητα σφάλματος όπως συμβαίνει στα ρουλεμάν που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Όλες οι γραναζοκινήσεις παράγουν τη συγκεκριμένη συχνότητα που μπορούμε να την χαρακτηρίσουμε ως την υπογραφή τους. Αυτή η υπογραφή εμφανίζει και κάποιες πλευρικές συχνότητες γύρω από την κύρια. Αν τα γρανάζια της γραναζοκίνησης μας είναι σε καλή κατάσταση (χωρίς φθορές και σπασίματα) ευθυγραμμισμένα και με την κατάλληλη χάρη σύμπλεξης η GMF και οι αρμονικές της μαζί με τις πλευρικές συχνότητες θα πρέπει να είναι χαμηλού πλάτους. Στην εικόνα 3.8-1 απεικονίζεται ένα φυσιολογικό διάγραμμα FFT μιας γραναζοκίνησης που δεν αντιμετωπίζει κάποιο πρόβλημα.



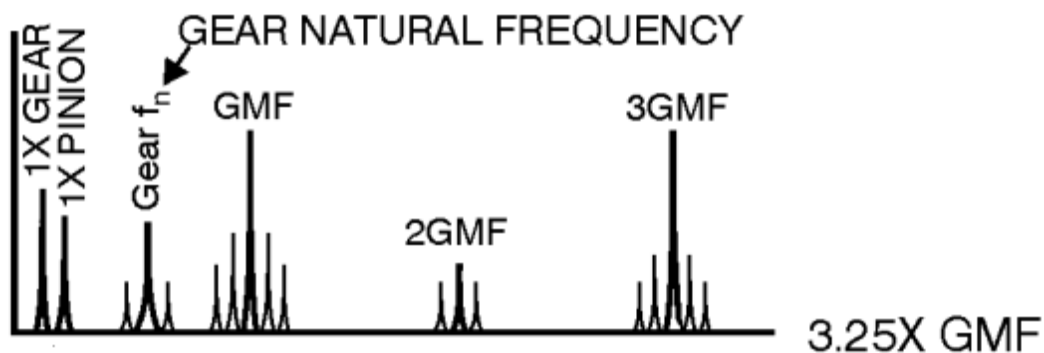
Εικόνα 3.8-1: Διάγραμμα FFT για μια γραναζοκίνηση





3.8.1 Φθορά οδόντωσης

Όταν έχουμε εκτεταμένη φθορά στην οδόντωση μιας γραναζοκίνησης το πρώτο που παρατηρούμε είναι η εμφάνιση της ιδιοσυχνότητας του γραναζιού και μάλιστα με κάποιες πλευρικές συχνότητες. Η απόσταση αυτών των πλευρικών συχνοτήτων από την κύρια συχνότητα είναι ίδια με την συχνότητα περιστροφής του φθαρμένου γραναζιού. Όσον αφορά την GMF δεν παρατηρούμε συνήθως αλλαγή στο πλάτος της αν και αυτό δεν αποκλείεται να συμβεί, εκεί που παρατηρούμε αλλαγή είναι στο πλάτος των πλευρικών συχνοτήτων της GMF το οποίο μεγαλώνει. Άρα μπορούμε να πούμε ότι για την φθορά του γραναζιού καλύτερος δείκτης είναι οι πλάγιες συχνότητες παρά η ίδια η GMF. Στην εικόνα 3.8-2 παρατηρούμε ένα τυπικό διάγραμμα FFT για φθορά οδόντωσης.



Εικόνα 3.8-2: Διάγραμμα FFT για φθορά οδόντωσης

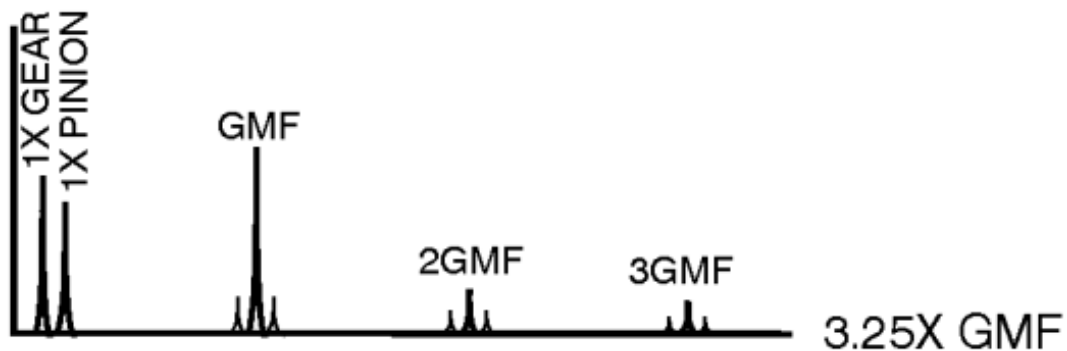
3.8.2 Αυξημένο φορτίο οδόντωσης

Στην περίπτωση που έχουμε αύξηση του φορτίου σε μια οδόντωση δηλαδή μεταφέρουμε την μέγιστη ροπή που τα γρανάζια είναι σχεδιασμένα να μεταφέρουν τότε είναι πολύ πιθανό να έχουμε και αύξηση του πλάτους της GMF. Όμως ο μελετητής πρέπει να γνωρίζει ότι αυξημένο πλάτος GMF δεν σημαίνει αυτομάτως πρόβλημα στην γραναζοκίνηση όταν μάλιστα οι πλάγιες συχνότητες είναι χαμηλού πλάτους.

Για να μπορέσουμε να διαπιστώσουμε υπερφόρτωση της γραναζοκίνησης που μετράμε είναι υποχρεωτικό να έχουμε πρώτα ένα μεγάλο όγκο δεδομένων – μετρήσεων από την συγκεκριμένη γραναζοκίνηση και δεύτερο να έχουμε κάνει και κάποιες μετρήσεις σε μέγιστο φορτίο ώστε να έχουμε το μέτρο σύγκρισης.

Η μέτρηση κραδασμών σε γραναζοκινήσεις δεν είναι μια εύκολη διαδικασία γιατί ο θόρυβος από την λειτουργία του μειωτήρα αλλά και η θέση μέτρησης που δεν είναι πάντα εύκολα προσβάσιμη κάνουν εύκολα τον μελετητή να βγάξει εσφαλμένα συμπεράσματα. Στην εικόνα 3.8-3 παρατηρούμε ένα τυπικό διάγραμμα FFT για αυξημένο φορτίο σε οδόντωση.

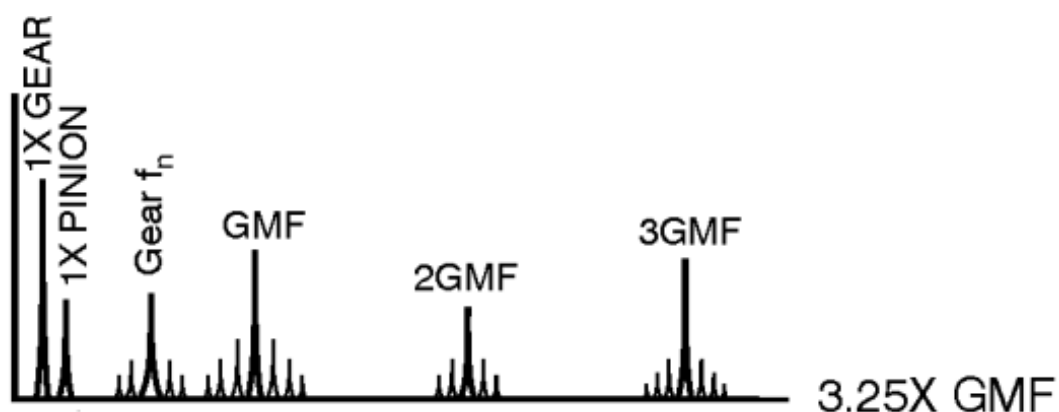




Εικόνα 3.8-3: Διάγραμμα FFT για αυξημένο φορτίο σε οδόντωση

3.8.3 Εκκεντρότητα γραναζιών – υπερβολική χάρη σύμπλεξης

Σε περιπτώσεις εκκεντρότητας ή υπερβολικής χάρη στη σύμπλεξη έχουμε την αύξηση του πλάτους της συχνότητας GMF αλλά και των πλάγιων συχνοτήτων. Η απόσταση των πλάγιων συχνοτήτων υποδηλώνει την ταχύτητα περιστροφής του άξονα που έχουμε το πρόβλημα. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση της υπερβολικής χάρη στη σύμπλεξη έχουμε όπως προαναφέραμε την αύξηση του πλάτους της GMF αλλά έχουμε και την εμφάνιση της ιδιοσυχνότητας των γραναζιών με πλάγιες συχνότητες στα 1 x στροφές επιστροφής. Όταν η χάρη σύμπλεξης είναι λάθος τότε το GMF που έχουμε παρατηρήσει θα μειωθεί όταν αυξήσουμε το φορτίο μεταφοράς της οδόντωσης. Στην εικόνα 3.8-4 παρατηρούμε ένα τυπικό διάγραμμα FFT για εκκεντρότητα οδόντωσης και υπερβολική χάρη σύμπλεξης. Στο σημείο αυτό είναι καλό να αναφέρουμε ότι πολύ χρήσιμα συμπεράσματα μπορούμε να βγάλουμε και από την ταλάντωση στο φάσμα του χρόνου που είναι όπως έχουμε πει και σε προηγούμενο κεφάλαιο η πηγή για την δημιουργία του FFT. Έτσι, στην περίπτωση της εκκεντρότητας η ταχύτητα περιστροφής του ενός γραναζιού μπορεί να κάνει τα δυο πλάτη ταλάντωσης να συμπίπτουν μεταξύ τους.



Εικόνα 3.8-4: Διάγραμμα FFT για εκκεντρότητα οδόντωσης και υπερβολική χάρη σύμπλεξης

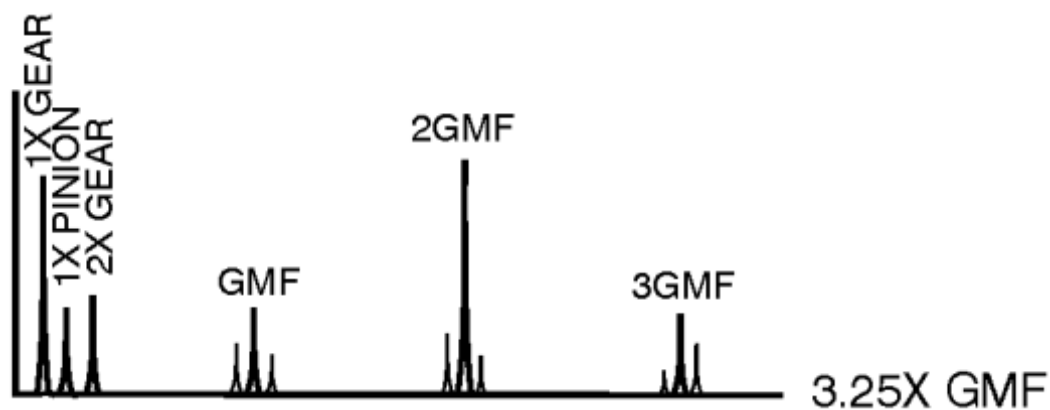




3.8.4 Ανευθυγραμμία γραναζιών

Η ανευθυγραμμία στα γρανάζια σχεδόν πάντα είναι αυτή που διεγείρει την δεύτερη αρμονική της GMF με πλάγιες συχνότητες. Συχνά ο μελετητής θα βρει 1 x GMF με μικρό πλάτος ταλάντωσης και 2 x GMF ή και 3 x GMF με πολύ μεγαλύτερο πλάτος. Πολύ σημαντικό όταν προσπαθούμε να βρούμε την ύπαρξη ανευθυγραμμίας σε μια γραναζοκίνηση είναι να φροντίσουμε η μέγιστη συχνότητα καταγραφής $F_{\max}$ να είναι μεγαλύτερη από το 3 x GMF.

Εύκολα μπορούμε να αναγνωρίσουμε την ανευθυγραμμία γραναζιών παρατηρώντας και τις πλευρικές συχνότητες της 2 αρμονικής της GMF και μετρώντας τις αποστάσεις μεταξύ τους που πρέπει να είναι ίση με 2 x συχνότητα περιστροφής. Τέλος, ένα ακόμα δείγμα του ότι τα γρανάζια μας λειτουργούν σε ανευθυγραμμία είναι ότι οι πλάγιες συχνότητες της GMF αλλά και των αρμονικών της δεν είναι ίδια κατανεμημένες σε κάθε μεριά της GMF λόγω της άνισης φθοράς που έχει δημιουργήσει στα δόντια των γραναζιών η ανευθυγραμμία. Στην εικόνα 3.8-5 παρατηρούμε ένα τυπικό διάγραμμα FFT ανευθυγραμμία γραναζιών.



Εικόνα 3.8-5: Διάγραμμα FFT για ανευθυγραμμία γραναζιών

3.8.5 Ραγισμένη – σπασμένη οδόντωση

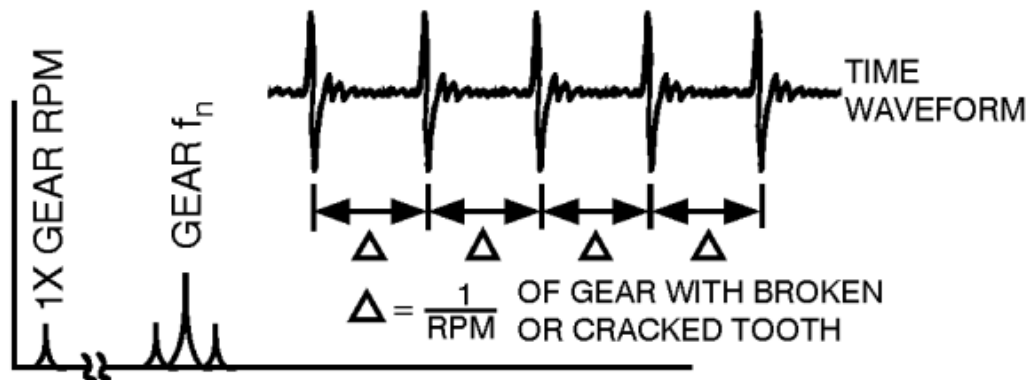
Η περίπτωση σπασμένου δοντιού – κομμάτι αυτού αν και ακούγεται ακραία δεν είναι σπάνιο φαινόμενο. Κρουστικά φορτία καταστρέφουν το φιλμ λαδιού που υπάρχει μεταξύ των δοντιών με αποτέλεσμα η μεταλλική επιφάνεια του ενός δοντιού να ακουμπάει στο άλλο. Αν τώρα η οδόντωση το γραναζιού μας έχει επιφανειακή βαφή η παραπάνω διαδικασία μπορεί να προκαλέσει αποκόλληση της επιφάνειας επαφής.

Ένα σπασμένο δόντι για ένα μελετητή θα προκαλέσει μεγάλο πλάτος στη συχνότητα 1 x στροφές επιστροφής. Αυτό όμως θα φανεί μόνο στο πεδίο του χρόνου. Στο πεδίο των συχνοτήτων δηλαδή στο διάγραμμα FFT θα εμφανιστεί η ιδιοσυχνότητα του γραναζιού με αυξημένο πλάτος και πλάγιες συχνότητες με αποστάσεις τη συχνότητα περιστροφής. Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση βλάβης είναι καλύτερο να εξετάζουμε την





ταλάντωση στο πεδίο του χρόνου. Εκεί θα δούμε την εμφάνιση μιας κορυφής κάθε φορά που το κατεστραμμένο δόντι συνεργάζεται με το αντίστοιχο του συνεργαζόμενου γραναζιού. Ο χρόνος μεταξύ των κορυφών είναι 1/στροφές επιστροφής του γραναζιού με το προβληματικό δόντι. Το πλάτος του παλμού στο πεδίο του χρόνου είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό της συχνότητας 1 x στροφές επιστροφής του γραναζιού στο διάγραμμα FFT. Στην εικόνα 3.8-6 παρατηρούμε ένα τυπικό διάγραμμα FFT ραγισμένης ή σπασμένης οδόντωσης. Ακόμα, βλέπουμε το ίδιο διάγραμμα στο πεδίο του χρόνου όπου απεικονίζεται καλύτερα ο παλμός του σπασίματος.



Εικόνα 3.8-5: Διάγραμμα FFT σπασμένη -ραγισμένη οδόντωση, απεικόνιση του παλμού στο πεδίο του χρόνου





3.9 Προβλήματα κίνησης με ιμάντες

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία εξοπλισμών που κινούνται από ιμάντα. Κάποιοι έχουν από την φύση της λειτουργίας τους, πολλούς κραδασμούς, όπως για παράδειγμα οι παλινδρομικοί αεροσυμπιεστές αλλά και άλλοι που πρέπει να λειτουργούν με το χαμηλότερο επίπεδο δονήσεων όπως οι εργαλειομηχανές. Πάρα τη διαφορετικότητα των μηχανών με ιμάντα η μεγάλη πλειοψηφία αυτών λειτουργεί χωρίς κραδασμούς αν προσέξουμε τα παρακάτω:

- Ευθυγραμμία των τροχαλιών
- Ομοκεντρότητα των τροχαλιών
- Μέθοδος κατασκευής των τροχαλιών και σωστή συναρμολόγηση

Ψάχνοντας βαθιά στους παραπάνω παράγοντες που προκαλούν κραδασμούς σε ιμαντοκινήσεις καταλήγουμε στα προβλήματα που ένας μελετητής κραδασμών μπορεί να εντοπίσει μέσω της ανάλυσης ταλαντώσεων. Τα ελαττώματα αυτά εντάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Φθαρμένοι, χαλαροί ή λάθος τοποθετημένοι ιμάντες
- Ανευθυγραμμία ιμάντα τροχαλίας
- Εκκεντρότητα τροχαλιών
- Συντονισμός ιμάντα

3.9.1 Φθαρμένοι, χαλαροί ή λάθος τοποθετημένοι ιμάντες

Όπως και σε κάθε άλλη περίπτωση που έχουμε μελετήσει στα προηγούμενα κεφάλαια έτσι και εδώ έχουμε μια συχνότητα βλάβης. Στην προκειμένη περίπτωση την ονομάζουμε συχνότητα ιμάντα και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Belt Freq.} = \frac{(3.142)(\text{Pulley RPM})(\text{Pulley Pitch Dia.})}{\text{Belt Length}}$$

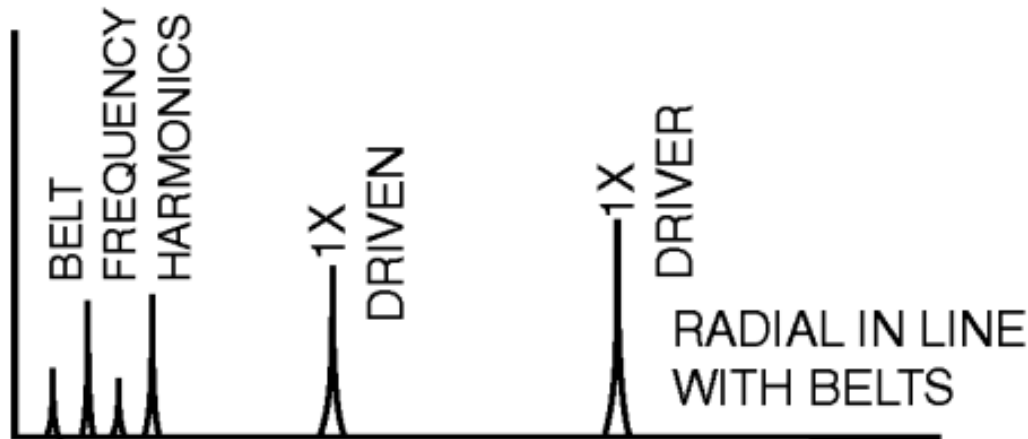
Εύκολα γίνεται κατανοητό παρατηρώντας τον τύπο ότι η συχνότητα του ιμάντα είναι μικρότερη της συχνότητας περιστροφής της τροχαλίας.

Όταν έχουμε κάποιο πρόβλημα στην ιμαντοκίνηση όπως για παράδειγμα φθαρμένους, χαλαρούς, λανθασμένα τοποθετημένους ιμάντες ή φθαρμένες τροχαλίες τότε έχουμε την εμφάνιση αρμονικών της συχνότητας ιμάντα. Παρουσιάζονται 4 x της συχνότητας του ιμάντα με τις περισσότερες φορές η 2x συχνότητα ιμάντα να έχει το μεγαλύτερο πλάτος. Γενικά το πλάτος της συχνότητας του ιμάντα και των αρμονικών της είναι ευμετάβλητο. Στην εικόνα 3.9-1 παρατηρούμε ένα τυπικό διάγραμμα FFT φθαρμένου ή χαλαρού ιμάντα. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε για τις ιμαντοκινήσεις ότι





διάμετρος τροχαλίας 1 x στροφές περιστροφής τροχαλίας 1 = διάμετρος τροχαλίας 2 x στροφές περιστροφής τροχαλίας 2.



Εικόνα 3.9-1: Διάγραμμα FFT φθαρμένου η χαβάρου ιμάντα

3.9.2 Ανευθυγραμμία ιμάντα τροχαλίας

Μια από τις μεγαλύτερες πηγές κραδασμών σε ιμαντοκινήσεις είναι η κακή ευθυγράμμιση των τροχαλιών. Αριστερά στην εικόνα 3.9-2 παρατηρούνται διάφοροι τύποι κακής ευθυγράμμισης. Κάθε ένας από αυτούς έχει την δική του συμπεριφορά σε σχέση με το τι ζημία προκαλεί στην ιμαντοκίνηση αλλά σίγουρα όλοι φθείρουν εξαναγκασμένα την τροχαλία και τον ιμάντα.



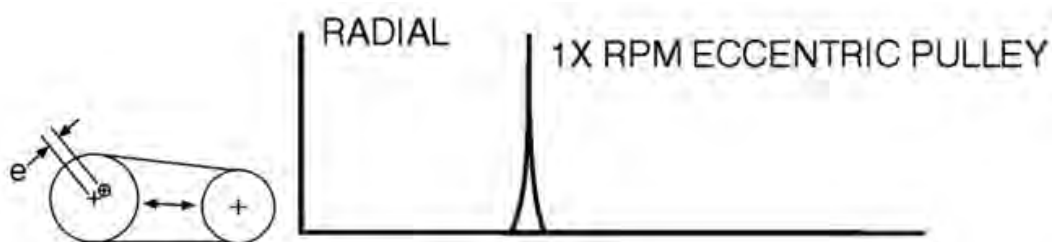
Εικόνα 3.9-2: Αριστερά βλέπουμε περιπτώσεις ανευθυγραμμίας ιμάντων - τροχαλιών και δεξιά τυπικό διάγραμμα FFT για ανευθυγραμμία ιμάντα τροχαλίας

Όσον αφορά τους κραδασμούς η ανευθυγραμμία ιμάντα τροχαλίας εμφανίζεται με συχνότητα 1 x στροφές περιστροφής της κινητήριας τροχαλίας και κυρίως στην αξονική κατεύθυνση. Συχνά, όμως, παρατηρείται η δόνηση να εμφανίζεται στην κινούμενη τροχαλία. Το πλάτος της ταλάντωσης εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το σημείο μέτρησης, τη μάζα – αδράνεια του συστήματος και γενικότερα την στιβαρότητα της κατασκευής. Ένα τυπικό διάγραμμα FFT φαίνεται στα δεξιά της εικόνα 3.9-2.



3.9.3 Εκκεντρότητα τροχαλιών

Μια ακόμα πηγή κραδασμών στις κινήσεις με ιμάντα είναι η εκκεντρότητα στις τροχαλίες. Όπως εξηγήσαμε και στο κεφάλαιο 3.2 της παρούσας εργασίας, η εκκεντρότητα εμφανίζεται όταν ο άξονας περιστροφής και ο άξονας συμμετρίας ενός εξαρτήματος εξοπλισμού (π.χ. τροχαλία, γρανάζι, ρουλεμάν) βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους λόγω σφάλματος. Ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να γίνει αυτό σε μια ιμαντοκίνηση φαίνεται στα δεξιά της εικόνας 3.9-3.

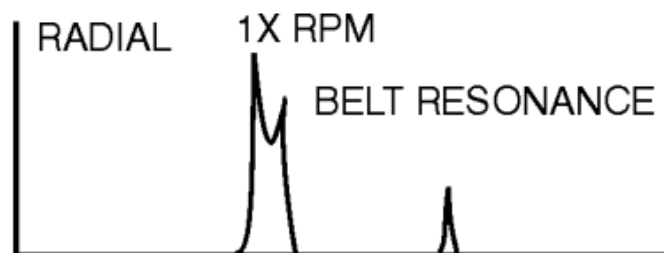


Εικόνα 3.9-3: Αριστερά βλέπουμε την εκκεντρότητα σε μια τροχαλία και δεξιά τυπικό διάγραμμα FFT για εκκεντρότητα τροχαλίας

Όσον αφορά τους κραδασμούς ο μελετητής στην συγκεκριμένη περίπτωση θα παρατηρήσει στο διάγραμμα FFT που θα προκύψει από τις μετρήσεις του μεγάλο πλάτος ταλάντωσης στη συχνότητα 1 x στροφές περιστροφής της έκκεντρης τροχαλίας εικόνα 3.9-3 δεξιά. Η τροχαλία μπορεί να ζυγοσταθμιστεί και το φαινόμενο να μειωθεί, όμως και πάλι η έκκεντρη κίνηση της τροχαλίας θα καταστρέφει βεβαιασμένα τον ιμάντα.

3.9.4 Συντονισμός ιμάντα

Τελευταίο ελάττωμα που μπορεί να προκαλέσει κραδασμούς σε μια ιμαντοκίνηση είναι ο συντονισμός του ιμάντα. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να συμβεί όταν η φυσική συχνότητα του ιμάντα είναι κοντά στην συχνότητα περιστροφής είτε της κινητήριας είτε της κινούμενης τροχαλίας είτε σε συχνότητα συνδεδεμένου εξοπλισμού, για παράδειγμα μια φτερωτή. Η ταλάντωση που εμφανίζεται είναι στην ακτινική διεύθυνση.



Εικόνα 3.9-4: Τυπικό διάγραμμα FFT για συντονισμό ιμάντα



Μια συνηθισμένη τακτική για την αποφυγή αυτού του φαινομένου είναι να τοποθετήσουμε έναν τεντοτήρα στο ένα τρίτο της απόστασης των δύο τροχαλίων από την μεριά της μεγάλης τροχαλίας. Ακόμα, μπορούμε να αλλάξουμε την απόσταση των τροχαλίων και έτσι και τον ιμάντα είτε ακόμα μπορούμε να αλλάξουμε την ταχύτητα περιστροφής μεγαλώνοντας ή μικραίνοντας τις τροχαλίες μας σε συνδυασμό με τις στροφές του κινητήρα ώστε να βγούμε από το κρίσιμο σημείο του συντονισμού. Στην εικόνα 3.9-4 βλέπουμε ένα κλασικό για FFT σε συντονισμό ιμάντα.





3.10 Προβλήματα αεροδυναμικής και υδραυλικής φύσης

Σε αντίθεση με πολλά από τα παραπάνω προβλήματα που αναλύσαμε όπως για παράδειγμα η ανευθυγραμμία, η αζυγοσταθμία και ο λυγισμός ή η δόνηση που προκύπτει από την ροή εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας του εξοπλισμού μας. Δηλαδή, μπορεί να επηρεαστεί από το φορτίο λειτουργίας αλλά και το είδος της εργασίας που εκτελεί ο εξοπλισμός. Στην προσπάθεια να ομαδοποιήσουμε τα προβλήματα αεροδυναμικής και υδραυλικής φύσης, προκύπτουν οι παρακάτω κατηγορίες:

- Δόνηση από διέλευση πτερυγίων
- Αναταράξεις ροή
- Σπηλαίωση

Κάθε ένα από τα παραπάνω προβλήματα είναι ικανά να παράγουν ταλαντώσεις πολύ μεγάλης ενέργειας και πρέπει να αποφεύγεται η λειτουργία του εξοπλισμού μας σε σημείο όπου εμφανίζονται.

Όπως και κάθε άλλο φαινόμενο που μελετήσαμε στην παρούσα εργασία έτσι και τα τρία παραπάνω έχουν τα δικά τους ξεχωριστά χαρακτηριστικά τα οποία θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε στα επόμενα κεφάλαια.

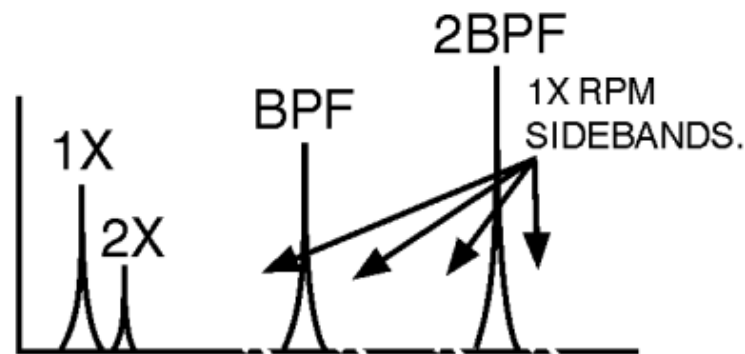
3.10.1 Δόνηση από διέλευση πτερυγίων

Όπως και σε κάθε άλλη περίπτωση που έχουμε μελετήσει στα προηγούμενα κεφάλαια έτσι και εδώ έχουμε μια χαρακτηριστική συχνότητα. Στην παρούσα περίπτωση ονομάζεται συχνότητα διέλευσης πτερυγίων και είναι χαρακτηριστική για κάθε αντλία ή ανεμιστήρα. Συνήθως δεν είναι καταστροφική από μόνη της αλλά σε μεγάλα πλάτη μπορεί να δημιουργήσει πολύ σοβαρά προβλήματα στα ρουλεμάν και σε άλλα εξαρτήματα του εξοπλισμού μας και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο.

$$\text{Blade pass frequency (BPF)} = \text{number of blades (or vanes)} \times \text{rpm}$$

Συχνότητες BPF μεγάλου πλάτους δημιουργούνται όταν ο εξοπλισμός μας παρουσιάζει πρόβλημα. Για παράδειγμα, σε μια υδραυλική αντλία αν το κενό μεταξύ του ρότορα και του στάτορα δεν διατηρείται σταθερό λόγω κάποιας φθοράς σε ένα από τα δυο μέρη τότε θα έχουμε την εμφάνιση θορύβου που θα μοιάζει με σπηλαίωση. Όμως στην πραγματικότητα είναι BPF. Αν επομένως δούμε το διάγραμμα FFT θα επισημάνουμε αμέσως την συχνότητα διέλευσης πτερυγίων. Η παραπάνω αίτια είναι μόνο μια από τις πολλές που συμβάλουν στην εμφάνιση BPF μεγάλου πλάτους. Η ανάλυση κάθε μιας από αυτές δεν είναι κομμάτι της παρούσας εργασίας και επομένως δεν θα κάνουμε περεταίρω αναφορά. Όπως έχει γίνει σε κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις θα παρουσιάσουμε ένα τυπικό διάγραμμα FFT στην παρακάτω εικόνα.

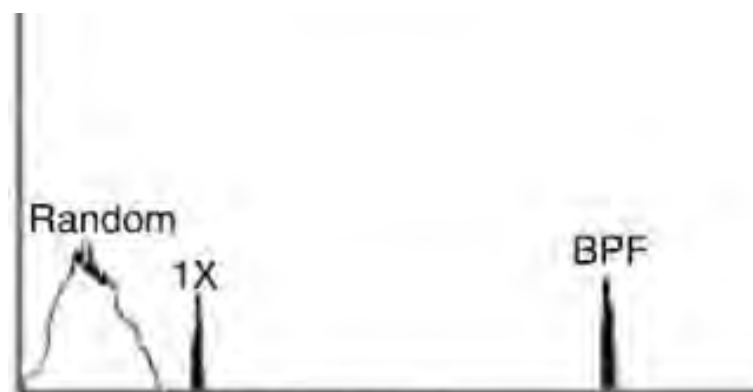




Εικόνα 3.10-1: Τυπικό διάγραμμα FFT για συχνότητα διέλευσης πτερυγίων

3.10.2 Αναταράξεις ροής

Οι αναταράξεις ροής είναι μια κατάσταση όπου έχουμε την εμφάνιση διακυμάνσεων στην πίεση και της ταχύτητα του μέσου (αέριο ή υγρό) που διέρχεται από ένα ανεμιστήρα ή μια αντλία. Για παράδειγμα, στους ανεμιστήρες η δόνηση που προκαλείται από τον αγωγό λόγω του μήκος του, των διαμορφώσεων που έχει αλλά και της εισόδου ή της εξόδου του είναι πηγή διέγερσης χαμηλών συχνοτήτων. Οι παραπάνω παράγοντες αλλά και πολλοί άλλοι δημιουργούν επομένως τυχαίους κραδασμούς χαμηλών συχνοτήτων συνήθως στην περιοχή 0.3 – 33 Hz. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα τοπικό διάγραμμα FFT της περίπτωσης που παρουσιάσαμε.



Εικόνα 3.10-2: Τυπικό διάγραμμα FFT για αναταράξεις ροής

Όσον αφορά τους ανεμιστήρες το φαινόμενο που παρατηρούμε πιο συχνά είναι η αεροδυναμική απώλεια στήριξης των πτερυγίων της πτερωτής. Ουσιαστικά έχουμε την αποκόλληση του οριακού στρώματος της ροής από την πτερωτή λόγω χαμηλής ροής. Για παράδειγμα, όταν το κλαπέ εισόδου στην πτερωτή μας είναι μερικώς κλειστό. Έτσι, έχουμε την διέγερση χαμηλών συχνοτήτων από 8% έως και 80% της ταχύτητας περιστροφής. Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων μπορούμε να αλλάξουμε τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματός μας.

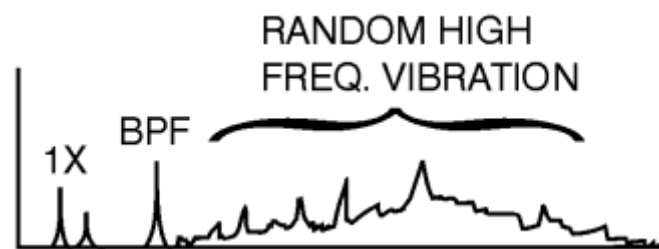


3.10.3 Σπηλαιώση

Ένα υδραυλικής φύσης φαινόμενο που μπορούμε να αναγνωρίσουμε μέσω της ανάλυσης κραδασμών και των διαγραμμάτων FFT είναι η σπηλαιώση.

Όταν ένα υγρό αναρροφάται από μια αντλία η πίεση του υγρού πέφτει. Υπό συνθήκες όταν η πίεση αναρρόφησης πλησιάζει την τάση ατμών του υγρού προκαλεί την εξάτμισή του. Καθώς οι φυσαλίδες ατμού ταξιδεύουν κατάντη της ροής η πίεση αυξάνεται ξανά προκαλώντας της κατάρρευση των φυσαλίδων και την έκρηξη τους. Αυτές οι μικρές εκρήξεις μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένες φθορές στα πτερύγια την αντλίας ή σε άλλα μέρη του δικτύου μας. Το φαινόμενο που περιγράφηκε παραπάνω ονομάζεται σπηλαιώση.

Κάθε μια από αυτές τις μικρές εκρήξεις δημιουργεί ένα χτύπημα που με την σειρά του δημιουργεί υψίσυχνη τυχαία ταλάντωση. Όλες αυτές οι μικρές εκρήξεις επομένως θα εμφανιστούν σε ένα διάγραμμα FFT σαν τυχαίες ταλαντώσεις ψηλά στο διάγραμμα. Ένας ερευνητής για να μπορέσει να 'πιάσει' το φαινόμενο της σπηλαιώσης να απεικονίζεται σε διάγραμμα FFT δεν πρέπει να μετρήσει στις έδρες των ρουλεμάν της αντλίας μας αλλά κατάντη της ροής ή πάνω στο σώμα της αντλίας. Ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα FFT που απεικονίζει πρόβλημα σπηλαιώση φαίνεται στην εικόνα.



Εικόνα 3.10-3: Τυπικό διάγραμμα FFT για πρόβλημα σπηλαιώσης





3.11 Συμπεράσματα και συγκεντρωτικός πίνακας συμπτωμάτων

Στο κεφάλαιο τρία έγινε μια προσπάθεια να συγκεντρωθούν και να παρουσιαστούν όσο το δυνατόν πιο κατανοητά και χωρίς να χάνεται κάποια βασική πληροφορία για τον αναγνώστη όλα τα συμπτώματα των συνήθων βλαβών σε περιστρεφόμενο εξοπλισμό. Για κάθε ένα από τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν παρατέθηκε και το διάγραμμα FFT έτσι ώστε ο αναγνώστης να έχει μια πληρέστερη εικόνα. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η εικόνα ενός διαγράμματος FFT που έχει δημιουργηθεί από πραγματική μέτρηση δεν είναι ποτέ τόσο καθαρό και ευκρινές όσο αυτά των εικόνων που παρουσιάστηκαν σε αυτήν την εργασία. Ο θόρυβος από τα υπόλοιπα μηχανήματα αλλά και πολλοί άλλοι παράγοντες κάνουν την κατανόηση των διαγραμμάτων αρκετά δύσκολη. Ο μελετητής πρέπει να γνωρίζει εξαιρετικά όλα όσα παρουσιάστηκαν παραπάνω αλλά να έχει μια πολύ καλή γνώση της λειτουργίας του εξοπλισμού που μετράει και προσπαθεί να αναλύσει.

Στην αρχή του κεφαλαίου έγινε μια γρήγορη αναφορά των θεμάτων που θα καλυφθούν όμως όπως γίνεται αντιληπτό κατά την ανάγνωση της εργασίας δεν αναλυθήκαν τρία από τα θέματα που παρουσιάστηκαν εκεί. Αυτά είναι:

- Προβλήματα σε ηλεκτρικούς κινητήρες AC και DC
- Ρωγμές άξονα
- Φθορές άξονα

Για την κατανόηση των προβλημάτων σε ηλεκτρικούς κινητήρες έπρεπε να γίνει μια πιο βαθιά ανάλυση της δομής των κινητήρων αλλά και του τρόπου λειτουργίας τους ώστε ο αναγνώστης να μπορέσει να κατανοήσει το φαινόμενο. Αυτό θα μας έκανε να πλατειάσουμε και εν τέλει να κουράσουμε τον αναγνώστη. Αν κάποιος επιθυμεί να εμβαθύνει στην ανάλυση κραδασμών σε ηλεκτρικούς κινητήρες μπορεί να απευθυνθεί στην βιβλιογραφία και ποιο συγκεκριμένα στα εξής:

- Rao, J. S. (2000). *Vibratory condition monitoring of machines*. CRC press
- Davies, A. (Ed.). (2012). *Handbook of condition monitoring: techniques and methodology*. Springer Science & Business Media.
- Κωστόπουλος, Θ. Ν. (2009). *Διάγνωση Βλαβών και Συντήρηση Περιστρεφόμενων Μηχανών*. Αθήνα, Εκδόσεις Συμεών.
- Berry, J. E. (1997). *Predictive Maintenance and Vibration Signature Analysis II*. Columbus, OH, IRD Mechanalysis, Inc.

Τελικά, για την καλύτερη και γρηγορότερη εποπτεία αλλά και για βοήθεια στον αναγνώστη και μελλοντικό μελετητή θα παρουσιαστεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας όλων των περιπτώσεων που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Θα παρουσιαστούν ανά πρόβλημα οι τυπικές συχνότητες εμφάνισης όπως και ένας σχολιασμός.





Σύμπτωμα	Συχνότητα εμφάνισης	Κατεύθυνση μέτρησης	Σχόλια
Αζυγοσταθμία	1 x rpm	Ακτινική	- Στατική αζυγοσταθμία - Αζυγοσταθμία ζεύγους - Δυναμική αζυγοσταθμία - Προεξέχοντος άξονα
Εκκεντρότητα	1 x rpm	Ακτινική	Εμφανίζεται σε όλες τις κατασκευές
Λυγισμός άξονα	1 x rpm και 2 x rpm	Ακτινική	Μεγάλο πλήθος μετρήσεων
Ανευθυγραμμία	2 x rpm και 3 x rpm	Ακτινική και αξονική	- Γωνιακή ανευθυγραμμία - Παράλληλη ανευθυγραμμία
Χαλαρότητα	2 x rpm σαν βασική και εμφάνιση αρμονικών έως 10 x rpm	Ακτινική και αξονική	- Εσωτερικά του εξοπλισμού - Στην βάση του εξοπλισμού - Δομικές
Έδρανα ολισθήσεως	3 x rpm σαν βασική και εμφάνιση αρμονικών έως 6 x rpm	Ακτινική	- Μεγάλα διάκενα - Αστάθεια λόγω στροβιλισμών λαδιού - Αστάθεια λόγω ελλιπή φιλμ λαδιού
Έδρανα κυλίσεως	BPFO – BPFI – BSF – F_cage (αναλυτικά οι τύποι στο εκάστοτε κεφάλαιο)	Ακτινικά	- Ball Pass Frequency Race - Ball Pass Frequency Inner Race - Ball Spin Frequency - Συχνότητα περιστροφής Κλωβού





Γραναζοκινήσεις	GMF (αναλυτικά οι τύποι στο εκάστοτε κεφάλαιο)	Ακτινικά	Gear Mesh Frequency
Κίνηση με ιμάντα	F_Belt (αναλυτικά οι τύποι στο εκάστοτε κεφάλαιο)	Ακτινικά	• Φθαρμένοι, χαλαροί ή λάθος τοποθετημένοι ιμάντες • Ανευθυγραμμία ιμάντα τροχαλίας • Εκκεντρότητα τροχαλιών • Συντονισμός ιμάντα
Αντλίες - πτερωτές	F_Fan – F_Pump (αναλυτικά οι τύποι στο εκάστοτε κεφάλαιο)	Ακτινική και αξονική	• Δόνηση από διέλευση πτερύγιων • Αναταράξεις ροή • Σπηλαίωση



4 Ανάλυση κραδασμών σε βιομηχανικό εξοπλισμό με τη χρήση φορητής συσκευής μέτρησης.

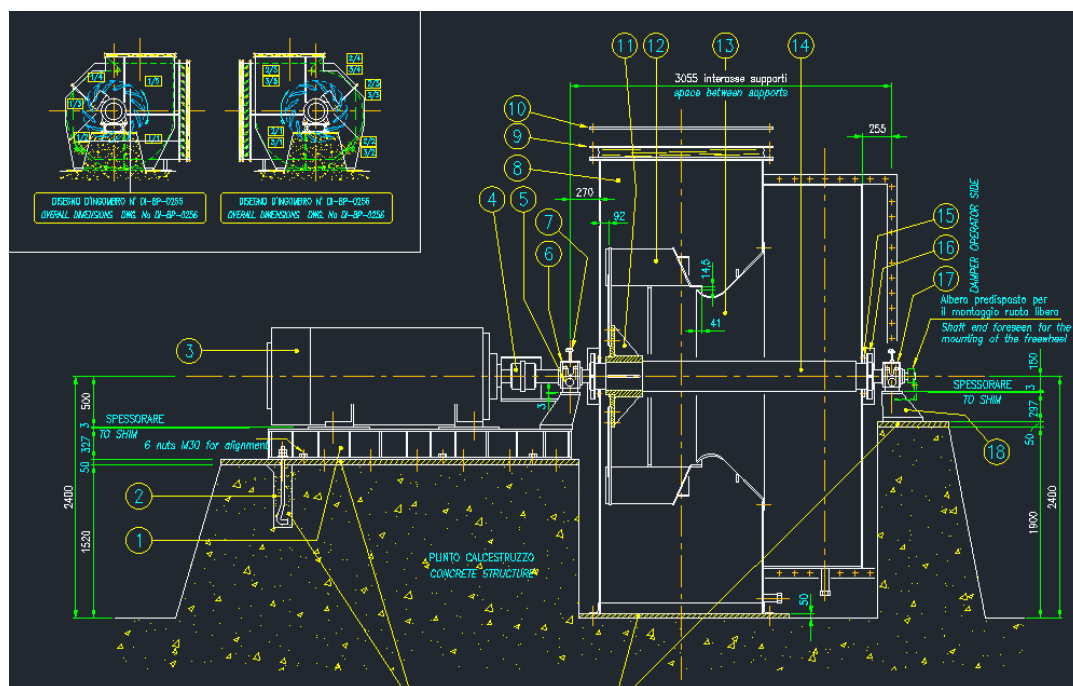
Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά θα γίνει αρχικά αναλυτική παρουσίαση του προς μέτρηση εξοπλισμού αναλύοντας κάθε λεπτομέρεια. Στην συνέχεια, θα παρουσιαστεί ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για να γίνουν οι μετρήσεις (το Falcon αλλά και το πρόγραμμα ανάλυσης) και τέλος θα κλείσει αυτό το κεφάλαιο με την παρουσίαση και ανάλυση των αποξεσμάτων.

4.1 Περιγραφή βιομηχανικού εξοπλισμού

Σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί μια λεπτομερής περιγραφή του βιομηχανικού εξοπλισμού που θα χρησιμοποιήσουμε για τις μετρήσεις μας. Η επιλογή της διάταξης αυτής δεν ήταν τυχαία. Επιλέχθηκε εξαιτίας της απλότητάς της αλλά και του εύκολα προσβάσιμου σημείου της σε κατάσταση λειτουργίας. Θα γίνει αναφορά σε κάθε μέρος του εξοπλισμού μας ξεχωριστά, προσπαθώντας να παρουσιάσουμε κάθε στοιχείο που μπορεί να βοηθήσει μελλοντικά στις μετρήσεις και στην καλύτερη κατανόησή τους.

4.1.1 Γενική περιγραφή

Ο βιομηχανικός εξοπλισμός, που θα μετρήσουμε, φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα. Ουσιαστικά, είναι ένας ανεμιστήρας απαγωγής θερμών καυσαερίων.



Εικόνα 4.1-1: Πλάγια τομή ανεμιστήρα απαγωγής καυσαερίων



Τα σημαντικότερα εξαρτήματα που αποτελούν την διάταξη είναι αριθμημένα. Από αυτά εμείς θα περιγράψουμε μόνο αυτά που έχουν σχέση με της μετρήσεις που θα κάνουμε και μας επηρεάζουν. Επισημαίνεται ότι θα κρατήσουμε την αρίθμηση του σχεδίου που έχει παρουσιαστεί.

- Ηλεκτρικός κινητήρας (3)
- Οδοντωτό κόμπλερ (4)
- Σταθερή έδραση φτερωτής (6)
- Πλωτή έδραση φτερωτής (17)
- Άξονας φτερωτής (14)
- Κώνος εισαγωγής (13)
- Φτερωτή (12)
- Φάλτσα σύνδεσης άξονα φτερωτής (11)

Κατά την λειτουργία του εξοπλισμού ο ηλεκτρικός κινητήρας διαμέσου του οδοντωτού κόμπλερ κινεί τον άξονα της φτερωτής πάνω στις δυο έδρες του. Με την σειρά του, ο άξονας με την περιστροφή του περιστρέφει και την φτερωτή μιας και η τελευταία είναι προσαρμοσμένη με κοχλίες πάνω στην φάλτσα σύνδεσης άξονα φτερωτής. Ο αέρας εισέρχεται από τα δεξιά του σχήματος και διαμέσου του κώνου εισαγωγής εισέρχεται στην φτερωτή που τον απαγάγει στην πάνω μεριά του σχεδίου.

Κατά την διάρκεια της κατασκευής έχουν τοποθετηθεί κατάλληλες αγκυρόβιδες στον κινητήρα αλλά και στην φτερωτή, ώστε τα παραπάνω να μένουν πακτωμένα στο έδαφος. Ακόμα, μεταξύ της τσιμεντένιας βάσης και των εξοπλισμών έχει τοποθετηθεί μη συστελλόμενο τσιμέντο (Emaco) για την αποφυγή δημιουργίας κενών μετά το πέρας της αρχικής ευθυγράμμισης όλων των εξοπλισμών.

4.1.2 Αναλυτική περιγραφή εξαρτημάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δοθεί μια λεπτομερής περιγραφή για κάθε ένα από τα επιμέρους εξαρτήματα του μετρήσιμου εξοπλισμού που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Πάντα ένας μελετητής πρέπει να σχηματίζει μια πλήρη εικόνα των δυνατοτήτων και των περιορισμών του εξοπλισμού που μελετάει.

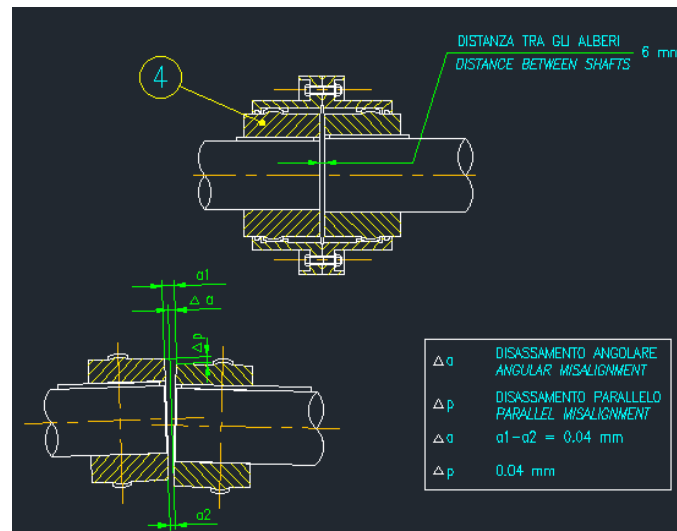
Ηλεκτρικός κινητήρας: Ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι ένας τριφασικός κινητήρας 950 KW 6 πόλων. Ο κινητήρας δεν ελέγχεται από κάποιο μετατροπέα συχνотήτων (drive) και οι στροφές επιστροφής του είναι 1000 RPM.

Οδοντωτό κόμπλερ: Το οδοντωτό κόμπλερ είναι αυτό που μεταφέρει την ροπή του κινητήρα στον άξονα και κατ' επέκταση στη φτερωτή. Τα δύο κόμπλερ έρχονται πρόσωπο με τον άξονα και απέχουν μεταξύ τους απόσταση 6 mm εικόνα 4.1-2. Τα δυο κόμπλερ και κατ' επέκταση ο κινητήρας με τον άξονα της φτερωτής πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένα. Στην εικόνα 4.1-2 φαίνονται οι προδιαγραφές που περιγράφονται στο σχέδιο για την ευθυγραμμία. Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί, ότι η





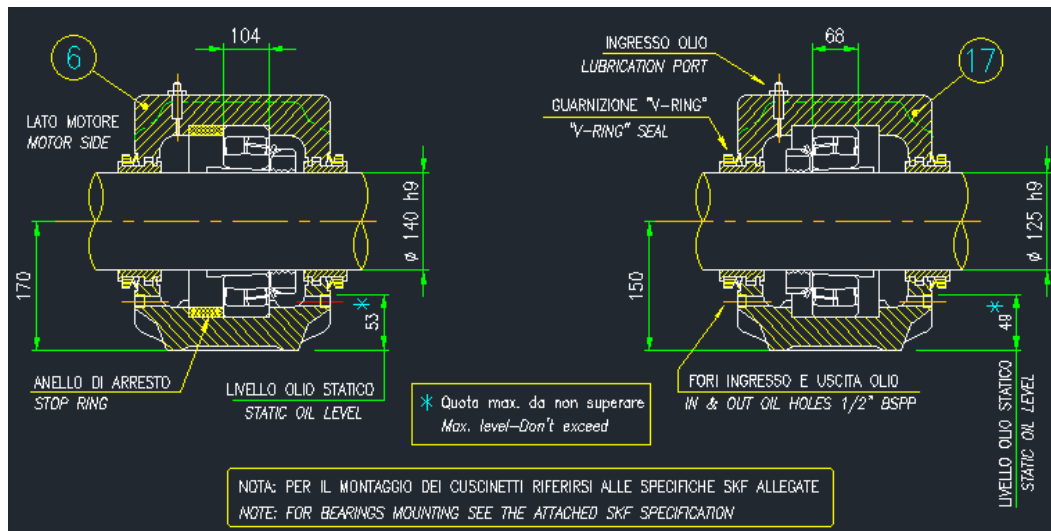
ευθυγραμμία του κινητήρα και του άξονα ελέγχθηκαν με την χρήση λέιζερ ευθυγράμμισης.



Εικόνα 4.1-2: Απόσταση μεταξύ των δυο αξόνων κινητήρα φτερωτής – προδιαγραφές ευθυγραμμίας αξόνων

Πλωτή – σταθερή έδραση φτερωτής: Στις περισσότερες των περιπτώσεων (υπάρχουν εξαιρέσεις π.χ. μειωτήρες με γρανάζωση ψαροκόκαλο, κινητήρες συνεχούς ρεύματος) ένας άξονας στηρίζεται σε μια σταθερή από την μια μεριά έδρα και σε μια πλωτή από την άλλη. Έτσι ακριβώς συμβαίνει και στην περίπτωση που θα μελετήσουμε. Η αριστερή έδρα με τον αριθμό 6 είναι η σταθερή. Μπορούμε να παρατηρήσουμε στην εικόνα. 4.1-3 ότι το εξωτερικό δαχτυλίδι του ρουλεμάν είναι σταθερό μεταξύ του housing και ενός αποστάτη. Αντίθετα, στην έδρα δεξιά με τον αριθμό 17 μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε ότι το εξωτερικό δαχτυλίδι δεν εκφοβίζεται από κάτω και μπορεί να κινηθεί δεξιά – αριστερά ελεύθερο. Στην σταθερή έδρα χρησιμοποιείται το ρουλεμάν 23232 KW33-C3 με ένα κωνικό χιτώνιο H3132. Ρουλεμάν και χιτώνιο σφίγγονται στην κατάλληλη θέση με ένα περικόχλιο άξονα KM32. Στην πλωτή έδρα χρησιμοποιείται ένα ρουλεμάν 22228 KW33-C3 με ένα κωνικό χιτώνιο H3128. Όπως και πριν, ρουλεμάν και χιτώνιο σφίγγονται στην κατάλληλη θέση με ένα περικόχλιο άξονα KM28.





Εικόνα 4.1-3: Σταθερή και πλωτή έδρα μαζί με τα ρουλεμάν και τα χιτώνια

Τέλος, το λάδι που χρησιμοποιούμε για την λίπανση των ρουλεμάν είναι με ιξώδες 68cSt.

Βοηθητικά εξαρτήματα: Όλη η διάταξη κατά την κατασκευή της αλλά και κάθε φορά που γίνεται κάποια παρέμβαση, όπως περιοδική αλλαγή κινητήρα ή αλλαγή ρουλεμάν σε περίπτωση που εντοπιστεί βλάβη, ευθυγραμμίζεται. Για την ευθυγράμμιση χρησιμοποιούνται λεπτές προσθήκες χαλύβδινων φύλλων διάφορων παχών. Ακόμα, όλα τα περικόχλια είναι ασφαλείας έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουμε την περίπτωση αντιμετώπισης προβλημάτων χαλαρότητας σε κοχλιοσυνδέσεις. Τέλος, ο κατασκευαστής είχε προβλέψει την εγκατάσταση δυο θερμοστοιχείων ένα σε κάθε έδρανο για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας των ρουλεμάν.





4.2 Περιγραφή φορητής συσκευής μέτρησης και προγράμματος ανάλυσης

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια λεπτομερής περιγραφή του μετρητικού οργάνου που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή των δεδομένων και την ανίχνευση πιθανής βλάβης στον εξοπλισμό που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επίσης, θα δοθούν μερικές συμβουλές και σωστές πρακτικές που πρέπει να ακολουθούνται από ένα μελετητή κατά την ανίχνευση βλαβών. Σημαντικό μέρος των στοιχείων της χρήσης της συσκευής μέτρησης αποτελούν προσωπικές εμπειρίες διότι αυτή χρησιμοποιείται στην καθημερινότητα της εργασίας για μετρήσεις ποικίλων εξοπλισμών και μάλιστα πιο πολύπλοκων από αυτούς που θα παρουσιαστούν στην παρούσα εργασία.

4.2.1 Γενική περιγραφή φορητής συσκευής μέτρησης

Η μετρητική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για της μετρήσεις και θα αναλυθεί είναι η συσκευής Falcon της γαλλικής εταιρίας ACOEM. Για την ευκολότερη και πληρέστερη λειτουργία την συσκευής μέτρησης χρειάζεται ακόμα το πρόγραμμα Nest 3.0 για την δημιουργία διαδικασιών επιθεώρησης αλλά το πρόγραμμα Nest analyst για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το Falcon (έτσι θα αναφερόμαστε πια στη φορητή συσκευής μέτρησης) λειτουργεί και τελείως αυτόνομα.



Εικόνα 4.2-1: Το Falcon της ACOEM μαζί με τα παρελκόμενά του

Στην εικόνα 4.2-1 φαίνεται το Falcon με τα παρελκόμενά του. Είναι ένα εύκολο στην χρήση όργανο με μεγάλη ευκρινή οθόνη αφής που όπως ειπώθηκε και παραπάνω το κάνει και τελείως αυτόνομο, ανεξάρτητο από γραφείο και ηλεκτρονικό υπολογιστή. Επιπρόσθετα, είναι απαλλαγμένο από καλώδια κατά την χρήση του καθώς ο





αισθητήρας που χρησιμοποιεί συνδέεται ασύρματα μαζί του βοηθώντας έτσι πολύ στην ασφάλεια του χρήστη κατά την συλλογή των δεδομένων. Απαριθμώντας τι εμπεριέχεται στην συσκευασία του Falcon έχουμε:

- Μονάδα συλλογής στοιχείων (Falcon)
- 3 Axial ασύρματο αισθητήριο (επιταχυνσιόμετρο)
- Καλώδιο σύνδεσης με H/Y
- φορτιστές για το Falcon και το ασύρματο αισθητήριο
- Καλώδιο σύνδεσης με άλλες συσκευές και αισθητήρια (π.χ. 1 Axial ενσύρματο αισθητήριο, λείζερ μέτρησης στροφών)

Το Falcon ακόμα μπορεί να αγοραστεί και με εξοπλισμό για ζυγοστάθμιση. Το μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι εξοπλισμένο και για ζυγοστάθμιση . Παρακάτω θα γίνει μια επιγραμματική αναφορά στον εξοπλισμό όμως δεν θα αναλυθεί μιας και δεν είναι αντικείμενο αυτής της εργασίας. Το προαιρετικό πακέτο της ζυγοστάθμισης περιέχει επιπλέον:

- 4 μόνο αξονικά ενσύρματα αισθητήρια (επιταχυνσιόμετρο)
- Λείζερ μέτρησης στροφών
- Βάση για την στήριξη του λείζερ
- Όλα τα απαραίτητα καλώδια για την σύνδεση των επιπρόσθετων αισθητηρίων



Εικόνα 4.2-2: Προαιρετικός εξοπλισμός για ζυγοστάθμιση

Στα επόμενα κεφάλαια θα γίνει μια αναλυτική περιγραφή των δυνατοτήτων και της λειτουργίας της μετρητικής διάταξης.

4.2.2 Επιταχυνσιόμετρο

Το επιταχυνσιόμετρο της εταιρίας ACOEM είναι τριαξονικό αισθητήριο με τα παρακάτω χαρακτηριστικά χωρισμένα σε κατηγορίες:

Φυσικά

- Διάμετρο 40mm και ύψος 115mm
- Βάρος: 379 g
- Αντίσταση σε χτυπήματα: 5000g





- Προσαρμογή σε επιφάνειες μαγνητικά ή με βίδα M6

Μπαταριά

- Τύπος μπαταρίας: ιόντων λιθίου
- Χρόνος λειτουργίας μεταξύ φορτίσεων: 8 ώρες
- Επαναφόρτιση μέσω USB

Μετρολογία

- Σύγχρονη μέτρηση 3 αξόνων (X Y Z)
- Εύρος: 20 kHz σε όλους τους άξονες
- Εύρος συχνότητας στα 3dB:
 - ο 15kHz (Z)
 - ο 6kHz (X Y)
- Πλήρη κλίμακα: 80g
- Αναλογία σήματος θορύβου: 80dB
- Ακρίβεια: +/- 3%

Περιβάλλον

- Θερμοκρασία λειτουργίας: -20 C έως +60 C
- Αντοχή: IP65
- Αντιεκρηκτικό πιστοποιητικό ATEX Zone II / IECEx πιστοποιητικό

Συνδεσιμότητα:

- Πρωτόκολλο ασύρματης σύνδεσης: Wi-Fi
- Εμβέλεια σύνδεσης 10m -20m ανάλογα τον χώρο και το περιβάλλον

Στην εικόνα 4.2-3 φαίνεται το αισθητήριο που περιγράψαμε παραπάνω.

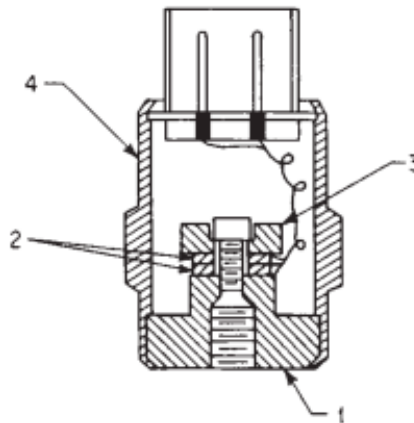


Εικόνα 4.2-3: Τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο της εταιρίας ACOEM



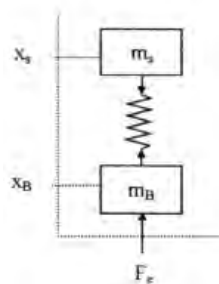
Αρχή λειτουργίας

Το επιταχυνσιόμετρο είναι μια μετρητική διάταξη που χρησιμοποιεί πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους για να μετατρέψει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρικό φορτίο. Οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι έχουν την ιδιότητα να αναπτύσσουν ηλεκτρικό δυναμικό όταν ασκείται επάνω τους κάποια πίεση. Στην περίπτωση των επιταχυνσιόμετρων, η πίεση αυτή ασκείται από τις μάζες αναφοράς που βρίσκονται πάνω από τους κρυστάλλους, όπως φαίνεται παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.2-4: Σχηματική διάταξη μονοαξονικού επιταχυνσιόμετρου

Οι μάζες αναφοράς (3) κινούνται σχετικά με τους πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους (2), οι οποίοι στηρίζονται στην βάση (1). Το συναρμολόγημα αυτό καλύπτεται από ένα κάλυμμα (4) που ουσιαστικά είναι το αισθητήριο. Η κίνηση της μάζας αναφοράς πάνω στο κρύσταλλο μπορεί να προσομοιαστεί με την κίνηση ενός συστήματος μάζας - ελατηρίου. Ένα τέτοιο μοντέλο φαίνεται στην εικόνα 4.2-5.



Εικόνα 4.2-5: Σχηματική διάταξη μονοαξονικού επιταχυνσιόμετρου

Στην εικόνα η δύναμη F_e είναι η εξωτερικά ασκούμενη δύναμη από την κίνηση του εξοπλισμού που θέλουμε να μετρήσουμε, m_B είναι η μάζα της βάσης m_s είναι η μάζα της αναφοράς. x_B και x_s είναι η μετατοπίσεις της βάσης και της μάζας αναφοράς ως προς ένα σύστημα συντεταγμένων. Αν θεωρήσουμε L την αρχική απόσταση ανάμεσα στις δυο μάζες τότε οι δυνάμεις στο σύστημα είναι:

Δύναμη ελατηρίου: $F = k(x_s - x_B - L)$

Δύναμη βάσης: $m_B \cdot \ddot{x}_B = F + F_e$



Δύναμη στην μάζα αναφοράς: $m_s \ddot{x}_s = -F$

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις ισορροπίας των δυνάμεων και εκτελώντας τις πράξεις, προκύπτει η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την κίνηση του απλοποιημένου μοντέλου. Επιλύοντας την διαφορική εξίσωση με παραδοχή ότι η συχνότητα διέγερσης είναι πολύ μικρότερη της ιδιοσυχνότητας του επιταχυνσιόμετρου και για εξωτερική διέγερση ημιτονοειδούς ή συν ημιτονοειδούς μορφής προκύπτει ότι το επιταχυνσιόμετρο έχει σταθερή απόκριση (άρα και σταθερή τάση εξόδου) για σταθερή δύναμη σε συχνότητες χαμηλότερες της συχνότητας συντονισμού, ενώ στην περιοχή της ιδιοσυχνότητας εμφανίζει απότομα μια μεγάλη αύξηση της απόκρισής του. Επομένως, τα επιταχυνσιόμετρα πρέπει να χρησιμοποιούνται μακριά από τις συχνότητες συντονισμού τους γιατί βγάζουν μεγάλη τάση στην έξοδο και συνεπώς αναξιόπιστα αποτελέσματα.

Πρακτικές συμβουλές

Όσον αφορά σωστές πρακτικές στην χρήση ενός επιταχυνσιόμετρου μπορούμε να αναφέρουμε συνοπτικά:

- Απαιτείται πολύ καλή προσαρμογή του αισθητήρα πάνω στην μετρούμενη επιφάνεια. Βρομιά ή οποιοσδήποτε παράγοντας που μπορεί να προκαλέσει χαλαρότητα μεταξύ της βάσης του αισθητήρα μας και της μετρούμενης επιφάνειας εισαγάγει θόρυβο και μη γραμμικά φαινόμενα στην μέτρηση, με αποτέλεσμα κακή αξιοπιστία και δυσκολία στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων από τον μελετητή.
- Οι μετρήσεις πέρα από αξιόπιστες με τον ελάχιστο δυνατό θόρυβο πρέπει να έχουν και επαναληψιμότητα, ώστε να υπάρχει δυνατότητα σύγκρισης των μετρήσεων που έχουν ληφθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Εύκολα γίνεται κατανοητό ότι πρέπει να καθοριστούν τα σημεία που θα γίνουν οι μετρήσεις. Ο καθορισμός μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους ανάλογα με τον εξοπλισμό που θα χρησιμοποιήσουμε. Έτσι, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μόνιμα τοποθετημένα αισθητήρια ή μπορούμε να τοποθετήσουμε βάσεις με σπείρωμα ώστε να βιδώσουμε εκεί τα αισθητήριά μας είτε μπορούμε να βάλουμε βάσεις ταχείας αλλαγής για την τοποθέτηση των αισθητηρίων. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε μαγνητικά αισθητήρια μπορούμε να τοποθετήσουμε σταθερά πάνω στον εξοπλισμό μας στα σημεία μέτρησης κατεργασμένες επιφάνειες ώστε να τα κολλάμε πάντα εκεί.
- Κάτι άλλο που πρέπει ο μελετητής να λαμβάνει πολύ σοβαρά υπόψη κατά την χρήση και την τοποθέτηση του επιταχυνσιόμετρου είναι ο άξονας μέγιστης ευαισθησίας του αισθητηρίου. Τα μόνο αξονικά αισθητήρια δεν λαμβάνουν εγκάρσια φορτία. Μπορούν δηλαδή να μετρήσουν μόνο σε έναν άξονα όπως λέει και το όνομά τους. Επομένως αν δεν γνωρίζουμε με βεβαιότητα την κατεύθυνση της δόνησης θα πρέπει να προτιμήσουμε ένα αισθητήριο που μετράει ταυτόχρονα σε όλους τους άξονες (X,Y,Z) δηλαδή σαν αυτό που επιλέξαμε στην περίπτωση των δικών μας μετρήσεων.





- Το αισθητήριο όπως είναι κατανοητό αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εξαρτήματα του μετρητικού εξοπλισμού. Πρέπει επομένως να του φερόμαστε με απόλυτη προσοχή. Εύκολα κάτι φορητό μπορεί να μας πέσει και αυτό να οδηγήσει σε μόνιμη βλάβη. Το τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο που χρησιμοποιήσαμε για την παρούσα εργασία έχει αντοχή σε πτώση της τάξης των 5000g. Παρόλα αυτά ο μελετητής πάντα πρέπει να χρησιμοποιεί το κουτί μεταφοράς του κατασκευαστή που προσφέρει μέγιστη ασφάλεια.
- Τέλος θα πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη οι ειδικές οδηγίες του κατασκευαστή για την σωστή χρήση του αισθητηρίου. Θέματα όπως η σκόνη ή υγρασία αλλά και η θερμοκρασία μπορεί να καταστρέψουν το αισθητήριο ή να εισαγάγουν σφάλματα κατά την μέτρηση. Το αισθητήριο που επιλέχθηκε για τις μετρήσεις της εργασίας έχει αντοχή σε σκόνη και υγρασία IP65 και μπορεί να εργαστεί σε θερμοκρασίες έως 60C. Έτσι για τις μετρήσεις μας επιλεχθήκαν πρωινές ώρες μιας και ο χώρος του χαλυβουργείου είναι επιρρεπείς σε υψηλές θερμοκρασίες.

4.2.3 Φορητή μονάδα μέτρησης Falcon.

Η φορητή μονάδα μέτρησης Falcon είναι ο ενδιάμεσος κρίκος ανάμεσα στους αισθητήρες και στο πρόγραμμα ανάλυσης των κραδασμών. Η μεγάλη ευκολία και ουσιαστικά αυτό που το κάνει να ξεχωρίζει είναι η δυνατότητά του να μην δεσμεύει των χρήστη σε κάποιο ηλεκτρονικό υπολογιστή για να κάνει τις μετρήσεις αλλά και η δυνατότητά του να δουλεύει τελείως ανεξάρτητα εφόσον έχουν περαστεί τα σημεία μέτρησης. Ο μελετητής μπορεί πάρει το Falcon μαζί του, να κάνει τις μετρήσεις που θέλει, και εν συνεχεία να μεταφέρει τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο πρόγραμμα για περαιτέρω ανάλυση ή να τα διαβάσει απευθείας από αυτό.

Το Falcon στην πλήρη έκδοσή του (αυτήν είναι που χρησιμοποιούμε για τις μετρήσεις μας) μπορεί να κάνει τα ακόλουθα

- Μέτρηση ταλαντώσεων
- Μέτρηση θερμοκρασίας με την θερμοκάμερά του
- Μέτρηση στροφών
- Ζυγοστάθμιση
- Φορητός υπολογιστής ανάλυσης ταλαντώσεων (διαγράμματα FFT)

Οι παράμετροι των μετρήσεων μπορούν να εισαχθούν απευθείας στο Falcon ή να οριστούν στο πρόγραμμα και να μεταφερθούν από αυτό. Επίσης, στην οθόνη του Falcon, μπορούμε να δούμε και μια πρώτη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πριν τα περάσουμε στο πρόγραμμα για επιπλέον ανάλυση και αξιολόγηση.

Το Falcon έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά χωρισμένα σε κατηγορίες:

Γενικά χαρακτηριστικά:





- Διαστάσεις : 154*92 mm
- Μεγάλη έγχρωμη οθόνη αφής ανάλυσης 800*480 pixels
- Προσαρμογή φωτεινότητας για χρήση σε εξωτερικό χώρο
- Μπαταριά ιόντων λιθίου με δυνατότητα έως και 10 ώρες λειτουργίας

Επικοινωνίας:

- USB 2 type B για επικοινωνία με υπολογιστή
- USB 2 type B για USB Stick
- Ethernet
- Wi-Fi

Πυρόμετρο:

- Ενσωματωμένο πυρόμετρο για μέτρηση θερμοκρασίας με εύρος 0C έως 200C
- Ακρίβεια: +/-3 C
- Χρόνος απόκρισης: 1s

Στροφόμετρο:

- Ενσωματωμένο στροφόμετρο για μέτρηση στροφών με εύρος 30 έως 15000 RPM

Κάμερα:

- Ανάλυση κάμερας 640 *480
- Αυτόματη εστίαση
- Φλας

Περιβάλλον:

- Θερμοκρασία λειτουργίας: -10 C έως +55 C
- Αντοχή: IP65
- Στάνταρ ασφαλείας IEC61010-1
- Προστασία από πτώση έως και 1,2 m

Στην εικόνα 4.2-6 φαίνεται το μηχάνημα που περιγράψαμε παραπάνω.



Εικόνα 4.2-6: Falcon

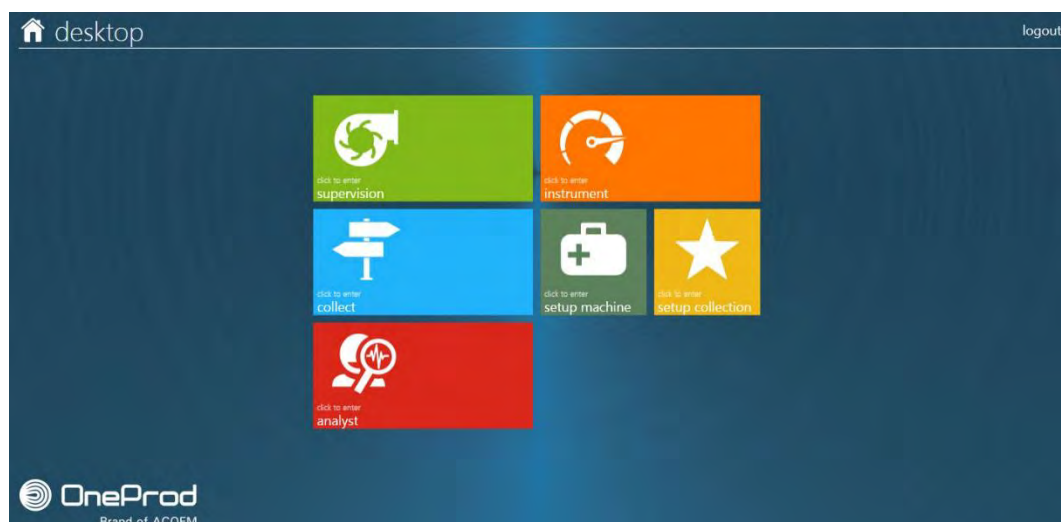




4.2.4 Πρόγραμμα Nest 3

Το Nest είναι ένα πρόγραμμα οργάνωσης και διαχείρισης της συντήρησης περιστρεφόμενου μηχανολογικού εξοπλισμού. Επικεντρώνεται κατά κύριο λόγο στην ανάλυση κραδασμών. Το Nest είναι της εταιρίας Acoem. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των βασικότερων δυνατοτήτων του προγράμματος δίνοντας όμως μεγαλύτερη έμφαση στο σχεδιασμό νέου εξοπλισμού προς ανάλυση αλλά και στην επικοινωνία του προγράμματος με το Falcon. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι στην παρούσα εργασία δεν είναι σκοπός μας να παρουσιάσουμε κάθε μια από τις δυνατότητες του συγκεκριμένου προγράμματος. Προσπαθούμε να παρουσιάσουμε το εργαλείο που μας βοήθησε για να πραγματοποιήσουμε τις μετρήσεις μας.

Ανοίγοντας το πρόγραμμα ο αναλυτής βλέπει την επιφάνεια εργασίας που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.2-7. Κάθε ένα από τα εικονίδια είναι και μια ξεχωριστή δυνατότητα του προγράμματος.



Εικόνα 4.2-7: Επιφάνεια εργασίας Nest 3



Η λειτουργία Supervision επιτρέπει στον μελετητή να επιβλέπει την κατάσταση όλου του εξοπλισμού του με οποιοδήποτε τρόπο και αν είναι μετρημένο (Falcon – online).



Η λειτουργία Instrument επιτρέπει στον μελετητή να επιβλέπει το σύστημα online monitoring που έχει εγκατεστημένο στον εξοπλισμό του και να βλέπει τις μετρήσεις και τυχόν σφάλματα του συστήματος.





Οι δυο αυτές λειτουργίες βοηθούν τον μελετητή να καθορίσει τις ρουτίνες μετρήσεων, να τις μεταφέρει στο και από το Falcon.



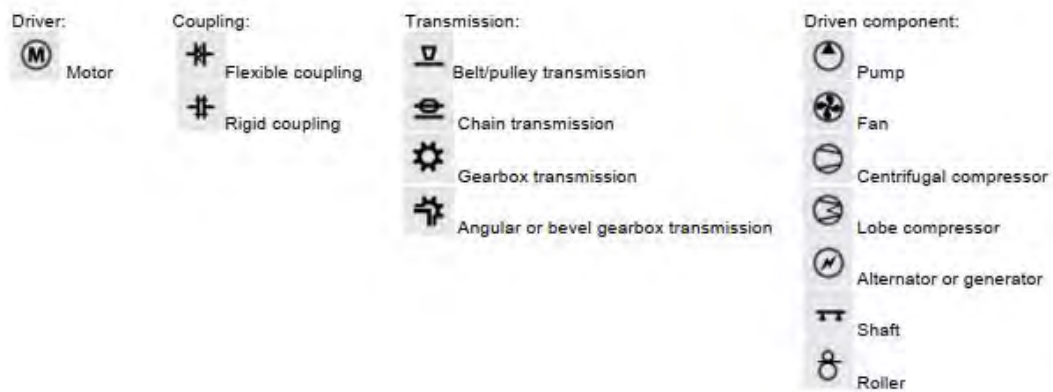
Η λειτουργία setup machine είναι αυτήν που βοηθάει τον μελετητή να σχεδιάσει ένα νέο εξοπλισμό προς μέτρηση και να εισαγάγει όλες τις παραμέτρους (π.χ. ρουλεμάν, σημεία μέτρησης, είδος αισθητηρίου κ.λ.π.).



Η λειτουργία Analyst εμπεριέχει ένα δυνατό λογισμικό ανάλυσης κραδασμών.

Εισαγωγή δεδομένων

Προκειμένου να μπορέσουμε να εκτελέσουμε μία μέτρηση, θα πρέπει πρώτα, όπως είναι λογικό, να ορίσουμε τι ακριβώς θέλουμε να μετρήσουμε. Το πρόγραμμα διευκολύνει αυτή την διαδικασία με την χρήση ενός μεγάλου καταλόγου έτοιμων εξαρτημάτων. Μερικά αυτά αυτά φαίνονται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 4.2-8: Κατάλογος έτοιμων εξαρτημάτων την εισαγωγή δεδομένων

Χρησιμοποιώντας το εικονίδιο «setup machine» από αυτά που παρουσιάστηκαν παραπάνω ο μελετητής επομένως επιλέγει όλα τα εξαρτήματα που αποτελούν τον εξοπλισμό που θέλει να μετρήσει. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας επιλεχθήκαν ένας κινητήρας, ένα κόμπλερ και μια φτερωτή. Για κάθε ένα από τα παραπάνω στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος εισαγάγαμε στοιχεία όπως για το μοτέρ:

- Τον τύπο του αισθητηρίου που θα χρησιμοποιήσουμε
- Την έδραση του κινητήρα
- Την ισχύ του κινητήρα





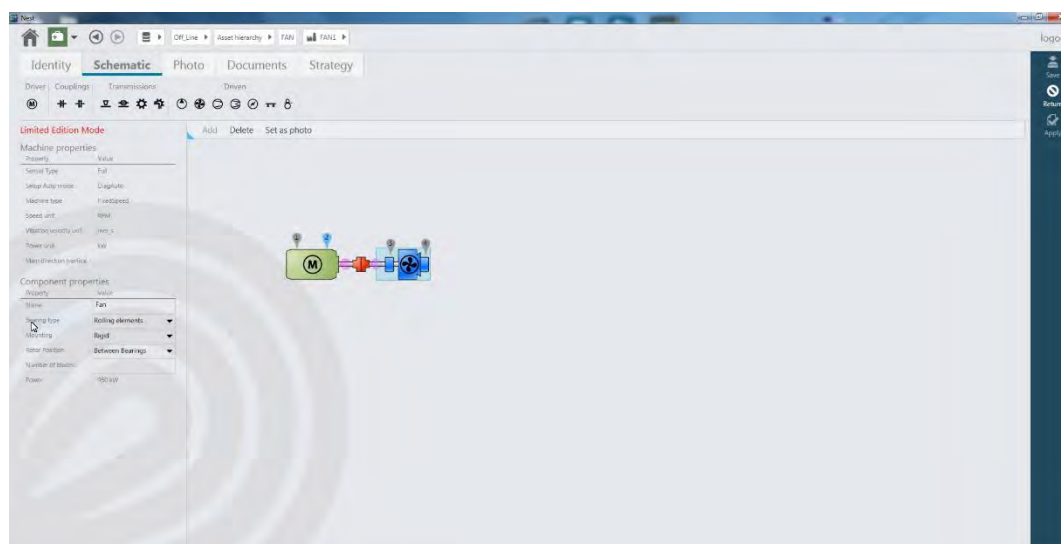
- Τις στροφές περιστροφής (θεωρητικές)
- Το είδος του κινητήρα (σύγχρονος – ασύγχρονος – AC – DC)
- Τα σημεία μέτρησης και είδος του ρουλεμάν σε κάθε ένα από αυτά.

Για το κόμπλερ τα στοιχεία είναι πολύ πιο απλά. Χρειάζεται μόνο το είδος που θα χρησιμοποιηθεί. Για την δική μας περίπτωση όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 4.1.2 έχουμε ένα κόμπλερ με πολύ μικρές ανοχές, άρα το θεωρούμε άκαμπτο.

Για τη φτερωτή πρέπει να εισαγάγουμε τα παρακάτω στοιχεία:

- Την έδραση της φτερωτής
- Τη θέση της φτερωτής (ανάμεσα από του ρουλεμάν η μπροστά) στη δική μας περίπτωση όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 4.1.2 είναι ανάμεσα από τα ρουλεμάν της έδρασης
- Τα σημεία μέτρησης και είδος του ρουλεμάν σε κάθε ένα από αυτά

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται το γραφειακό περιβάλλον του Nest 3 για την εισαγωγή των δεδομένων.



Εικόνα 4.2-9: Περιβάλλον Nest 3 για την εισαγωγή των δεδομένων του εξοπλισμού προς μέτρηση

Εφόσον έχουμε εισαγάγει όλα τα στοιχεία, σώζουμε, και έχουμε έτσι δημιουργήσει τον προς μέτρηση εξοπλισμό.

Μεταφορά δεδομένων από και προς το Falcon

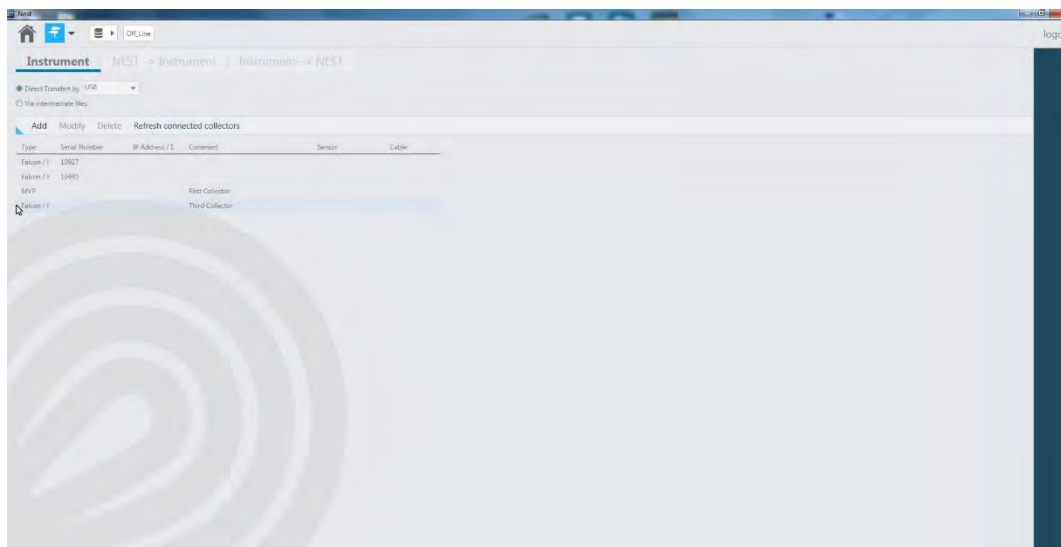
Για την μεταφορά του εξοπλισμού που σχεδιάσαμε στο προηγούμενο παράδειγμα στο Falcon ώστε να μπορούμε να διεξάγουμε τις μετρήσεις μας πρέπει να επιλέξουμε το εικονίδιο Collect. Μέσω της καρτέλας που ανοίγει και φαίνεται στην εικόνα 4.2.10 μπορούμε να επιλέξουμε τη διαδρομή του θα ακολουθήσουν τα δεδομένα.

- Nest – Instrument (Falcon)
- Instrument (Falcon) – Nest





Η πρώτη διαδρομή χρησιμοποιείται για μεταφορά καινούργιων ρουτίνων έλεγχο η τροποποίηση παλιών, ενώ η δεύτερη για να παραλάβουμε δεδομένα μετρήσεων που έχουν γίνει με το Falcon για περαιτέρω ανάλυση.



Εικόνα 4.2-9: Περιβάλλον Nest 3 για την μεταφορά δεδομένων από και προς το Falcon

Ανάλυση δεδομένων μέτρησης

Η ανάλυση των δεδομένων από τις μετρήσεις στους εξοπλισμούς που έχουμε σχεδιάσει και μεταφέρει στο Falcon μπορεί να γίνουν απευθείας στο ίδιο το μηχάνημα μέτρησης ή να γίνει μεταφορά των αποτελεσμάτων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή με την διαδικασία που αναφέραμε παραπάνω και η μετέπειτα ανάλυσή τους χρησιμοποιώντας το NEST Analyst.

Ανάλυση μέσω Falcon

Στην ανάγνωση των αποτελεσμάτων κατευθείαν μέσω του Falcon για κάθε ένα σημείο μέτρησης βλέπουμε την οθόνη τα διαγράμματα για κάθε μια από τις τρεις κατευθύνσεις μέτρησης (χρησιμοποιούμε το 3 axial επιταχυνσιόμετρο). Το Falcon μας δίνει την δυνατότητα να δούμε και την αρχική μέτρηση πλάτους ως προς χρόνο πριν αυτήν επεξεργαστεί και προκύψει το διάγραμμα πλάτους ως προς συχνότητα. Αυτό που βλέπει ο μελετητής στην οθόνη του falcon παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.2-10: Απεικόνιση αποτελεσμάτων μέτρησης στην οθόνη του Falcon





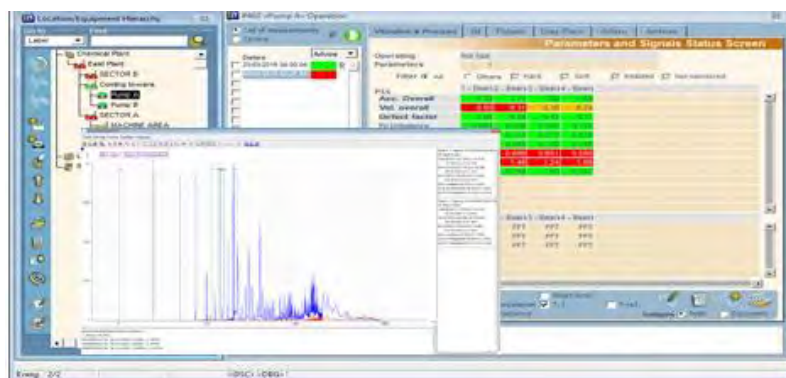
Πέρα από τα διαγράμματα το Falcon παρουσιάζει και χρωματικά την κατάσταση του εξοπλισμού σύμφωνα με το πρότυπο ISO που εντάσσεται ο συγκεκριμένος εξοπλισμός εικόνα 4.2-11. Το πρόγραμμα με βάση τα στοιχεία που εισαγάγαμε στη φάση του σχεδιασμού του εξοπλισμού μας κατανέμει το μηχάνημα που μετράμε στον πίνακα του ISO που έχει παρουσιαστεί και σε αυτήν την εργασία στο κεφάλαιο 2.4.2. Τέλος, όσον αφορά την ανάλυση των μετρήσεων μέσω του μετρητικού μηχανήματος έχουν και την δυνατότητα διάγνωσης βλάβης. Το Falcon μετά το πέρας των μετρήσεων έχει την δυνατότητα να μας προτείνει πιθανά προβλήματα του εξοπλισμού μας και να κάνει προτάσεις ώστε να διαπιστωθεί πιο εύκολα από τον μελετητή ποιο είναι το πρόβλημα που έχει να αντιμετωπίσει. Στην εικόνα 4.2-11 δεξιά φαίνεται η επιφάνεια εργασίας του Falcon κατά την διαδικασία διάγνωσης προβλήματος.



Εικόνα 4.2-11: Αριστερά βλέπουμε την χρωματική απεικόνιση των μετρήσεων κατά ISO αριστερά βλέπουμε την εκτίμηση του Falcon για το πρόβλημα του εξοπλισμού μας.

Ανάλυση μέσω NEST Analyst

Για την χρήση του NEST Analyst πρέπει αρχικά τα δεδομένα των μετρήσεων μας να μεταφερθούν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή όπως παρουσιάστηκε παραπάνω στο ίδιο κεφάλαιο. Με το πέρας της μεταφοράς και χρησιμοποιώντας την λειτουργία Analyst (κόκκινο εικονίδιο) εισερχόμαστε στο περιβάλλον ανάλυσης. Εκεί, σε δένδροειδή μορφή παρουσιάζονται όλοι οι εξοπλισμοί που έχουμε μέτρηση. Επιλέγοντας κάθε ένα αυτό αυτόν στο κέντρο του παραθύρου έχουμε όλες τις μετρήσεις που έχουμε κάνει σε αυτόν τον εξοπλισμό και δεξιά έχουμε για κάθε μια από τις μετρήσεις τα αποτελέσματα. Πατώντας πάνω σε κάθε αποτέλεσμα ανοίγει το διάγραμμα FFT για περαιτέρω ανάλυση. Και πάλι η χρωματική απεικόνιση είναι κατά ISO.



Εικόνα 4.2-12: Περιβάλλον Προγράμματος NEST Analyst





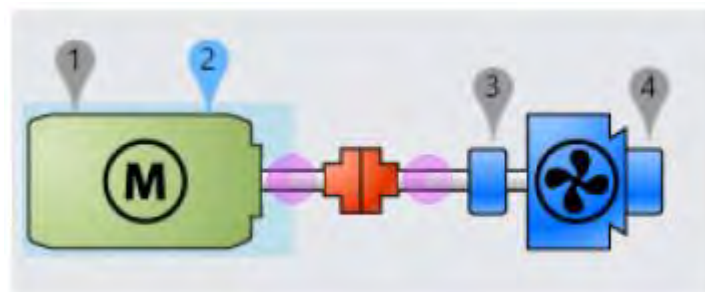
4.3 Διενέργεια μετρήσεων, παρουσίαση και ανάλυσή τους

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έχουμε περιγράψει με ακρίβεια τον εξοπλισμό που θα μετρήσουμε αλλά και το μετρητικό όργανο με το πρόγραμμα που θα χρησιμοποιήσουμε για τις μετρήσεις. Στο κεφάλαιο που θα ακολουθήσει, θα περιγράψουμε την διενέργεια των μετρήσεων στους προς μέτρηση εξοπλισμούς και θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα. Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε μια ανάλυση των αποτελεσμάτων αλλά και την κατάσταση του εξοπλισμού.

4.3.1 Διενέργεια μετρήσεων

Στο κεφάλαιο 4.1 έγινε περιγραφή του εξοπλισμού που θα μετρήσουμε. Η πτερωτή που παρουσιάστηκε δεν λειτουργεί μόνη της. Είναι μια από τις τέσσερις που λειτουργούν παράλληλα για την απαγωγή καυσαερίων. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν και στις τέσσερις πτερωτές. Για την καλύτερη παρατήρησή τους κάναμε δυο κύκλους μετρήσεων με χρονική απόκλιση τεσσάρων μηνών. Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε στις 9/11/2022 και η δεύτερη 17/04/2023.

Κάθε πτερωτή έχει 4 σημεία μέτρησης. Το σχεδιάγραμμα των σημείων μέτρησης παρουσιάζεται στην 4.3-1.



Εικόνα 4.3-1: Σχηματική απεικόνιση σημείων μέτρησης

Για να έχουμε μια αξιόπιστη μέτρηση πρέπει να επιλέξουμε σωστά τους παρακάτω παράγοντες. Στις παραγράφους που θα ακολουθήσουν δίνονται μερικές σωστές πρακτικές:

- Σημεία μέτρησης
- Συνθήκες μέτρησης
- Κατεύθυνση μέτρησης

Σημεία μέτρησης

Ο σωστός καθορισμών του σημείου μέτρησης είναι κομβικής σημασίας. Πιθανά λάθη στον καθορισμό των σημείων μπορεί να εισαγάγει στις μετρήσεις θόρυβο που θα





δυσκολέψει και θα παραπλανήσει τον μελετητή. Έτσι όσον αφορά σωστές πρακτικές στον καθορισμό των σημείων μέτρησης μπορούμε να αναφέρουμε συνοπτικά:

- Οι μετρήσεις θα πρέπει να γίνονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στα ρουλεμάν και αν είναι δυνατόν πάνω στη ζώνη φόρτισης.
- Ο μελετητής πρέπει να αποφεύγει μετρήσεις πάνω σε καλύμματα εξοπλισμών γιατί μπορεί να έχουν παραπλανητικές ενδείξεις λόγω χαλαρότητας ή συντονισμού τους.
- Η τοποθέτηση του αισθητήρα είναι κομβικής σημασίας. Ο αισθητήρας πρέπει να εδράζεται άριστα με γωνία 90^0 στη θέση που θα επιλέξουμε. Βρομιά, σκόνη, χρώμα ακόμα και μια ανομοιομορφία του εξοπλισμού στο σημείο μέτρησης μπορεί να κάνει ζημιά.
- Εκτός σπάνιων περιπτώσεων χρειάζεται να αντιπαραβάλουμε τις μετρήσεις μας με άλλες που έχουμε πάρει στον ίδιο εξοπλισμό. Αυτό σημαίνει ότι τα σημεία μέτρησης πρέπει να είναι πάντα τα ίδια.
- Ενδείκνυται στα σημεία μέτρησης να τοποθετούμε κατεργασμένες επιφάνειες κολλημένες πάνω στον εξοπλισμό μας ώστε να είναι πάντα εκεί και πάντα καθαρές.

Συνθήκες μέτρησης

Κάτι πολύ σημαντικό ακόμα είναι οι συνθήκες λειτουργίας. Οι μετρήσεις μας πρέπει να παίρνονται όταν ο εξοπλισμός λειτουργεί στις φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας του (στροφές, φορτίο, θερμοκρασία) και όχι σε ακραίες καταστάσεις. Έτσι, κομβικό ρόλο διαδραματίζει ο καθορισμός αυτών των συνθηκών μέτρησης για να είναι δυνατή η αντιπαραβολή μετρήσεων διαφορετικών χρονικών στιγμών.

Κατεύθυνση μέτρησης

Ένας ακόμα παράγοντας που καθορίζει τη μέτρηση είναι η κατεύθυνση μέτρησης. Γενικός κανόνας είναι ότι πρέπει να αναζητούμε την κατεύθυνση εφαρμογής των κυρίων δυνάμεων σε εξοπλισμό και να τοποθετούμε κατά τη διεύθυνση αυτή τον αισθητήρα μας. Ο μελετητής δεν πρέπει να ξεχνάει ότι οι δονήσεις είναι αποτέλεσμα δυνάμεων, άρα όπου οι δυνάμεις είναι μεγάλες θα είναι μεγάλες και οι δονήσεις. Οι κατευθύνσεις που μπορούμε να τοποθετήσουμε το αισθητήριό μας είναι τρεις:

- Κατά αξονική κατεύθυνση (Axial): Κάτω από ιδανικές συνθήκες, μετρήσεις κατά την αξονική κατεύθυνση παρουσιάζουν χαμηλά επίπεδα κραδασμών, καθώς οι περισσότερες δυνάμεις εμφανίζονται στους περισσότερους εξοπλισμούς κάθετα στον άξονα. Εντούτοις υπάρχουν και εξαιρέσεις, διότι αυτό έχει να κάνει με το σχεδιασμό και τον τρόπο λειτουργίας του.
- Κατά την οριζόντια κατεύθυνση (Horizontal): Οι μετρήσεις αυτές φανερώνουν τους περισσότερους κραδασμούς, διότι ο εξοπλισμός μας είναι συνήθως πιο εύκαμπτος στο οριζόντιο επίπεδο. Επίσης, κατά αυτή την κατεύθυνση γίνονται πιο φανεροί κραδασμοί που έχουν να κάνουν με την αζυγοσταθμία, η οποία ταλάντωση δημιουργεί ακτινικούς κραδασμούς, που όμως κατά την





κατακόρυφη κατεύθυνση αποσβένονται καλύτερα λόγω αυξημένης αδράνειας του εξοπλισμού.

- Κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση (Vertical): Οι μετρήσεις σε αυτή την κατεύθυνση παρουσιάζουν συνήθως χαμηλότερα επίπεδα κραδασμών από ότι στην οριζόντια κατεύθυνση, λόγω της δυσκαμψίας που οφείλεται στο πλαίσιο στήριξης του εξοπλισμού και στη βαρύτητα.

Στην περίπτωση που μελετάμε και με τον εξοπλισμό που έχουμε, δεν χρειάζεται να κάνουμε την παραπάνω επιλογή. Το αισθητήριο που χρησιμοποιούμε μετράει ταυτόχρονα και στους τρεις άξονες. Το μόνο που πρέπει να προσέχει ο μελετητής είναι να κρατάει σταθερή τη φορά της αξονικής κατεύθυνσης σε όλες τις μετρήσεις για να γνωρίζει το σύστημα συντεταγμένων του.

Στην εικόνα 4.3-1 είδαμε την σχηματική απεικόνιση των σημείων μέτρησης. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα ονόματα των σημείων όπως αυτά θα αναφέρονται και παρακάτω κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, η κατεύθυνση της μέτρησης και ο τύπος του ρουλεμάν που χρησιμοποιείται στο κάθε σημείο.

Πίνακας 4.3-1: Ονομασία σημείων μέτρησης, προδιαγραφές μέτρησης και είδος ρουλεμάν

ID	Όνομα σημείου μέτρησης	Κατεύθυνση μέτρησης	Τύπος ρουλεμάν
1	Electric Motor NDE	Axial – Horizontal - Vertical	NU226
2	Electric Motor DE	Axial – Horizontal - Vertical	6226
3	Fan DE	Axial – Horizontal - Vertical	23232 KW33 C3
4	Fan NDE	Axial – Horizontal - Vertical	22228 KW33 C3





4.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα παραθέσουμε ένα πίνακα για κάθε πτερωτή που μετρήθηκε. Τα διαγράμματα που εμφανίζονται σε αυτό το κεφάλαιο είναι τα διαγράμματα της επιτάχυνσης ως προς τη συχνότητα και μόνο αυτά που παρουσιάζουν κάποιο ενδιαφέρον προς ανάλυση. Στο παράρτημα θα παρουσιαστούν για τα ίδια σημεία, τα διαγράμματα ταχύτητας ως προς συχνότητα.

Πίνακας 4.3-2: Αποτελέσματα μετρήσεων σε πτερωτή Νο 1

ID	Σημείο μέτρησης	Κατεύθυνση	9/11/2022		17/04/2023	
			Vib Vel (mm/s)	Vib Acc (g)	Vib Vel (mm/s)	Vib Acc (g)
1	MT - NDE	Ax	2.13	0.492	0.658	0.124
		HR	0.708	0.365	2.13	0.191
		VR	1.31	0.601	1.30	0.461
2	MT - DE	Ax	0.782	0.218	0.718	0.123
		HR	0.790	0.207	2.22	0.186
		VR	1.84	0.212	1.38	0.357
3	FN - DE	Ax	4.53	0.283	5.08	0.657
		HR	4.10	0.272	4.63	0.531
		VR	1.38	0.516	1.37	1.06
4	FN - NDE	Ax	3.12	0.268	2.58	0.315
		HR	1.44	0.211	3.80	0.308
		VR	0.414	0.213	1.02	0.121

Πίνακας 4.3-3: Αποτελέσματα μετρήσεων σε πτερωτή Νο 2

ID	Σημείο μέτρησης	Κατεύθυνση	9/11/2022		17/04/2023	
			Vib Vel (mm/s)	Vib Acc (g)	Vib Vel (mm/s)	Vib Acc (g)
1	MT - NDE	Ax	1.66	1.18	0.816	1.79
		HR	0.554	0.983	1.59	0.863
		VR	1.55	2.22	1.69	2.92
2	MT - DE	Ax	0.773	0.198	0.423	1.10
		HR	0.534	0.365	1.27	0.820
		VR	1.99	0.361	1.23	2.01
3	FN - DE	Ax	2.23	0.137	1.41	0.122
		HR	1.62	0.122	2.08	0.121
		VR	0.393	0.189	0.376	0.234
4	FN - NDE	Ax	1.37	0.224	1.26	0.243
		HR	1.42	0.193	1.82	0.210
		VR	0.336	0.279	0.443	0.322





Πίνακας 4.3-4: Αποτελέσματα μετρήσεων σε πτερωτή Νο 3

ID	Σημείο μέτρησης	Κατεύθυνση	9/11/2022		17/04/2023	
			Vib Vel (mm/s)	Vib Acc (g)	Vib Vel (mm/s)	Vib Acc (g)
1	MT - NDE	Ax	0.723	0.265	0.577	0.284
		HR	1.16	0.263	1.41	0.284
		VR	0.805	0.920	0.990	0.721
2	MT - DE	Ax	0.822	0.349	0.611	0.506
		HR	0.663	0.382	1.46	0.531
		VR	0.867	0.462	1.02	1.49
3	FN - DE	Ax	1.19	0.104	3.00	0.202
		HR	2.53	0.121	2.30	0.144
		VR	0.553	0.149	0.626	0.153
4	FN - NDE	Ax	1.48	0.229	2.5	0.228
		HR	2.72	0.209	3.43	0.216
		VR	0.513	0.333	0.543	0.248

Πίνακας 4.3-5: Αποτελέσματα μετρήσεων σε πτερωτή Νο 4

ID	Σημείο μέτρησης	Κατεύθυνση	9/11/2022		17/04/2023	
			Vib Vel (mm/s)	Vib Acc (g)	Vib Vel (mm/s)	Vib Acc (g)
1	MT - NDE	Ax	1.06	0.250	0.888	0.241
		HR	2.78	0.401	2.57	0.280
		VR	1.30	0.971	1.23	0.805
2	MT - DE	Ax	0.865	0.358	1.08	0.546
		HR	1.37	0.379	2.24	0.671
		VR	1.92	0.383	1.41	1.51
3	FN - DE	Ax	2.86	0.410	2.92	0.503
		HR	3.31	0.374	3.23	0.363
		VR	0.879	0.700	0.755	0.821
4	FN - NDE	Ax	2.74	0.361	2.47	0.266
		HR	3.52	0.325	3.56	0.272
		VR	0.790	0.334	0.554	0.237

Η χρωματική απεικόνιση για κάθε μια τιμή βασίζεται στο πρότυπο ISO 10816-3 πίνακας του οποίου έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 2.4.2. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται συνοπτικά αυτή η χρωματική απεικόνιση και η σημασία της αλλά και πρόταση προς τον χρήστη του εξοπλισμού – μελετητή για τις μελλοντικές του κινήσεις με σκοπό την σωστή λειτουργία του εξοπλισμού.



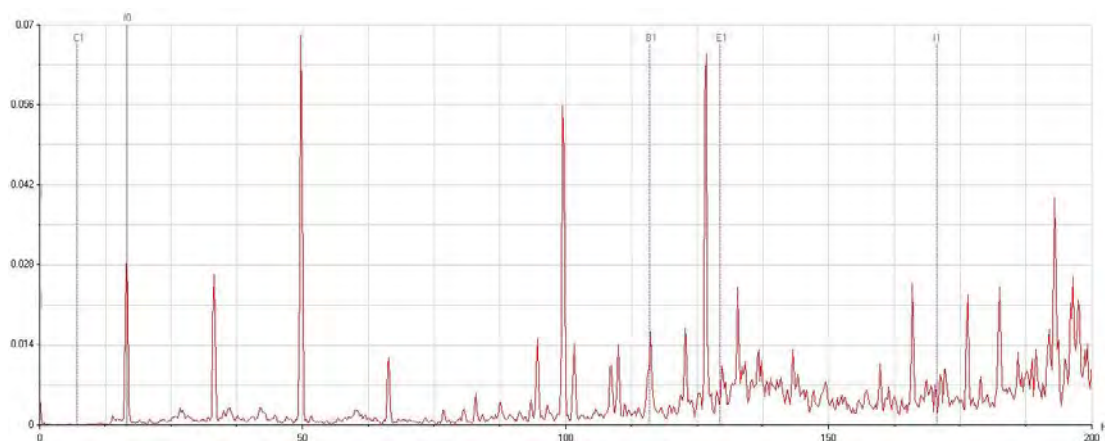


Πίνακας 4.3-6: Χρωματική επεξήγηση

Σοβαρότητα	Κατάσταση	Οδηγία
Μη αποδεκτό	Ο κραδασμός προκαλεί πρόβλημα στον εξοπλισμό	Άμεσες διορθωτικές κινήσεις είναι υποχρεωτικές
Μη ικανοποιητικό	Επιτρέπεται μόνο βραχυπρόθεσμη λειτουργία του εξοπλισμού και συνεχής παρακολούθηση	Προτείνονται βραχυπρόθεσμες διορθωτικές κινήσεις με συνεχή παρακολούθηση
Αποδεκτό	Ο εξοπλισμός λειτουργεί κανονικά και προτείνεται η συνεχής παρακολούθηση	Προτείνονται μακροπρόθεσμες διορθωτικές κινήσεις με συνεχή παρακολούθηση
Επιθυμητό	Ο εξοπλισμός λειτουργεί κανονικά	Προτείνεται πρόγραμμα παρακολούθησης

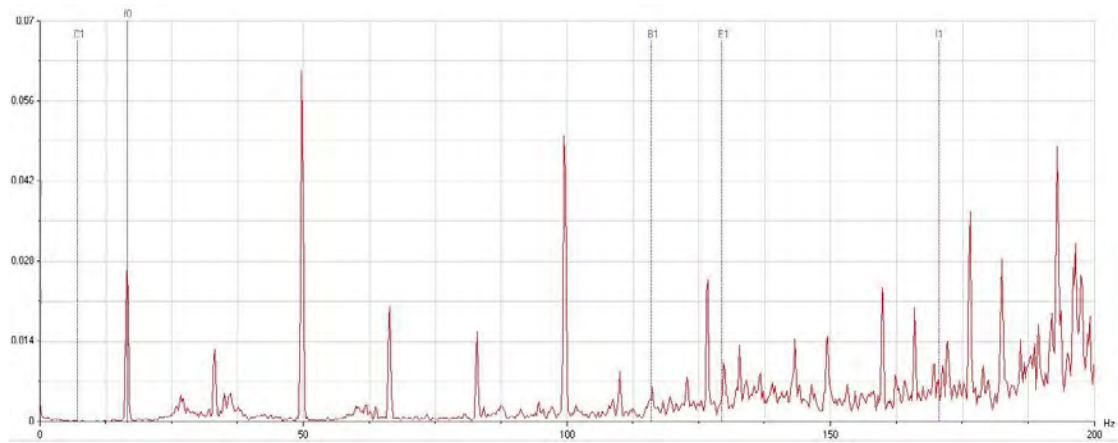
Για την περσινή Νο 1 τα σημεία με αυξημένες τιμές είναι τα:

- FN – DE (Axial – Horizontal και για τις δυο μετρήσεις)
- FN – NDE (Axial για την μέτρηση 9/11/2023 και Axial – Horizontal για την μέτρηση 17/4/2023)

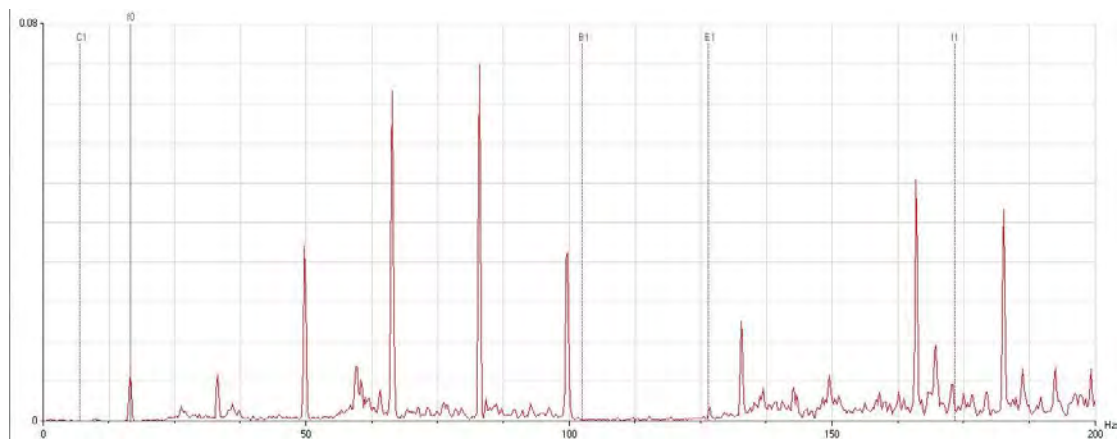


Εικόνα 4.3-2: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – DE AX 9/11/2023

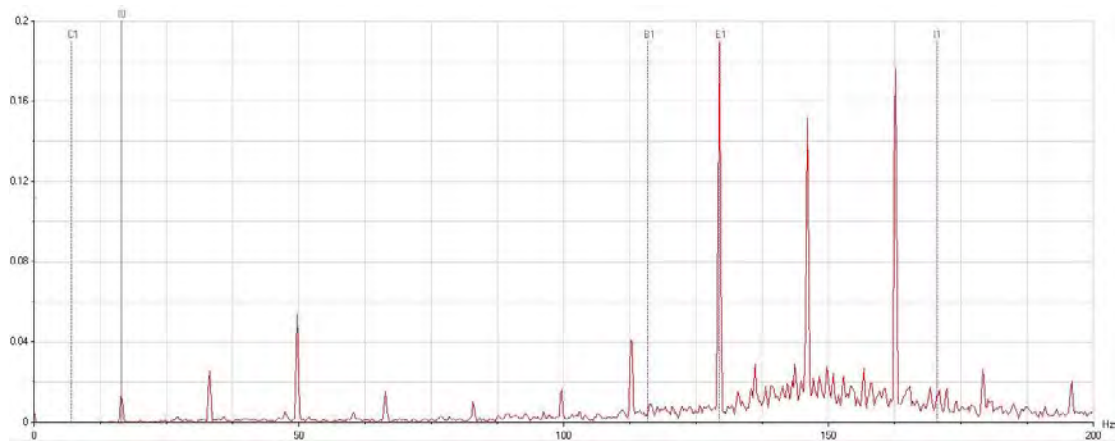




Εικόνα 4.3-3: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – DE HR 9/11/2023

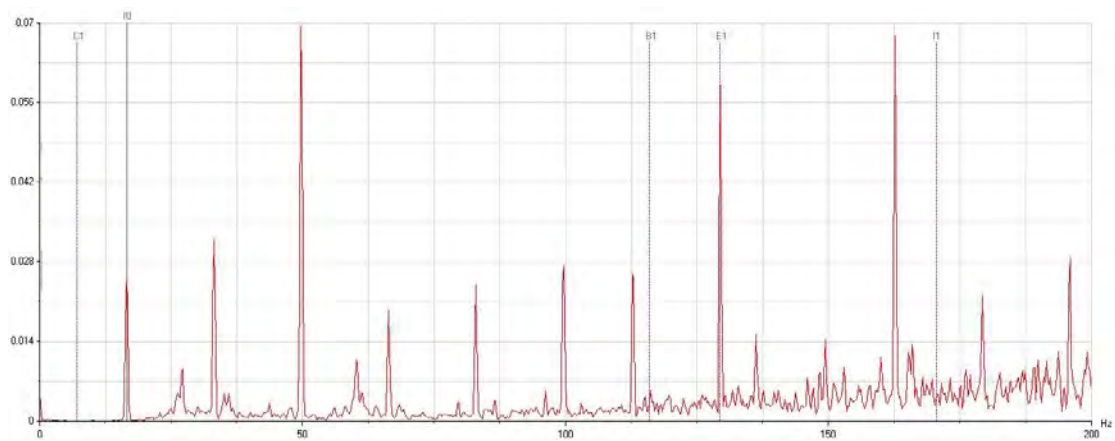


Εικόνα 4.3-4: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – NDE AX 9/11/2023

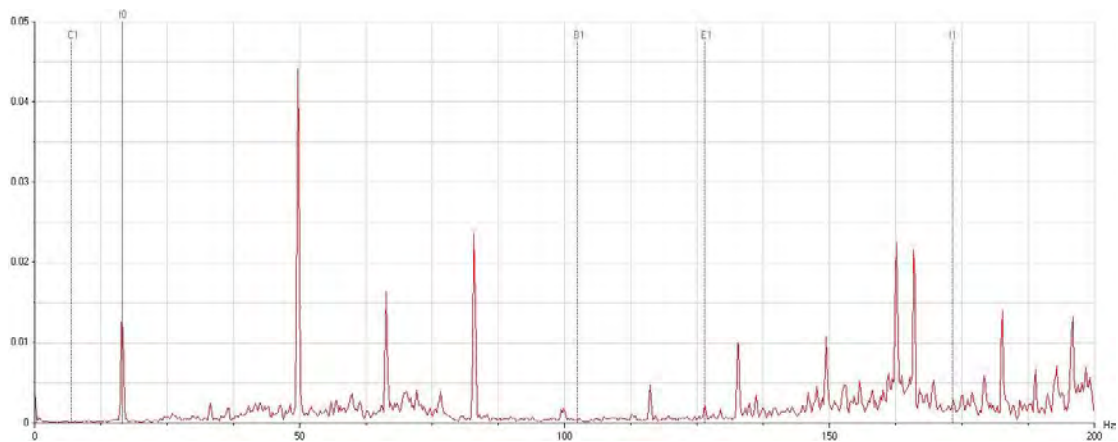


Εικόνα 4.3-5: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – DE AX 17/04/2023

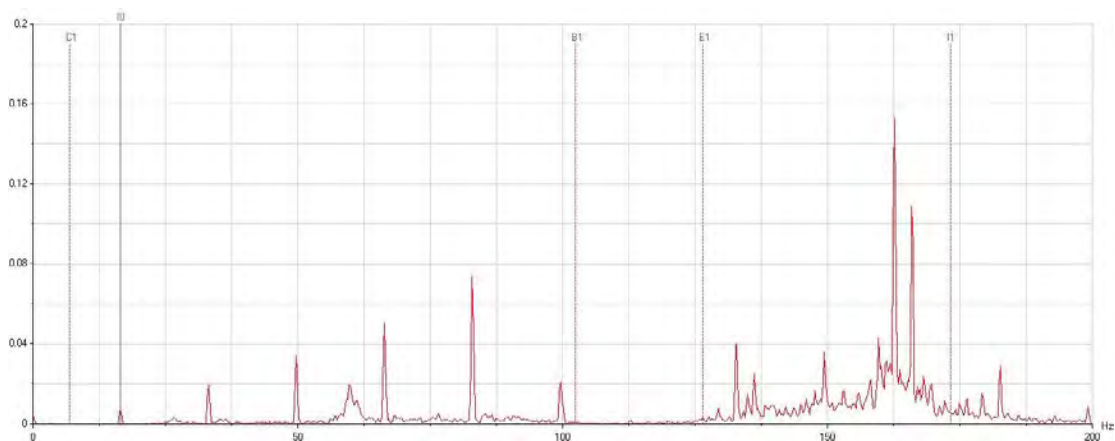




Εικόνα 4.3-6: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – DE HR 17/04/2023



Εικόνα 4.3-7: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – NDE AX 17/04/2023

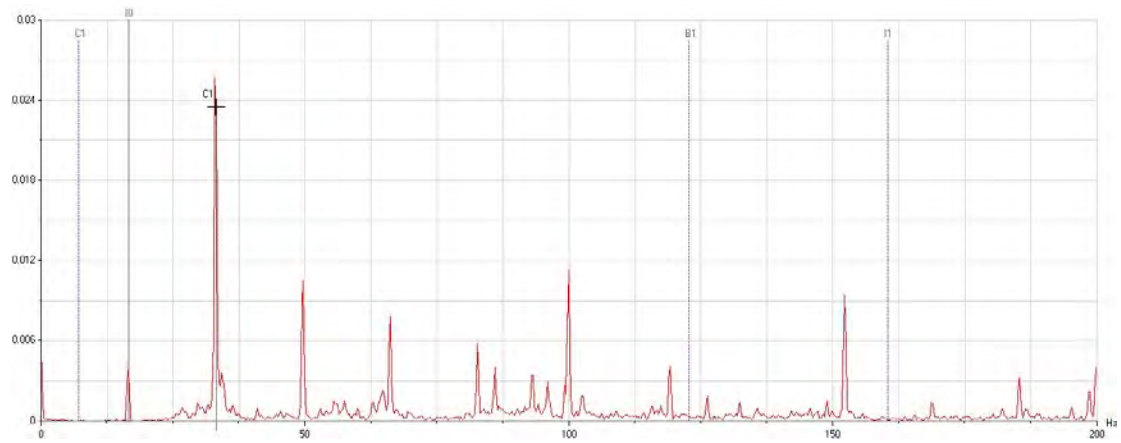


Εικόνα 4.3-8: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – NDE HR 17/04/2023

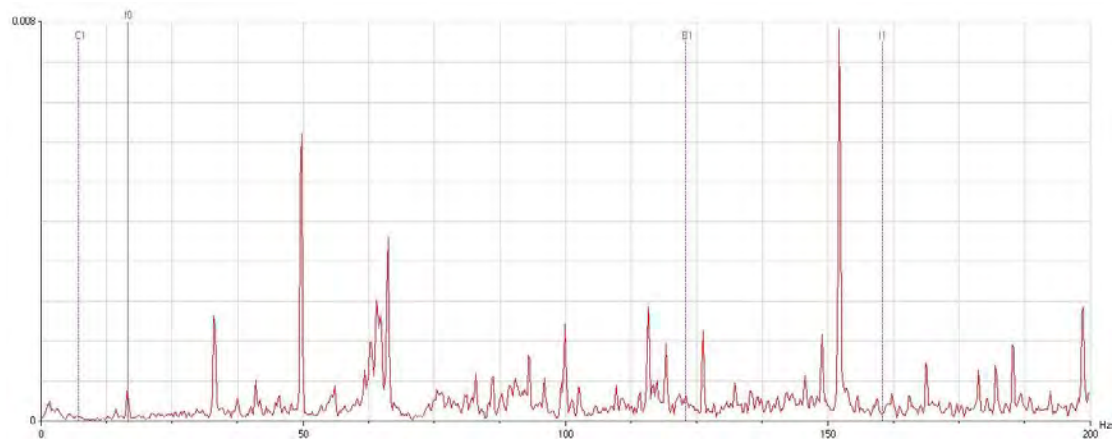
Για την περσώτη No 2 τα σημεία με αυξημένες τιμές είναι τα:

- MT – NDE (Axial – Horizontal – Vertical και για τις δυο μετρήσεις)
- MT – DE (Axial – Horizontal – Vertical για την μέτρηση 17/4/2023)

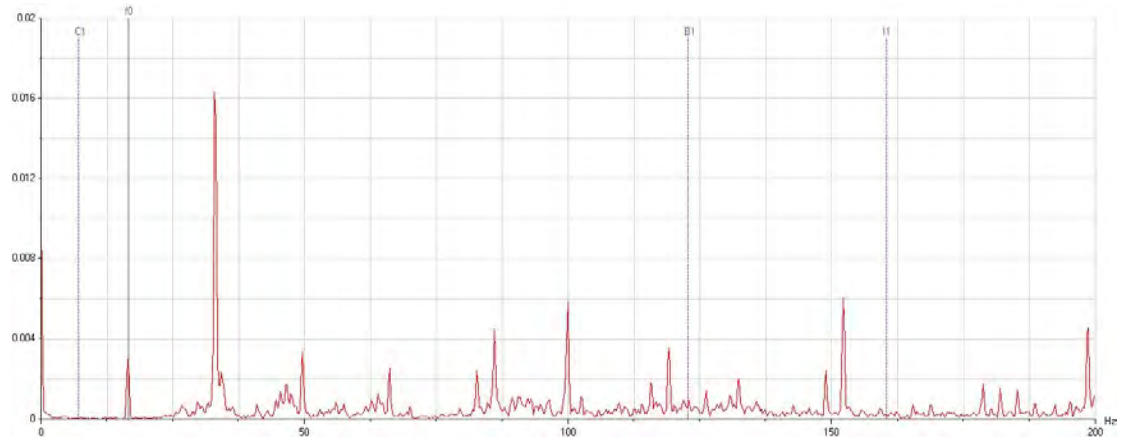




Εικόνα 4.3-9: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης MT – NDE AX 9/11/2022

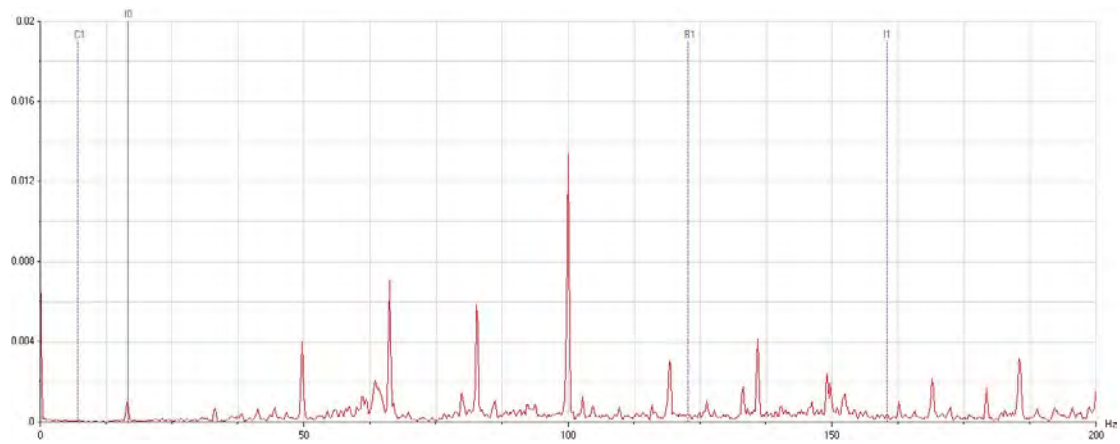


Εικόνα 4.3-10: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης MT – NDE HR 9/11/2022

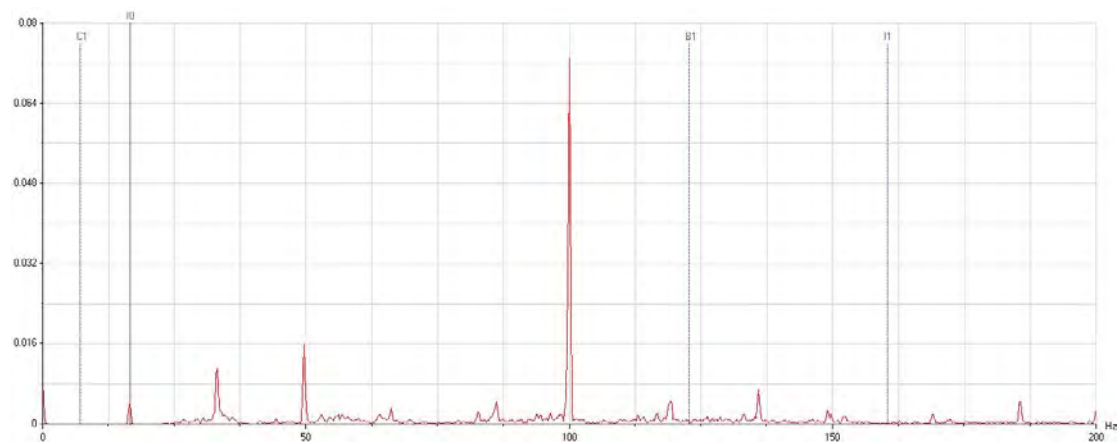


Εικόνα 4.3-11: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης MT – NDE VR 9/11/2022

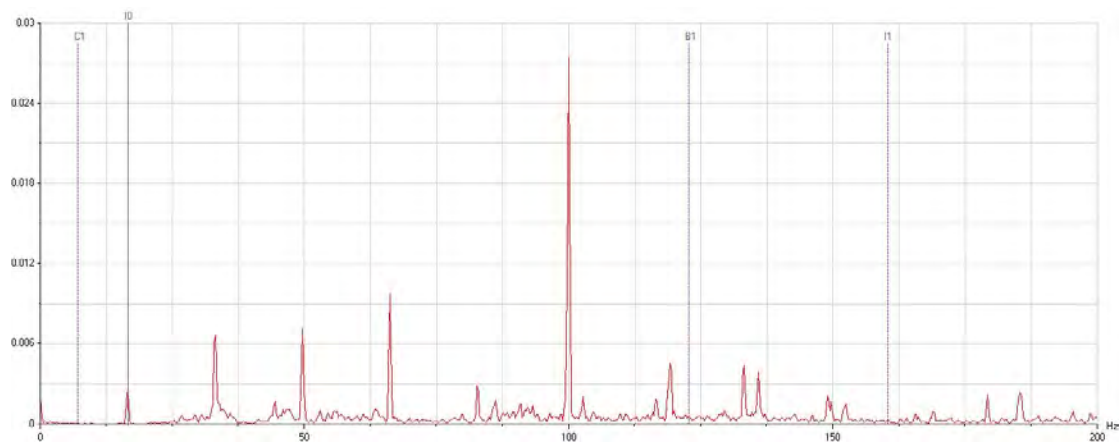




Εικόνα 4.3-12: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης MT – NDE AX 17/4/2023

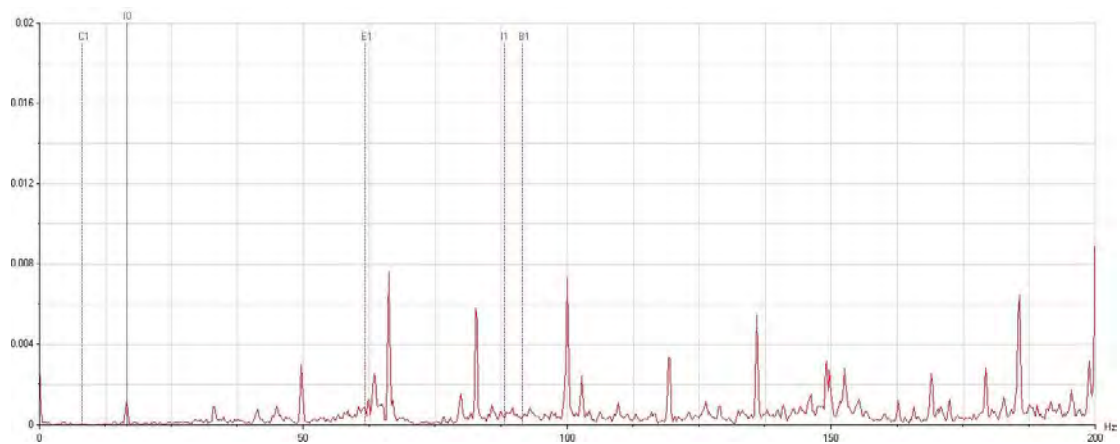


Εικόνα 4.3-13: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης MT – NDE HR 17/4/2023

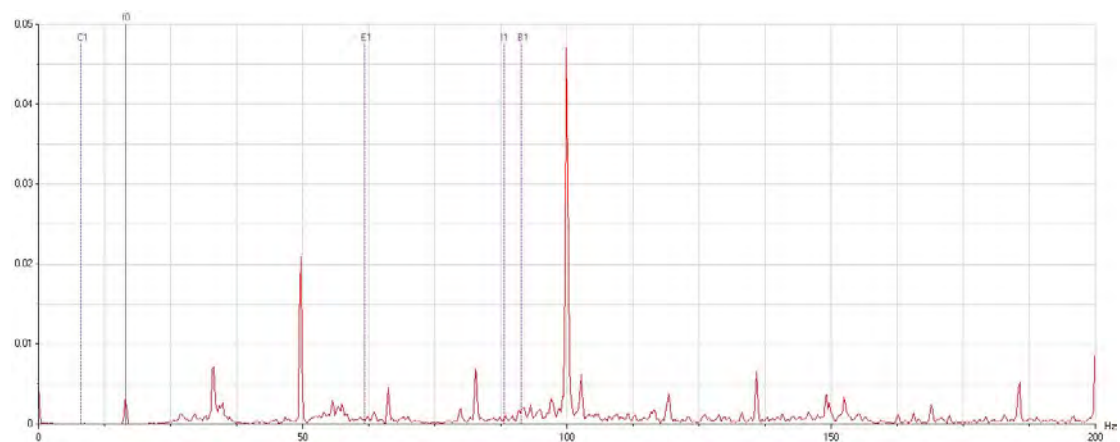


Εικόνα 4.3-14: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης MT – NDE VR 17/4/2023

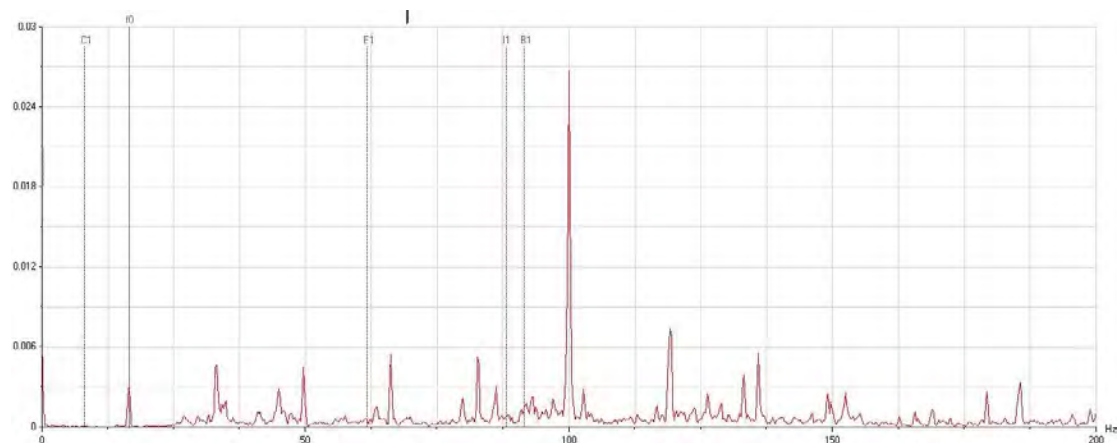




Εικόνα 4.3-15: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης MT – DE AX 17/4/2023



Εικόνα 4.3-16: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης MT – DE HR 17/4/2023

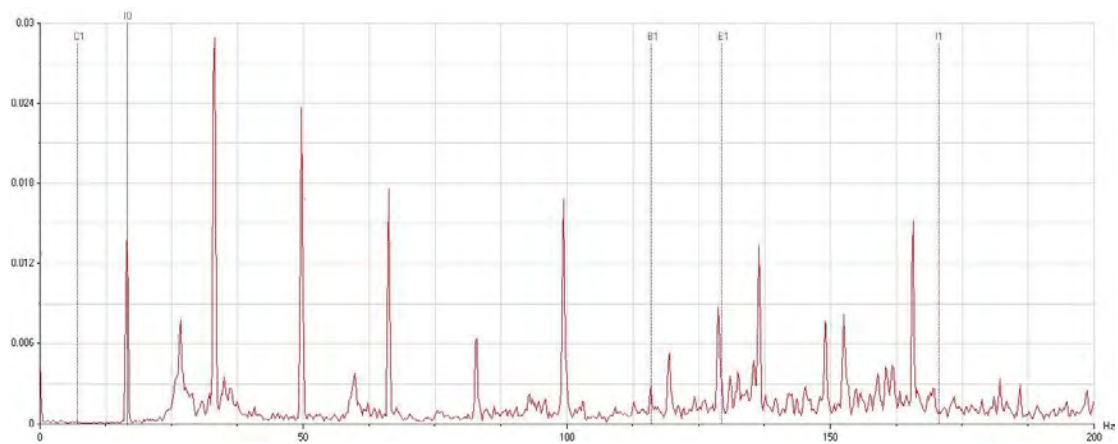


Εικόνα 4.3-17: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης MT – DE VR 17/4/2023

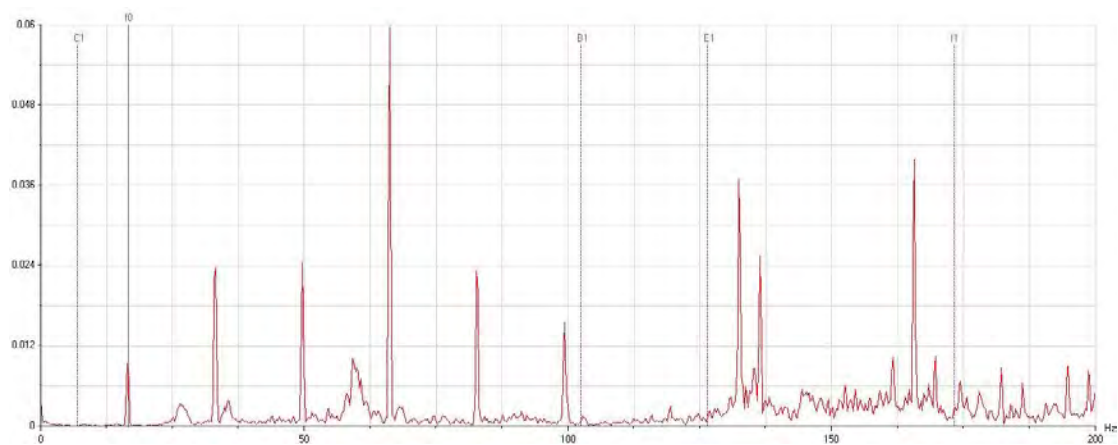
Για την περωτή No 3 τα σημεία με αυξημένες τιμές είναι τα:

- FN – DE (Horizontal και για τις δυο μετρήσεις και Axial για την μέτρηση 17/4/2023)
- FN – NDE (Horizontal και για τις δυο μετρήσεις και Axial για την μέτρηση 17/4/2023)

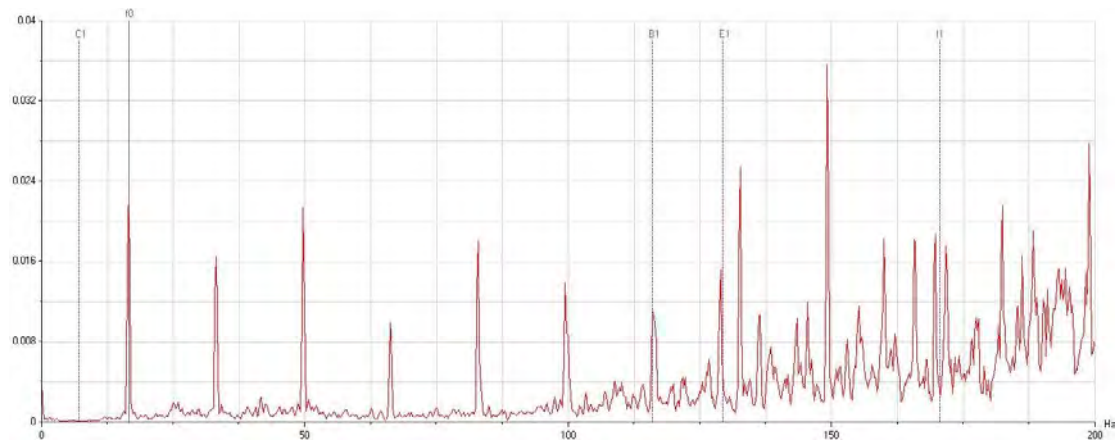




Εικόνα 4.3-18: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – DE HR 9/11/2023

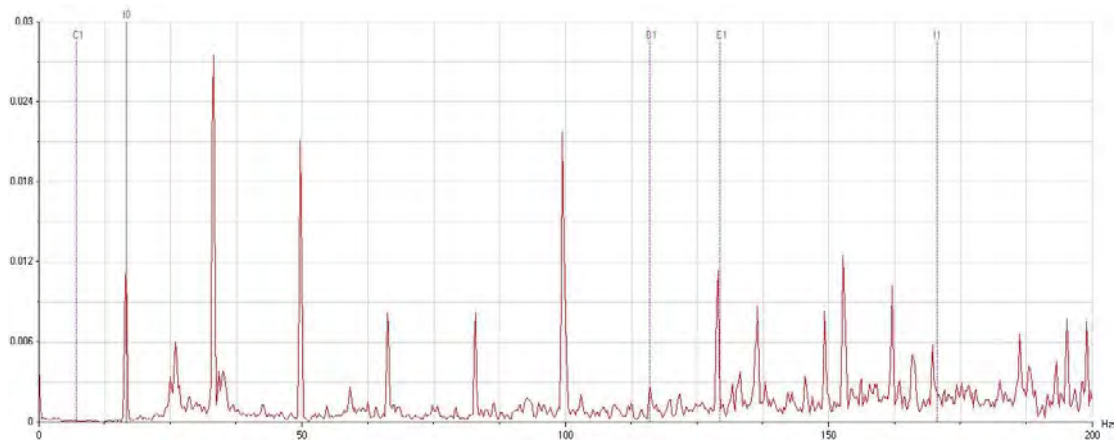


Εικόνα 4.3-19: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – NDE HR 9/11/2023

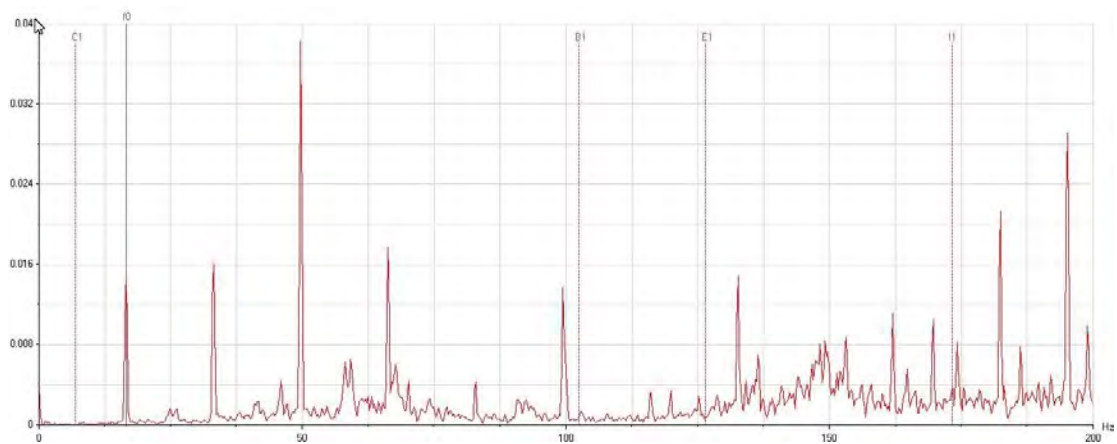


Εικόνα 4.3-20: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – DE AX 17/4/2023

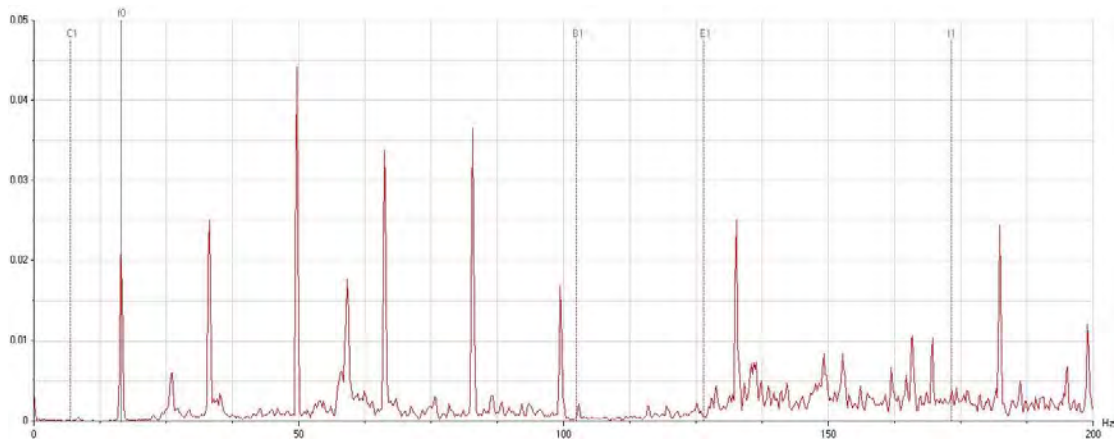




Εικόνα 4.3-21: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – DE HR 17/4/2023



Εικόνα 4.3-22: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – NDE AX 17/4/2023

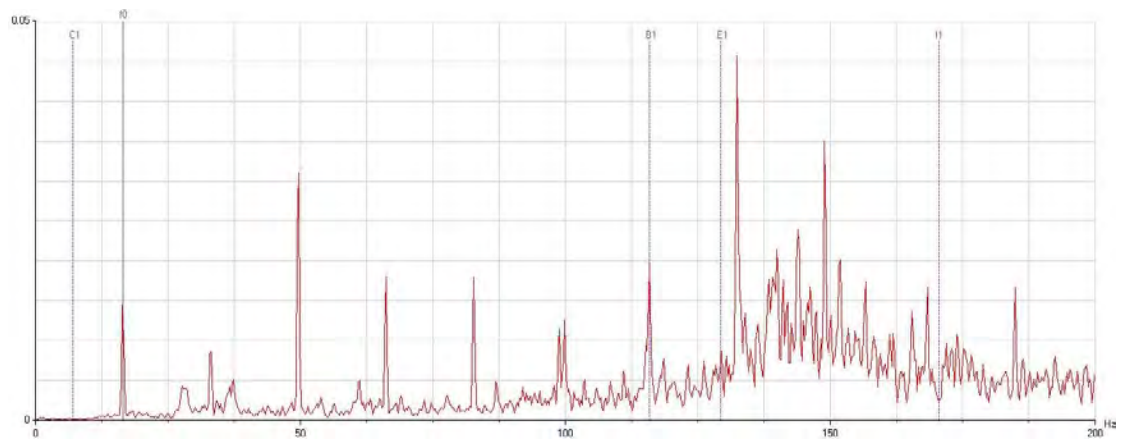


Εικόνα 4.3-23: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – NDE HR 17/4/2023

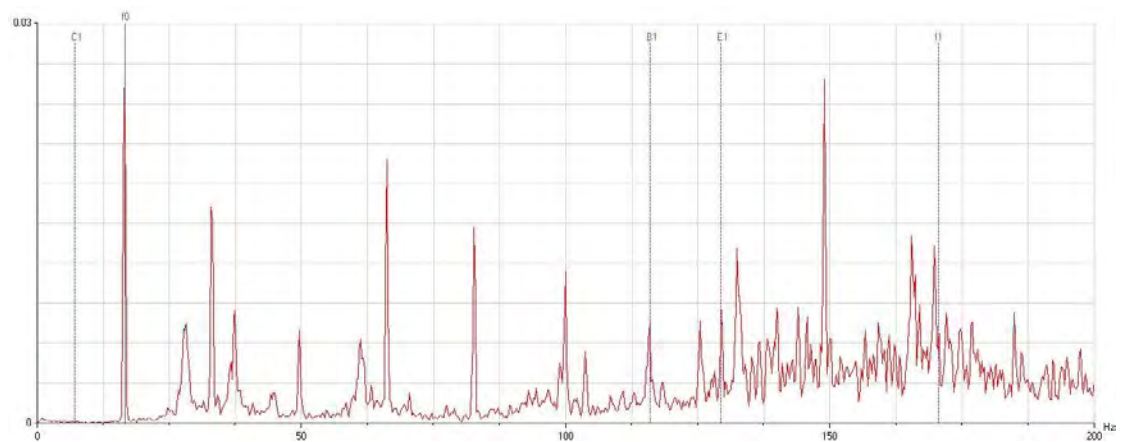
Για την πτερωτή No 4 παρατηρούμε ότι έχουμε αυξημένες τιμές εκτός από την πτερωτή και στο μοτέρ. Οι μετρήσεις του μοτέρ είναι χαμηλές στο όριο του normal με το acceptable σύμφωνα με το πρότυπο ISO. Επομένως επιλέχθηκε να μην παρουσιαστούν. Έτσι τα σημεία με αυξημένες τιμές είναι τα:

- FN – DE (Horizontal - Axial και για τις δυο μετρήσεις)
- FN – NDE (Horizontal - Axial και για τις δυο μετρήσεις)

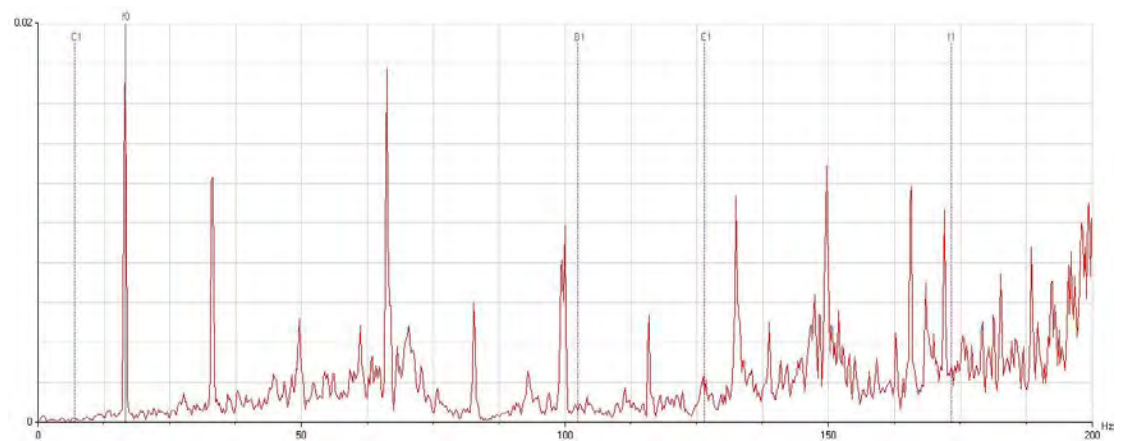




Εικόνα 4.3-24: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – DE AX 9/11/2022

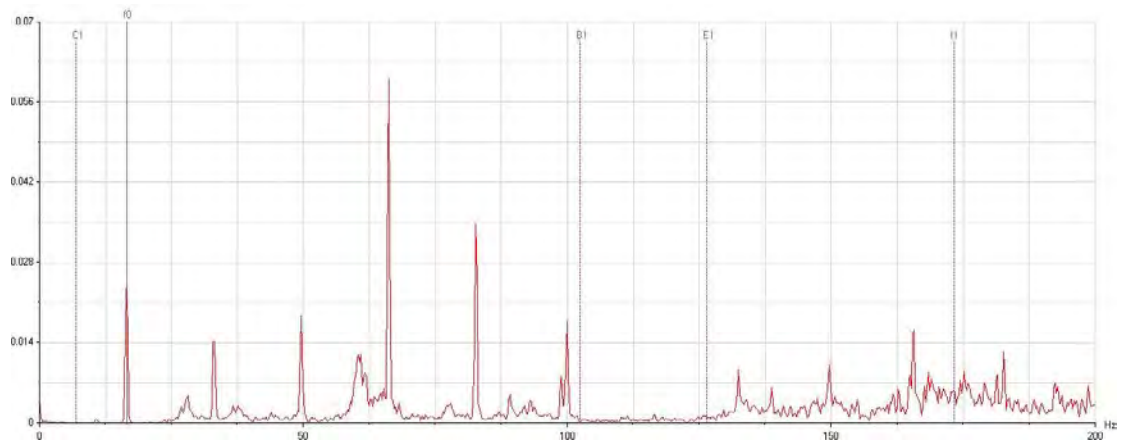


Εικόνα 4.3-25: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – DE HR 9/11/2022

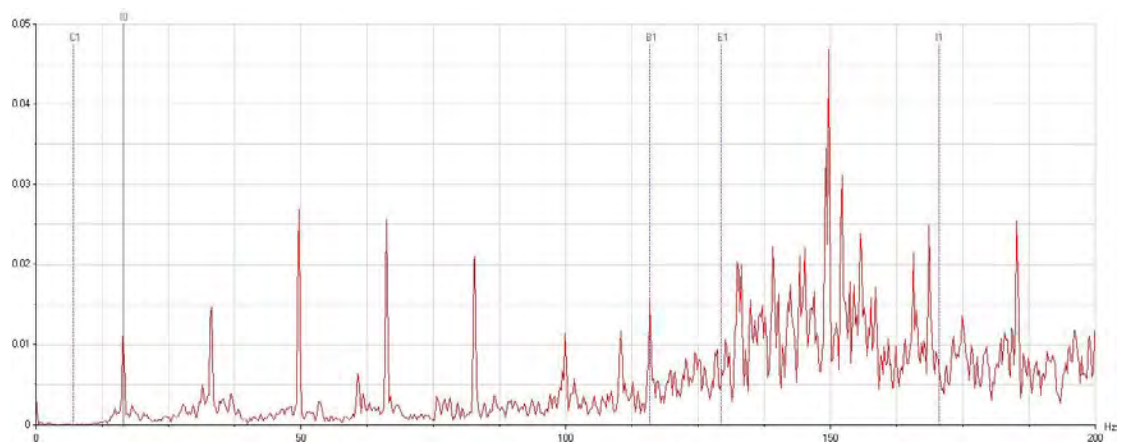


Εικόνα 4.3-26: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – NDE AX 9/11/2022

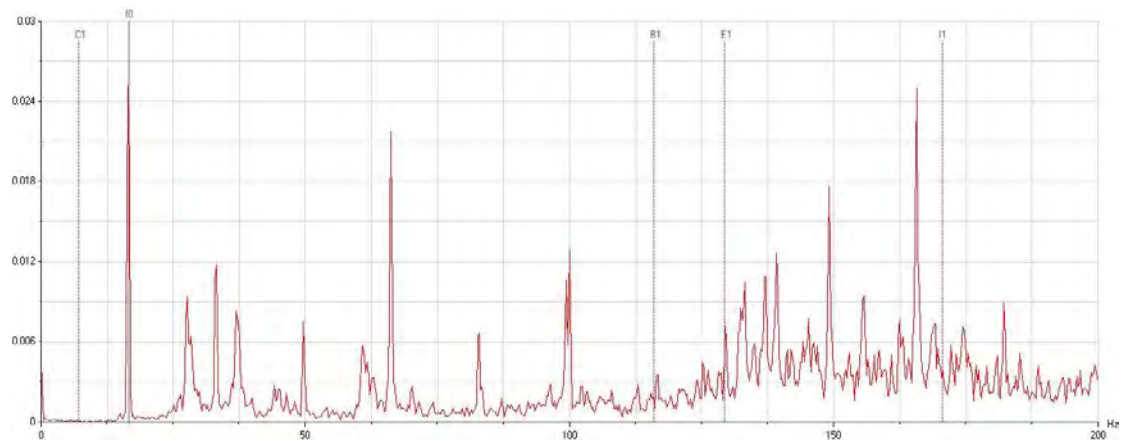




Εικόνα 4.3-27: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – NDE HR 9/11/2022

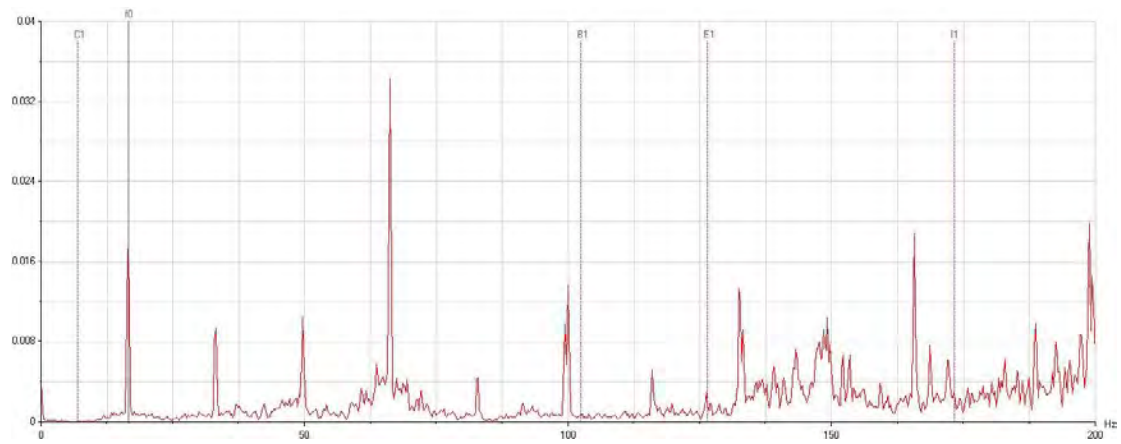


Εικόνα 4.3-28: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – DE AX 17/4/2023

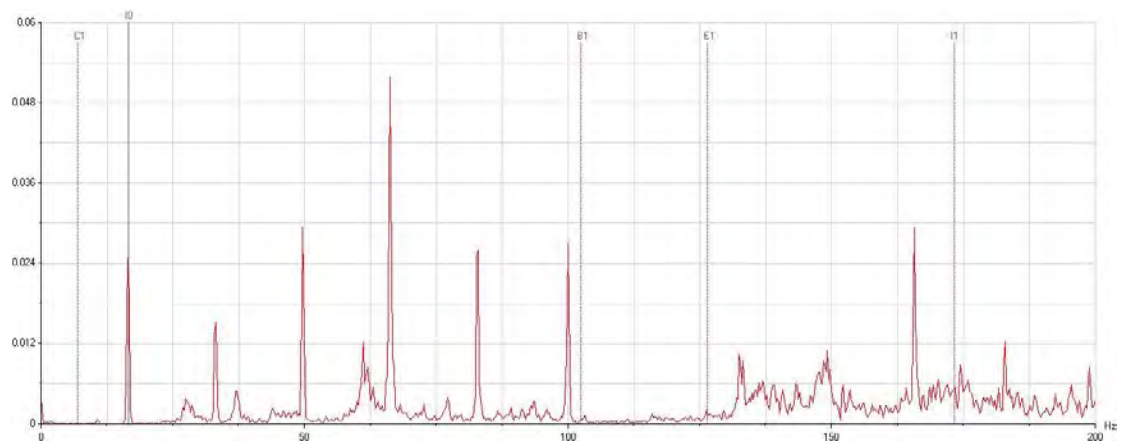


Εικόνα 4.3-29: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – DE HR 17/4/2023





Εικόνα 4.3-30: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – NDE AX 17/4/2023

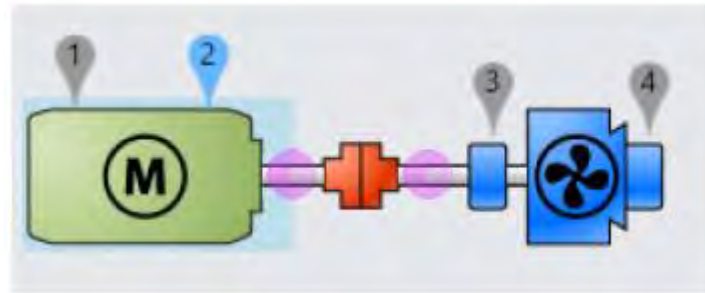


Εικόνα 4.3-31: Διάγραμμα για σημείο μέτρησης FN – NDE HR 17/4/2023



4.3.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων και κατάστασης εξοπλισμού

Έχοντας παρουσιάσει τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο κεφάλαιο αυτό θα τα αναλύσουμε και θα προτείνουμε κινήσεις που πρέπει να γίνουν ώστε να διασφαλιστεί η σωστή και απρόσκοπτη λειτουργία του εξοπλισμού μας. Για ευκολία του αναγνώστη θα παραθέσουμε ξανά σε αυτό το κεφάλαιο την σχηματική απεικόνιση των σημείων μέτρησης που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4.3.1 αλλά και τον πίνακα του ίδιου κεφαλαίου με το όνομα κάθε σημείου και τον τύπο του ρουλεμάν που φοράει.



Εικόνα 4.3-32: Σχηματική απεικόνιση σημείων μέτρησης

Πίνακας 4.3-7: Ονομασία σημείων μέτρησης, προδιαγραφές μέτρησης και είδος ρουλεμάν

ID	Όνομα σημείου μέτρησης	Κατεύθυνση μέτρησης	Τύπος ρουλεμάν
1	Electric Motor NDE	Axial – Horizontal - Vertical	NU226
2	Electric Motor DE	Axial – Horizontal - Vertical	6226
3	Fan DE	Axial – Horizontal - Vertical	23232 KW33 C3
4	Fan NDE	Axial – Horizontal - Vertical	22228 KW33 C3

Ακόμα ένας πίνακας που θα βοηθήσει τον μελετητή να καταλάβει τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι ο πίνακας με τις συχνότητες ελαττωμάτων των ρουλεμάν. Ο πίνακας περιέχει την ταχύτητα περιστροφής της πτερωτής, τους τύπους των ρουλεμάν, τις συχνότητες ελαττωμάτων για κάθε ένα από τα ρουλεμάν για συχνότητα 1Hz αλλά και για τη συχνότητα περιστροφής.



Πίνακας 4.3-8: Συχνότητες ελαττωμάτων για κάθε ρουλεμάν του προς μελέτη εξοπλισμού

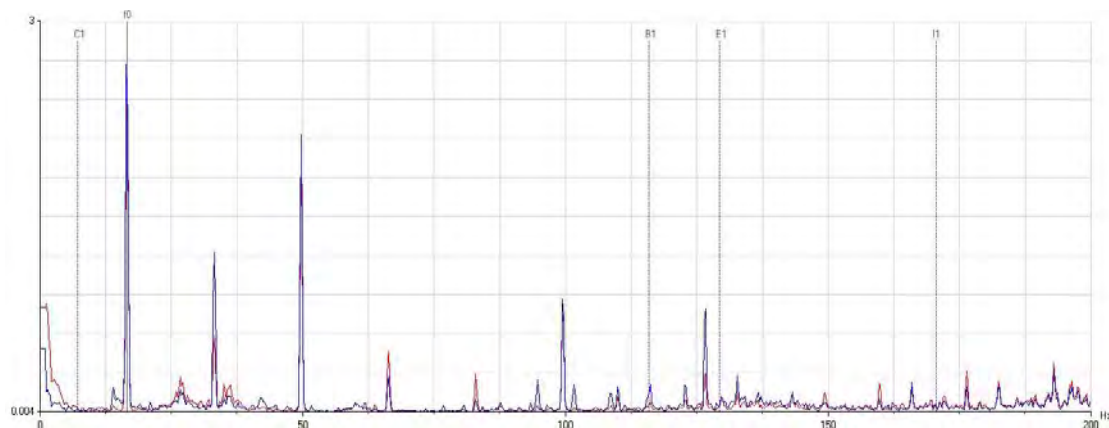
Ταχύτητα περιστροφής (Hz)	Τύπος ρουλεμάν	Συχνότητα σφαλμάτων για 1Hz					Συχνότητα σφαλμάτων για 16.61Hz				
		BSF (Hz)	BSFx2 (Hz)	BPFO (Hz)	BPFI (Hz)	FTF (Hz)	BSF (Hz)	BSFx2 (Hz)	BPFO (Hz)	BPFI (Hz)	FTF (Hz)
16.61	NU226	3.69	7.37	7.37	9.63	0.43	61.21	122.41	122.41	159.95	7.14
	6226	2.74	5.49	3.71	5.29	0.49	45.59	91.18	61.62	87.86	8.13
	23232										
	KW33 C3	3.48	6.96	7.76	10.24	0.43	57.8	115.6	128.89	170.08	7.14
	22228 KW33 C3	3.07	6.15	7.59	10.4	0.42	51.08	102.15	126.06	172.74	6.97

Τέλος, σημειώνεται ότι θα παρουσιαστούν ξανά κάποια διαγράμματα από αυτά που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο αλλά και στο παράρτημα, ώστε να βοηθήσουμε τον αναγνώστη στην κατανόηση της ανάλυσης.

Ανάλυση αποτελεσμάτων και προτάσεις για την πτερωτή Νο1

Μέτρηση 9/11/2022

Στην θέση FN – DE και στις δυο κατευθύνσεις AX και HR παρατηρούμε την εμφάνιση αρμονικών στην ταχύτητα περιστροφής έως και την έκτη αρμονική το οποίο είναι ένα μοτίβο χαλαρότητας. Ακόμα, παρατηρούμε πιθανά ελαττώματα στο ρουλεμάν αυτής της έδρας μιας και εμφανίζονται κάποιες από τις συχνότητες ελαττωμάτων των ρουλεμάν, όμως η φθορά είναι ακόμα σε πολύ αρχικό στάδιο εικόνα 4.3-33.



Εικόνα 4.3-33: Σύγκριση AX και HR τιμών για τη θέση FN - DE

Για την θέση FN – NDE πάλι παρατηρούμε ακριβώς το ίδιο μοτίβο με αρμονικές της ταχύτητας περιστροφής μέχρι και την 6 – 7 αρμονική αλλά μόνο στην κατεύθυνση AX. Επίσης, εδώ δεν παρατηρούμε καμιά συχνότητα ελαττωμάτων ρουλεμάν.

Οι προτάσεις για την πτερωτή Νο1 όσον αφορά τη μέτρηση στις 9/11/2022 είναι:

- Έλεγχος για πιθανές αξονικές χαλαρότητες (πρόβλημα στους αποστάτες ακινητοποίησης της σταθερής έδρας, πρόβλημα στο κωνικό χιτώνιο)





- Μέτρηση των ακτινικών διακένων του ρουλεμάν
- Έλεγχος στην λίπανση του ρουλεμάν
- Επανέλεγχος υστέρα από χρονικό διάστημα λειτουργίας τεσσάρων μηνών

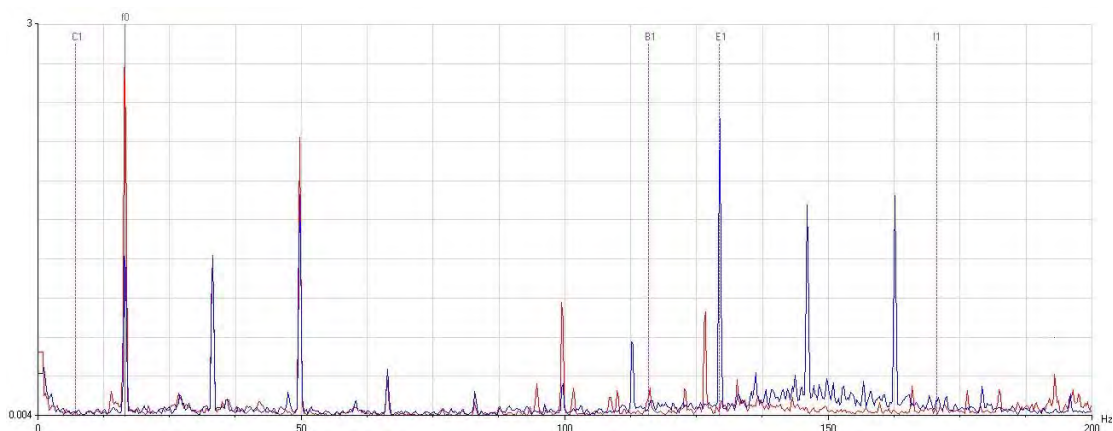
Από τον έλεγχο των παραπάνω σημείων προέκυψε ότι:

- Οι αποστάτες σταθεροποίησης ήταν ακριβώς στις διαστάσεις που αναφέρει ο κατασκευαστής.
- Το κωνικό χιτώνιο πάνω στο οποίο αρμόζει το ρουλεμάν ήταν στην θέση του χωρίς σημάδια φθοράς και μετακίνησης.
- Η στάθμη του λαδιού στο κουζινέτο ελέγχθηκε και αλλάχθηκε το λάδι λίπανσης.
- Σύμφωνα με τον κατασκευαστή του ρουλεμάν το ακτινικό διάκενο του ρουλεμάν 23232 KW33-C3 με κωνική εσωτερική τρύπα και για άξονα 140 πρέπει να είναι 0,16 – 0,20 mm. Στη μέτρηση που έγινε το διάκενο βρέθηκε 0,20 -0,25 (ο τρόπος μέτρησης περιγράφεται από τον κατασκευαστή, είναι μη παρεμβατικός και γίνεται με φίλερ, γι' αυτό και το αποτέλεσμα είναι ένα εύρος τιμών και όχι μια ακριβής τιμή). Η τιμή αυτή δεν είναι μέσα στα όρια του κατασκευαστή.

Σε συνέχεια των ευρημάτων που περιγράφηκαν παραπάνω η κατάσταση της πετρωτής κρίθηκε αποδεκτή. Η πετρωτή θα συνεχίσει να λειτουργεί χωρίς καμιά παρέμβαση και θα συνεχίσουμε την παρακολούθησή της για να δούμε πως εξελίσσεται το φαινόμενο.

Μέτρηση 17/4/2023

Στην επανάληψη των μετρήσεων παρατηρούμε για τη θέση FN – DE, στις δυο κατευθύνσεις Ax και HR, την εμφάνιση αρμονικών στην ταχύτητα περιστροφής έως και την έκτη αρμονική το οποίο είναι ένα μοτίβο χαλαρότητας, όπως ακριβώς και στην μέτρηση στις 9/11/2022, χωρίς μάλιστα να έχουν κάποια μεγάλη διαφορά. Στην εικόνα 4.3-34 παρατηρούμε τη σύγκριση των τιμών της παλιάς και της καινούργιας μέτρησης για το σημείο FN – DE Ax.



Εικόνα 4.3-34: Σύγκριση FN – DE Ax για 9/11/2022 και 17/4/2023

Οι τιμές της συχνότητας ελαττώματος ρουλεμάν εμφανίζονται και πάλι με μια αύξηση.





Για την θέση FN – NDE πάλι παρατηρούμε ακριβώς το ίδιο μοτίβο με αρμονικές της ταχύτητας περιστροφής μέχρι και την 6 – 7 αρμονική. Τώρα, το ίδιο μοτίβο υπάρχει στην κατεύθυνση Ax και HR. Και πάλι εδώ δεν παρατηρούμε καμιά συχνότητα ελαττωμάτων ρουλεμάν.

Οι προτάσεις για την περωτή No1 όσον αφορά τη μέτρηση στις 17/4/2023 είναι:

- Η εξέλιξη των τιμών ύστερα από 5 μήνες είναι σταθερή.
- Περιοδικός έλεγχος των ακτινικών διακένων του ρουλεμάν της σταθερής έδρας κάθε 5 μήνες μαζί με επανέλεγχο ταλαντώσεων.
- Οπτικός έλεγχος στο ρουλεμάν για αξιολόγηση της ήδη υπάρχουσας ζημίας μιας και δεν υπάρχει αρχείο μετρήσεων στο συγκεκριμένο εξοπλισμό.

Από τον έλεγχο των παραπάνω σημείων προέκυψε ότι:

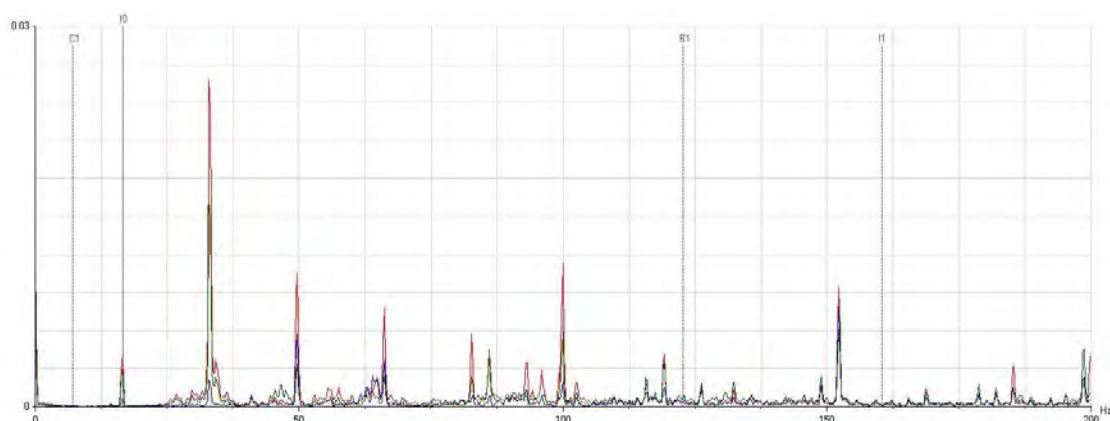
- Τα ακτινικά διάκενα ήταν ίδια με την προηγούμενη φορά.
- Η εικόνα του ρουλεμάν ήταν ικανοποιητική (χωρίς εμφανείς- με γυμνό μάτι- φθορές).

Η περωτή θα συνεχίσει να δουλεύει και η κατάστασή της κρίθηκε αποδεκτή. Η παρακολούθηση θα γίνεται κάθε τέσσερις μήνες.

Ανάλυση αποτελεσμάτων και προτάσεις για την περωτή No2

Μέτρηση 9/11/2022

Στην θέση MT – NDE, στις τρεις κατευθύνσεις Ax HR και VR, παρατηρήθηκαν αυξημένες τιμές επιτάχυνσης. Σε αυτήν την εργασία δεν κάναμε ανάλυση των ηλεκτρικών φαινομένων που μπορούν να εντοπιστούν με την μέθοδο της ανάλυσης των κραδασμών, γι' αυτό θα μείνουμε μόνο στην παρατήρηση ότι τα ρουλεμάν του μοτέρ δεν παρουσιάζουν κάποιο πρόβλημα. Στην εικόνα 4.3-35 παρατηρούμε τα διαγράμματα για τις τρεις κατευθύνσεις δόνησης.



Εικόνα 4.3-35: Διαγράμματα για τις τρεις κατευθύνσεις δόνησης στη θέση MT – NDE

Το κόκκινο χρώμα αναφέρεται στην διεύθυνση Ax, το μπλε στην διεύθυνση HR και το πράσινο στην διεύθυνση VR. Όσον αφορά την περωτή οι μετρήσεις δεν έχουν δείξει κάτι το ανησυχητικό και η κατάσταση θεωρείται αποδεκτή.





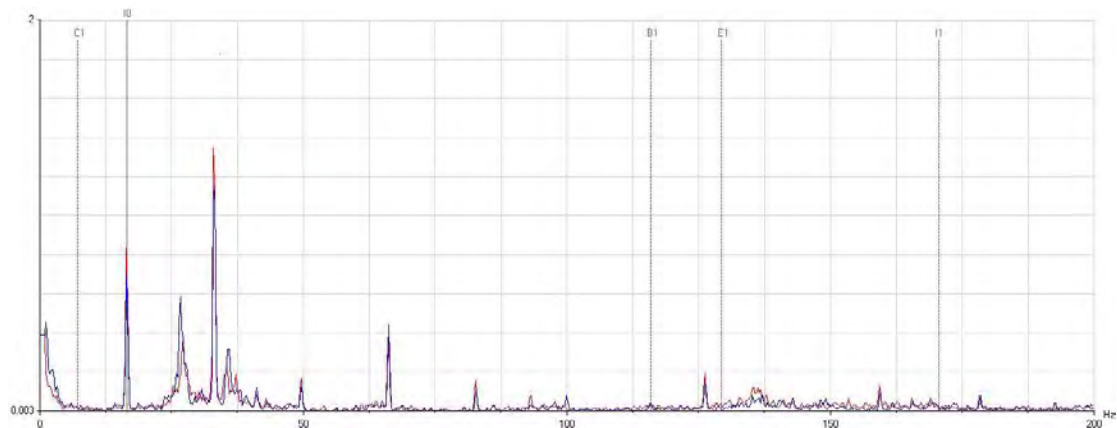
Οι προτάσεις για την περωτή No2 όσον αφορά τη μέτρηση στις 9/11/2022 είναι:

- Αν και δεν αποτελεί άμεση απειλή για τη σωστή λειτουργία του εξοπλισμού προτείνεται να πραγματοποιηθεί δοκιμή ηλεκτρικού κινητήρα για πιθανή βλάβη ηλεκτρικής προέλευσης και πιο συγκεκριμένα στον ρότορα του μοτέρ.
- Επανάλεγο ύστερα από χρονικό διάστημα λειτουργίας τεσσάρων μηνών

Λόγω της μικρής κρισιμότητας των ευρημάτων δεν έγινε κάποια κίνηση στην περωτή No2 και επιλέχθηκε μόνο η επανάληψη των μετρήσεων σε χρονικό ορίζοντα τεσσάρων μηνών.

Μέτρηση 17/4/2023

Στην επανάληψη των μετρήσεων παρατηρούμε αυξημένη επιτάχυνση ταλάντωσης σε και στις δυο θέσεις μέτρησης στο μοτέρ και μάλιστα σε όλες τις κατευθύνσεις. Τα ρουλεμάν και πάλι δεν εμφανίζουν κάποιο σημάδι φθοράς μιας και δεν εμφανίζεται καμιά από τις συχνότητες ελαττώματός τους. Και πάλι για την περωτή δεν έχουμε κάποια παρατήρηση καθώς όλα φαίνονται φυσιολογικά χωρίς κάτι να ανησυχεί. Μάλιστα, οι τιμές δεν έχουν αυξηθεί σχεδόν καθόλου. Ενδεικτικά στην εικόνα 4.3-36 φαίνεται η σύγκριση των τιμών για το σημείο FN – DE στην κατεύθυνση Ax για τις δυο μετρήσεις.



Εικόνα 4.3-36: Σύγκριση τιμών των δύο μετρήσεων στη θέση FN – DE και στην κατεύθυνση Ax
Με κόκκινο χρώμα είναι η μέτρηση 9/11/2023 και με μπλε η μέτρηση 17/04/2023.

Οι προτάσεις για την περωτή No2 όσον αφορά τη μέτρηση στις 17/4/2023 είναι:

- Το ηλεκτρικό φαινόμενο παραμένει και μάλιστα μεταφέρθηκε και στο επόμενο σημείο μέτρησης επομένως προτείνεται αντικατάσταση του μοτέρ το ακόλουθο χρονικό διάστημα χωρίς όμως να αποτελεί πρώτη προτεραιότητα η αλλαγή του.

Η αλλαγή του μοτέρ προγραμματίστηκε στο επόμενο δίμηνο και πραγματοποιήθηκε στις 10/6/2023.

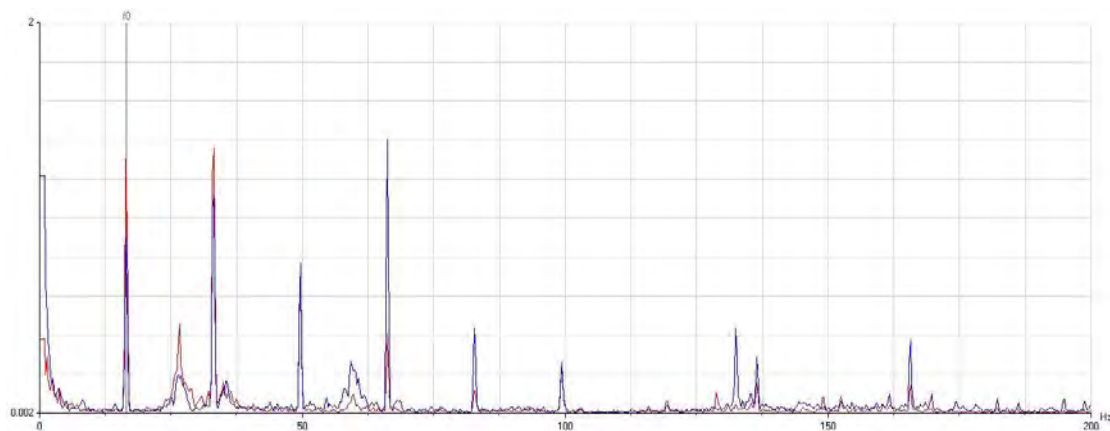




Ανάλυση αποτελεσμάτων και προτάσεις για την πετρωτή Νο3

Μέτρηση 9/11/2022

Και στις δυο θέσεις μέτρησης στην πετρωτή (FN – DE και FN – NDE) παρατηρήθηκαν αυξημένες τιμές ταχύτητας μόνο στην κατεύθυνση HR. Στο διάγραμμα παρατηρούμε την εμφάνιση αρμονικών στην ταχύτητα περιστροφής έως και την έκτη αρμονική, το οποίο είναι ένα μοτίβο χαλαρότητας. Ακόμα, για τη θέση FN – DE παρατηρούμε πιθανά ελαττώματα στο ρουλεμάν διότι εμφανίζονται κάποιες από τις συχνότητες ελαττωμάτων των ρουλεμάν, όμως, η φθορά είναι ακόμα σε πολύ αρχικό στάδιο. Για τη θέση FN – NDE δεν παρατηρούμε κάποιο ελάττωμα στα ρουλεμάν. Στην εικόνα 4.3-37 βλέπουμε την σύγκριση των διαγραμμάτων στις θέσεις FN – DE και FN – NDE στην κατεύθυνση HR.



Εικόνα 4.3-37: Σύγκριση τιμών για θέσεις FN – DE και FN – NDE στην κατεύθυνση HR

Με κόκκινο χρώμα στο διάγραμμα είναι η μέτρηση στην θέση FN – DE και με μπλε η μέτρηση στην θέση FN – NDE

Επιπλέον, στο διάγραμμα παρατηρούμε την εμφάνιση των αρμονικών 1,5 x στροφές περιστροφής και 3,5 x στροφές περιστροφής που μας οδηγεί σε μια υποπερίπτωση χαλαρότητας που ονομάζεται «χαλαρότητα εσωτερικά του εξοπλισμού».

Οι προτάσεις για την πετρωτή Νο3 σχετικά την μέτρηση στις 9/11/2022 είναι:

- Έλεγχος για πιθανές χαλαρότητες. Πιο συγκεκριμένα πρέπει να ελεγχθούν πιθανά διάκενα μεταξύ του άξονα και του ρουλεμάν και στις δυο έδρες.
- Έλεγχο στην λίπανση του ρουλεμάν.
- Επανεέλεγχο ύστερα από χρονικό διάστημα λειτουργίας τεσσάρων μηνών.

Από τον έλεγχο των παραπάνω σημείων προέκυψε ότι:

- Όλοι οι κοχλίες σύνδεσης των κουζινέτων ήταν επαρκώς σφιγμένοι.
- Δεν μπόρεσε να εξακριβωθεί αν υπάρχει διάκενο ανάμεσα στον άξονα και στα ρουλεμάν.
- Η στάθμη του του λαδιού στο κουζινέτο ελέγχθηκε και αλλάχθηκε το λάδι λίπανσης.



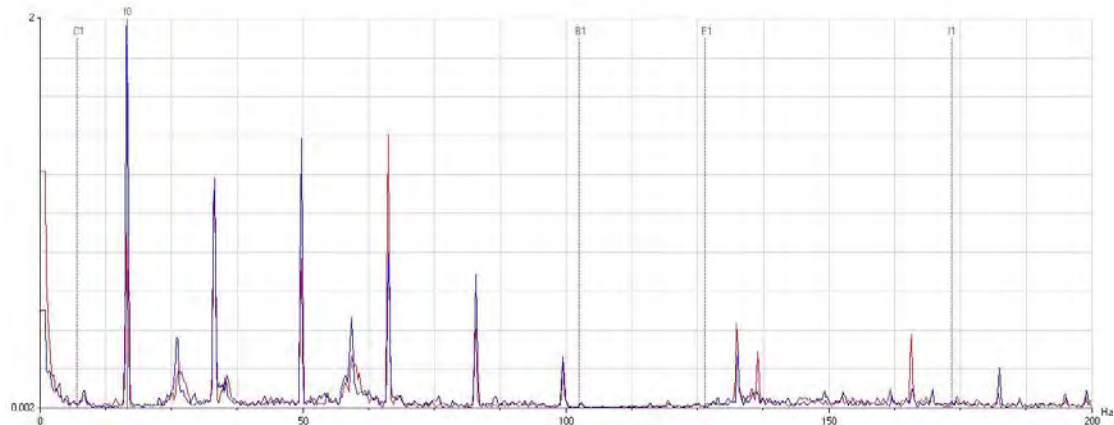


Σε συνέχεια των ευρημάτων που περιεγράφηκαν παραπάνω, η κατάσταση της περωτής κρίθηκε αποδεκτή. Η περωτή θα συνεχίσει να λειτουργεί χωρίς καμιά παρέμβαση και θα συνεχίσουμε την παρακολούθησή της για να δούμε πως εξελίσσεται το φαινόμενο.

Λόγω της μικρής κρισιμότητας των ευρημάτων δεν έγινε κάποια κίνηση στην περωτή Νο3 και επιλέχθηκε μόνο η επανάληψη των μετρήσεων σε χρονικό ορίζοντα τεσσάρων μηνών.

Μέτρηση 17/4/2023

Στην επανάληψη των μετρήσεων παρατηρούμε αυξημένη ταχύτητα ταλάντωσης στις θέσεις FN – DE και FN – NDE στις κατεύθυνσεις Ax και HR. Για την κατεύθυνση Ax και στις δυο θέσεις έχουμε την εμφάνιση αρμονικών στην ταχύτητα περιστροφής έως και την έκτη αρμονική το οποίο είναι ένα μοτίβο χαλαρότητας αυξημένο σε σύγκριση με την μέτρηση στις 9/11/2022. Για την κατεύθυνση HR παρατηρούμε το ίδιο μοτίβο με τις αρμονικές έως και την έκτη. Επιπλέον, στην κατεύθυνση HR έχουμε ξανά την εμφάνιση των αρμονικών 1,5 x στροφές περιστροφής και 3,5 x στροφές περιστροφής. Στη σύγκριση των διαγραμμάτων αυτής της μέτρησης με τη μέτρηση στις 9/11/2022 παρατηρούμε μια αύξηση των τιμών που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο της χαλαρότητας εσωτερικά του εξοπλισμού επεκτείνεται. Στην εικόνα 4.3-38 βλέπουμε τη σύγκριση των διαγραμμάτων για τη θέση FN – NDE στην κατεύθυνση HR για τις δυο μετρήσεις.

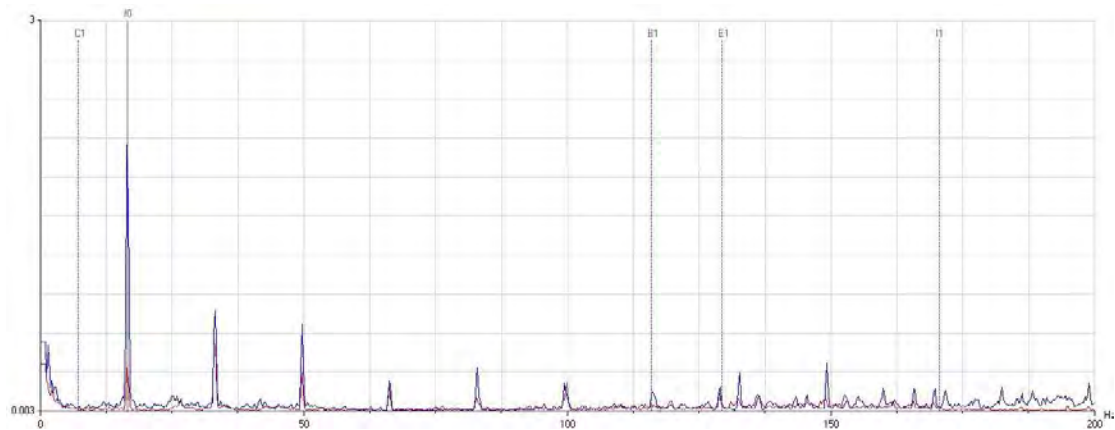


Εικόνα 4.3-38: Σύγκριση τιμών για θέσεις FN – NDE στην κατεύθυνση HR για τις 9/11/2022 και 17/4/2023

Με κόκκινο χρώμα στο διάγραμμα είναι η μέτρηση για τις 9/11/2022 και με μπλε για τις 17/4/2023.

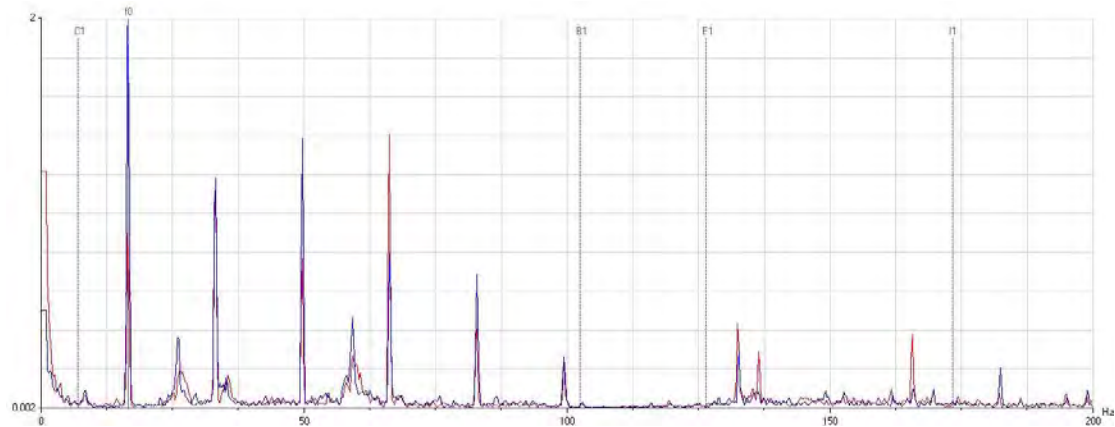
Οι συχνότητες ελαττωμάτων των ρουλεμάν δεν εμφανίζουν κάποια ιδιαίτερη αύξηση και στα δυο σημεία μέτρησης FN – DE και FN – NDE συγκρίνοντας τις δυο μετρήσεις. Στις εικόνες 4.3-39 και 4.3-40 βλέπουμε τη σύγκριση των συχνοτήτων ελαττωμάτων των ρουλεμάν για τα δυο σημεία μέτρησης στις δυο μετρήσεις που διεξήχθησαν στην κατεύθυνση Ax.





Εικόνα 4.3-39: Σύγκριση τιμών για θέσεις FN – DE στην κατεύθυνση Ax για τις 9/11/2022 και 17/4/2023

Με κόκκινο χρώμα στο διάγραμμα είναι η μέτρηση για τις 9/11/2022 και με μπλε για τις 17/4/2023.



Εικόνα 4.3-40: Σύγκριση τιμών για θέσεις FN – NDE στην κατεύθυνση Ax για τις 9/11/2022 και 17/4/2023

Με κόκκινο χρώμα στο διάγραμμα είναι η μέτρηση για τις 9/11/2022 και με μπλε για τις 17/4/2023.

Οι προτάσεις για την περωτή No3 όσον αφορά τη μέτρηση στις 17/4/2023 είναι:

- Έλεγχος για πιθανές χαλαρότητες. Πιο συγκεκριμένα πρέπει να ελεγχθούν πιθανά διάκενα μεταξύ του άξονα και του ρουλεμάν στην πλωτή έδρα της περωτής.
- Επανεέλεγχος ύστερα από χρονικό διάστημα λειτουργίας πέντε μηνών.

Από τον έλεγχο των παραπάνω σημείων προέκυψε ότι:

- Όλοι οι κοχλίες σύνδεσης των κουζινέτων ήταν επαρκώς σφιγμένοι.
- Δεν μπόρεσε να εξακριβωθεί αν υπάρχει διάκενο ανάμεσα στον άξονα και στα ρουλεμάν.





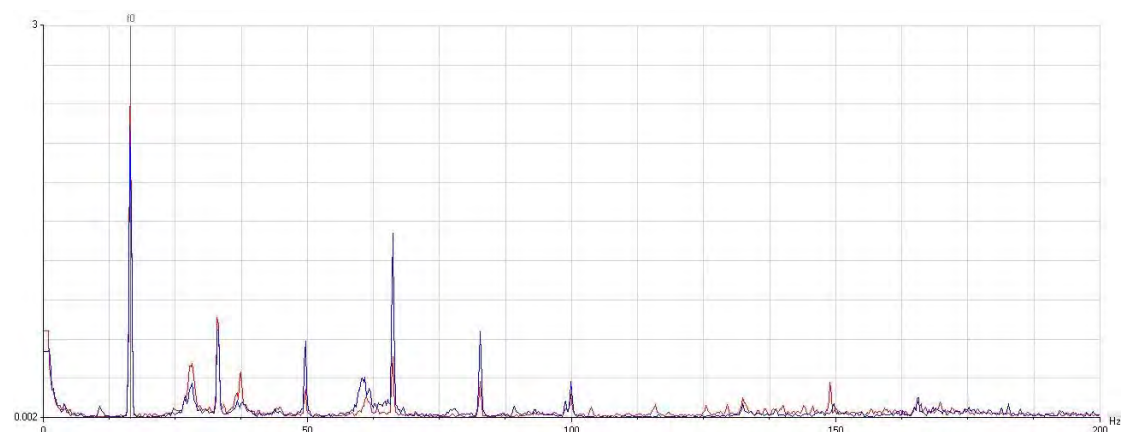
Σε συνέχεια των ευρημάτων που περιεγράφηκαν παραπάνω η κατάσταση της περωτής κρίθηκε αποδεκτή. Η περωτή θα συνεχίσει να λειτουργεί χωρίς καμιά παρέμβαση και θα συνεχίσουμε την παρακολούθησή της για να δούμε πως εξελίσσεται το φαινόμενο.

Στις 20/7/2023 και πριν την προκαθορισμένη παρακολούθηση της περωτής έγινε μία παύση της παραγωγικής διαδικασίας. Επιλέχθηκε να ανοιχθεί το κουζινέτο της πλωτής έδρας για καλύτερο έλεγχο. Έγινε εξαγωγή του ρουλεμάν και του κώνου συγκράτησης και μετρήθηκε ο άξονας της περωτής. Σύμφωνα με το σχέδιο ο άξονας της περωτής έχει διάμετρο 125 mm με ανοχή h9, άρα οι διαστάσεις του άξονα πρέπει να είναι 125 mm – 124,9mm. Οι πραγματικές διαστάσεις ήταν 124,6 mm στο σημείο επαφής με τον κώνο. Επομένως, η αιτία της ταλάντωσης που παρατηρούμε στα διαγράμματα ήταν αυτή η εσωτερική χαλαρότητα μεταξύ του ρουλεμάν της πλωτής έδρας και του άξονα της περωτής. Επιλέχθηκε να δουλέψει η περωτή και να αλλαχθεί με την εφεδρική της στην ετήσια συντήρηση τον 8/2023.

Ανάλυση αποτελεσμάτων και προτάσεις για την περωτή Νο4

Μέτρηση 9/11/2022

Στις μετρήσεις παρατηρούμε αυξημένη ταχύτητα ταλάντωσης στις θέσεις FN – DE και FN – NDE στις κατευθύνσεις Ax και HR. Για την κατεύθυνση Ax και στις δυο θέσεις, έχουμε την εμφάνιση αρμονικών στην ταχύτητα περιστροφής έως και την έκτη αρμονική το οποίο είναι ένα μοτίβο χαλαρότητας. Για την κατεύθυνση HR παρατηρούμε το ίδιο μοτίβο με τις αρμονικές έως και την έκτη. Επιπρόσθετα, στην κατεύθυνση HR έχουμε την εμφάνιση των αρμονικών 1,5 x στροφές περιστροφής, 2,5 x στροφές περιστροφής και 3,5 x στροφές περιστροφής. Στην σύγκριση των μετρήσεων κατά την κατεύθυνση HR για τα δυο σημεία μέτρησης βλέπουμε ότι η 1,5 x στροφές περιστροφής, 2,5 x στροφές περιστροφής αρμονική έχει μεγαλύτερο πλάτος στην θέση FN – DE και η 3,5 x στροφές περιστροφής αρμονική έχει μεγαλύτερο πλάτος στην θέση FN – NDE. Αυτή η σύγκριση φαίνεται στην εικόνα 4.3-41.



Εικόνα 4.3-41: Σύγκριση τιμών για θέσεις FN – DE και FN – NDE στην κατεύθυνση HR

Με κόκκινο χρώμα στο διάγραμμα είναι η μέτρηση για τη θέση FN – DE και με μπλε η μέτρηση για την θέση FN – NDE.





Οι συχνότητες ελαττωμάτων των ρουλεμάν εμφανίζονται μόνο στην θέση FN – DE αλλά έχουν μικρό πλάτος και η φθορά είναι ακόμα σε αρχικό στάδιο.

Οι προτάσεις για την περωτή Νο4 σχετικά με την μέτρηση στις 9/11/2022 είναι:

- Έλεγχος για πιθανές χαλαρότητες. Πιο συγκεκριμένα, πρέπει να ελεγχθούν πιθανά διάκενα μεταξύ του άξονα και του ρουλεμάν και στις δυο έδρες.
- Έλεγχος για πιθανές αξονικές χαλαρότητες (πρόβλημα στους αποστάτες ακινητοποίησης της σταθερής έδρας, πρόβλημα στο κωνικό χιτώνιο)
- Έλεγχος στη λίπανση του ρουλεμάν.
- Επανεέλεγχος ύστερα από χρονικό διάστημα λειτουργίας τεσσάρων μηνών.

Από τον έλεγχο των παραπάνω σημείων προέκυψε ότι:

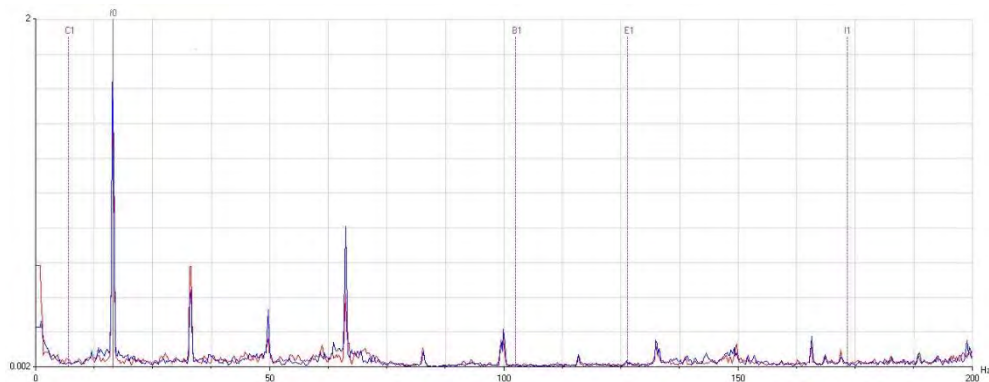
- Όλοι οι κοχλίες σύνδεσης των κουζινέτων ήταν επαρκώς σφιγμένοι.
- Δεν μπόρεσε να εξακριβωθεί αν υπάρχει διάκενο ανάμεσα στον άξονα και στα ρουλεμάν.
- Οι αποστάτες σταθεροποίησης ήταν ακριβώς στις διαστάσεις που αναφέρει ο κατασκευαστής.
- Το κωνικό χιτώνιο πάνω στο οποίο αρμόζει το ρουλεμάν ήταν στην θέση του χωρίς σημάδια φθοράς και μετακίνησης.
- Η στάθμη του λαδιού στο κουζινέτο ελέγχθηκε και αλλάχθηκε το λάδι λίπανσης.
- Σύμφωνα με τον κατασκευαστή του ρουλεμάν το ακτινικό διάκενο του ρουλεμάν 23232 KW33-C3 με κωνική εσωτερική τρύπα και για άξονα 140 πρέπει να είναι 0,16 – 0,20 mm. Στη μέτρηση που έγινε το διάκενο βρέθηκε 0,20mm.

Σε συνέχεια των ευρημάτων που περιγράφηκαν παραπάνω η κατάστασή της περωτής κρίθηκε αποδεκτή. Η περωτή θα συνεχίσει να λειτουργεί χωρίς καμιά παρέμβαση και θα συνεχίσουμε την παρακολούθησή της για να δούμε πως εξελίσσεται το φαινόμενο.

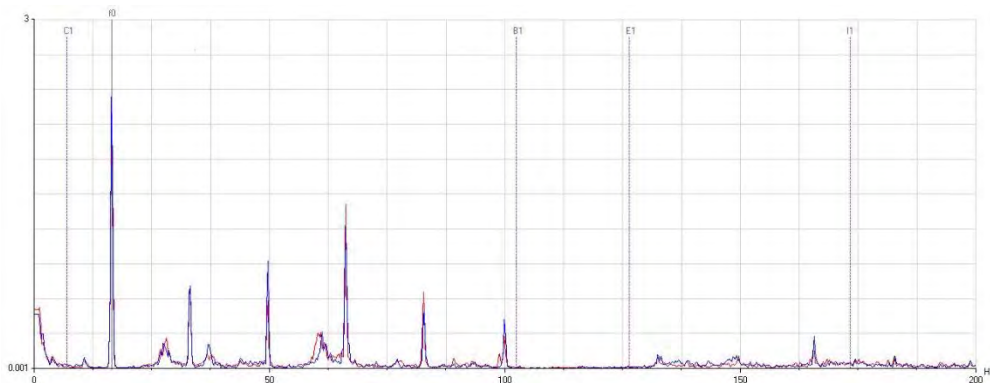
Μέτρηση 17/4/2023

Στην επανάληψη των μετρήσεων δεν παρατηρήθηκε αλλαγή στην κατάσταση του εξοπλισμού. Έχουμε και πάλι την εμφάνιση ταχύτητας ταλάντωσης στις θέσεις FN – DE και FN – NDE στις κατευθύνσεις Ax και HR. Για την κατεύθυνση Ax και στις δυο θέσεις έχουμε την εμφάνιση αρμονικών στην ταχύτητα περιστροφής έως και την έκτη αρμονική, το οποίο είναι ένα μοτίβο χαλαρότητας. Για την κατεύθυνση HR παρατηρούμε το ίδιο μοτίβο με τις αρμονικές έως και την έκτη. Επιπλέον στην κατεύθυνση HR έχουμε την εμφάνιση των αρμονικών 1,5 x στροφές περιστροφής, 2,5 x στροφές περιστροφής και 3,5 x στροφές περιστροφής. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα με αυτά στις 9/11/2022, όπως αναφέρθηκε, δεν βλέπουμε κάποια διαφορά. Στην εικόνα 4.3-42 και 4.3-43 βλέπουμε στην σύγκριση των διαγραμμάτων στην θέση μέτρηση FN – NDE, που έχει τις μεγαλύτερες τιμές, για τις δυο ημερομηνίες μέτρησης στις κατευθύνσεις Ax και HR.





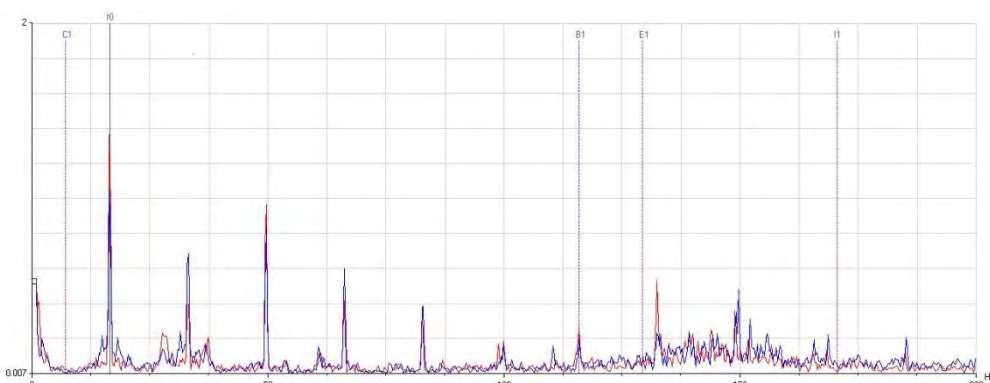
Εικόνα 4.3-42: Σύγκριση τιμών για θέσεις FN – NDE στην κατεύθυνση Ax για 9/11/2022 και 17/4/2023



Εικόνα 4.3-43: Σύγκριση τιμών για θέσεις FN – NDE στην κατεύθυνση HR για 9/11/2022 και 17/4/2023

Με κόκκινο χρώμα στο διάγραμμα είναι η μέτρηση στις 9/11/2022 και με μπλε η μέτρηση στις 17/4/2023.

Αν και πάλι οι συχνότητες ελαττωμάτων των ρουλεμάν εμφανίζονται στην θέση FN – DE έχουν μικρό πλάτος και σε σύγκριση των τιμών 17/4/2023 με αυτές στις 9/11/2022 δεν βλέπουμε καμία διαφορά. Επομένως, θεωρούμε το ελάττωμα παραμένει σταθερό. Στην εικόνα 4.3-44 βλέπουμε τη σύγκριση των τιμών στην θέση FN – DE για 9/11/2022 και 17/4/2023, ώστε να συγκρίνουμε τα πλάτη στις συχνότητες ελαττωμάτων του ρουλεμάν.



Εικόνα 4.3-44: Σύγκριση τιμών για θέσεις FN – DE στην κατεύθυνση Ax για 9/11/2022 και 17/4/2023





Οι προτάσεις για την περωτή Νο4 όσον αφορά τη μέτρηση στις 17/4/2023 είναι:

- Επανέλεγχος υστέρα από χρονικό διάστημα λειτουργίας τεσσάρων μηνών.

Η κατάσταση στην περωτή θεωρήθηκε σταθερή, άρα και αποδεκτή, μιας και οι δυο μετρήσεις είναι παρόμοιες. Επιλέχθηκε να μην γίνει καμία κίνηση πέραν μελλοντικής μέτρησης στον προτεινόμενο χρόνο.





5 Επίλογος

Η συντήρηση αποτελεί πλέον βασικό επιχειρηματικό στοιχείο για τη βελτίωση της ανταγωνιστικότητας και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των βιομηχανιών. Η αναδρομή στις εξελίξεις των μεθόδων συντήρησης έδειξε, πέρα από τα θετικά και αρνητικά σημεία τους τη μεγάλη πρόοδο που έχει υπάρξει σε αυτό τον τομέα. Οι υπεύθυνοι διαχείρισης των εταιριών έχουν κατανοήσει τη σπουδαιότητα του θέματος και δίνουν συνεχώς περισσότερο βάρος στη συντήρηση που αντιπροσωπεύει για τα μηχανήματα ό,τι η ιατρική για τον άνθρωπο. Θα μπορούσε κάποιος να πει ότι η συντήρηση με την πάροδο των χρόνων έχει εξελιχθεί από μια τεχνική σε επιστήμη.

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με την προβλεπτική συντήρηση και αφού αναφέραμε επιγραμματικά τις μεθόδους που περιλαμβάνει εμβαθήναμε στην παρακολούθηση κραδασμών. Στην παρουσίαση του θεωρητικού υπόβαθρου εμβαθήναμε σε όλα όσα πρέπει να γνωρίζει κάποιος για να αρχίσει να ασχολείται με την συγκεκριμένη μέθοδο συντήρησης. Πρέπει όμως να γίνει κατανοητό ότι ο μελετητής οφείλει να έχει επαρκή γνώση από στοιχεία μηχανών όπως γρανάζια, ρουλεμάν, ιμαντοκινήσεις κ.λπ. λεπτομέρειες των οποίων δεν αναφέρθηκαν σε αυτήν την εργασία.

Οι μετρήσεις με φορητό εξοπλισμό μετρήσεις κραδασμών που έγιναν σε βιομηχανικό περιβάλλον έδειξαν την αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης μεθόδου. Οι τέσσερις πτερωτές θερμών καυσαερίων που επιλέχθηκαν για την παρούσα εργασία αποτέλεσαν ένα επιτυχές παράδειγμα, λόγω της προσβασιμότητάς τους εν ώρα λειτουργίας αλλά και της ευκολίας τους στην αποσυναρμολόγησή τους, ώστε να γίνεται έλεγχος στα ευρήματα που είχαμε μέσω της ανάλυσης των κραδασμών.

Κλείνοντας, είναι αξιοσημείωτο ότι η μέθοδος ανάλυσης κραδασμών όπως διεξήχθη σε αυτήν την εργασία (με φορητό εξοπλισμό και χωρίς ιστορικό μετρήσεων) δεν αποτελεί πανάκεια στην συντήρηση περιστρεφόμενων εξοπλισμών. Ο συνδυασμός της με τις υπόλοιπες μεθόδους προβλεπτικής συντήρησης που αναφέρθηκαν όπως:

- Ανάλυση λαδιού
- Ανάλυση μικροσωματιδίων
- Θερμογραφία
- Παρακολούθηση απόδοσης

θα δώσει ακριβέστερα αποτελέσματα. Ακόμα, η εγκατάσταση Online συστήματος παρακολούθησης κραδασμών θα βοηθούσε στην απόκτηση ιστορικού μετρήσεων αλλά και στην παρατήρηση φαινομένων που δεν μπορούν να καταγραφούν με μια μέτρηση π.χ. στρέβλωση άξονα με την αύξηση της θερμοκρασίας.





Βιβλιογραφία

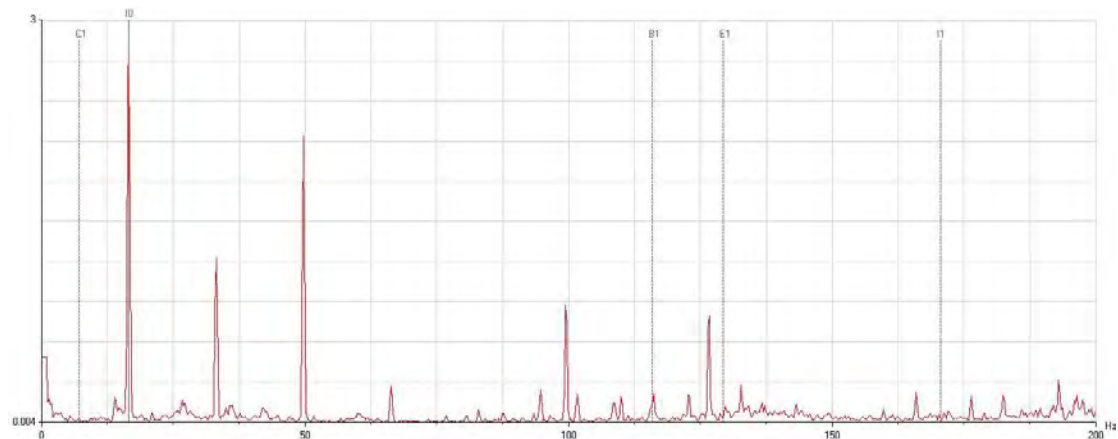
- Barron, R. (Ed.). (1996). *Engineering condition monitoring: practice, methods, and applications*. Longman Publishing Group
- Rao, B. (Ed.). (1996). *Handbook of condition monitoring*. Elsevier.
- Mohanty, A. R. (2014). *Machinery condition monitoring: Principles and practices*. CRC Press.
- Rao, J. S. (2000). *Vibratory condition monitoring of machines*. CRC press.
- Davies, A. (Ed.). (2012). *Handbook of condition monitoring: techniques and methodology*. Springer Science & Business Media.
- Trampe Broch, J. (1984). *Mechanical vibration and shock measurements*: Bruel & Kjaer.
- Angelo, M. (1987). *Vibration monitoring of Machines*: Bruel & Kjaer
- Wowk, V. (1991). *Machinery vibration: measurement and analysis*. McGraw-Hill Education.
- Setford, G. A. W. (1993). Bearings—Condition Monitoring, Condition Measurement and Condition Control. *Profitable Condition Monitoring*, 231-240.
- Κωστόπουλος, Θ. Ν. (2009). *Διάγνωση Βλαβών και Συντήρηση Περιστρεφόμενων Μηχανών*. Αθήνα, Εκδόσεις Συμμεών.
- McMillan, R. B. (2003). *Rotating machinery: practical solutions to unbalance and misalignment*. CRC Press.
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. Elsevier.
- Lacey, S. (2011). The role of vibration monitoring in predictive maintenance. *Asset Management & Maintenance Journal*, 24(1), 42-51.
- Berry, J. E. (1997). *Predictive Maintenance and Vibration Signature Analysis II*. Columbus, OH, IRD Mechanalysis, Inc.
- Acoem, www.acoem.com
- SKF, www.skf.com



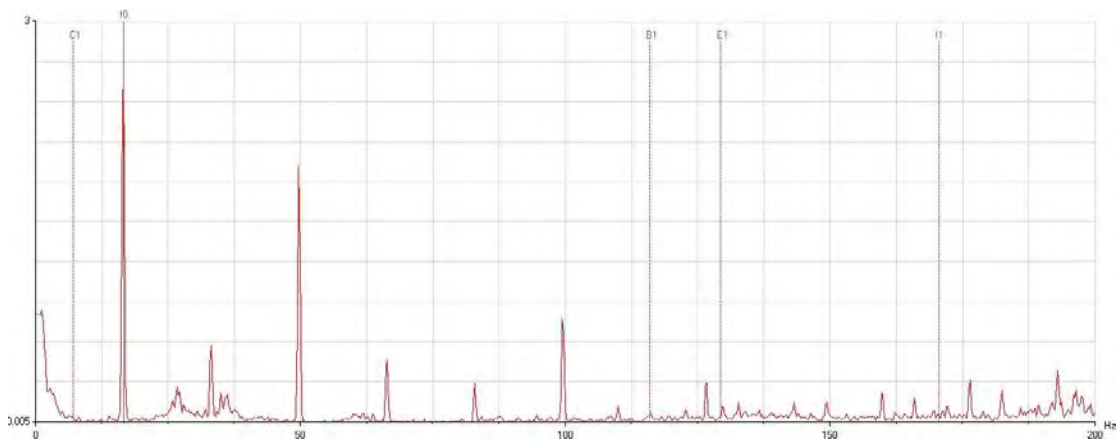


Παράρτημα

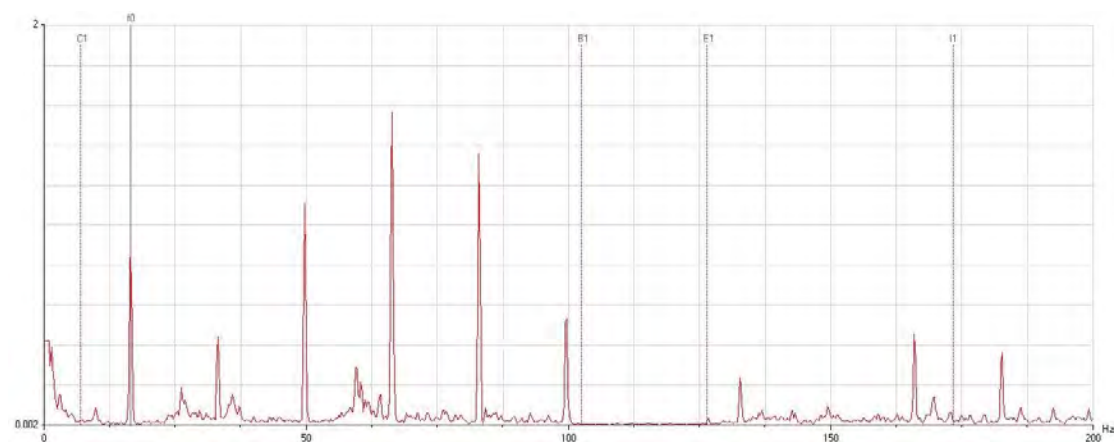
Στο παράρτημα παρουσιάζονται τα διαγράμματα ταχύτητας ταλάντωσης ως προς συχνότητα για τα κρίσιμα σημεία που χρήζουν ανάλυση και έχουν παρατεθεί στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων στο κεφάλαιο 4.3.2



Εικόνα Π1.1: Διάγραμμα για Νο1 περωτή σημείο μέτρησης FN – DE AX 9/11/2023

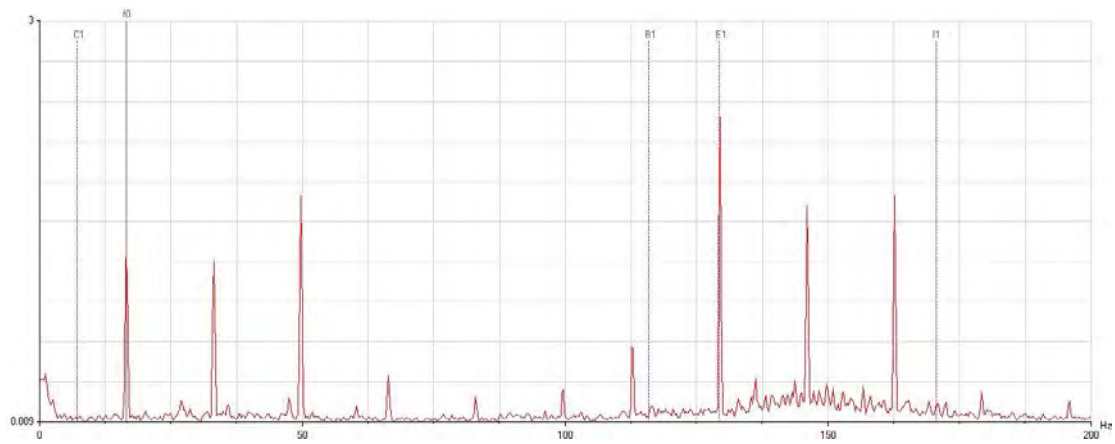


Εικόνα Π1.2: Διάγραμμα για Νο1 περωτή σημείο μέτρησης FN – DE HR 9/11/2023

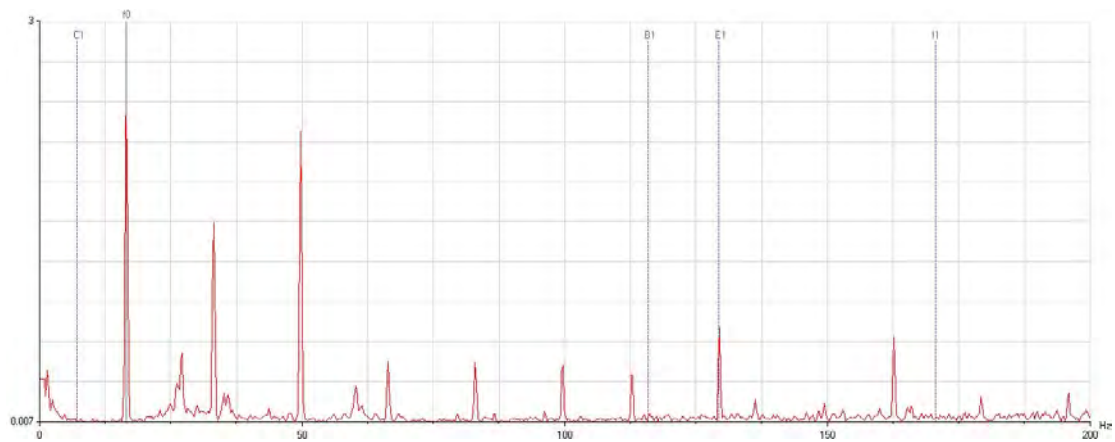


Εικόνα Π1.3: Διάγραμμα για Νο1 περωτή σημείο μέτρησης FN – NDE AX 9/11/2023

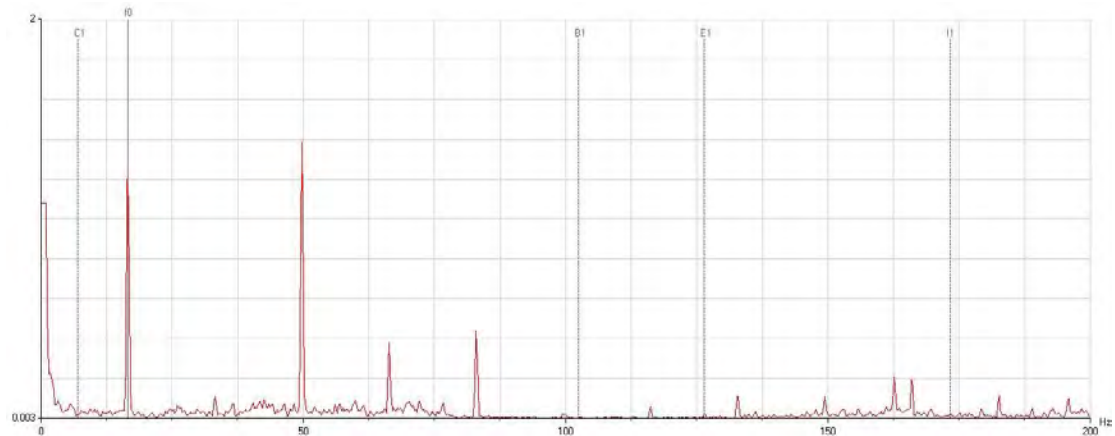




Εικόνα ΠΙ.4: Διάγραμμα για Νο1 περωτή σημείο μέτρησης FN – DE AX 17/04/2023

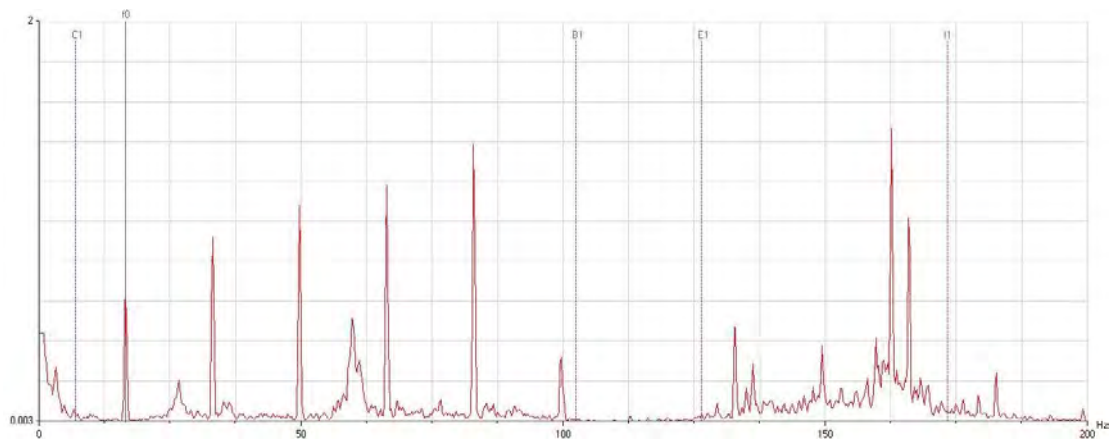


Εικόνα ΠΙ.5: Διάγραμμα για Νο1 περωτή σημείο μέτρησης FN – DE HR 17/04/2023

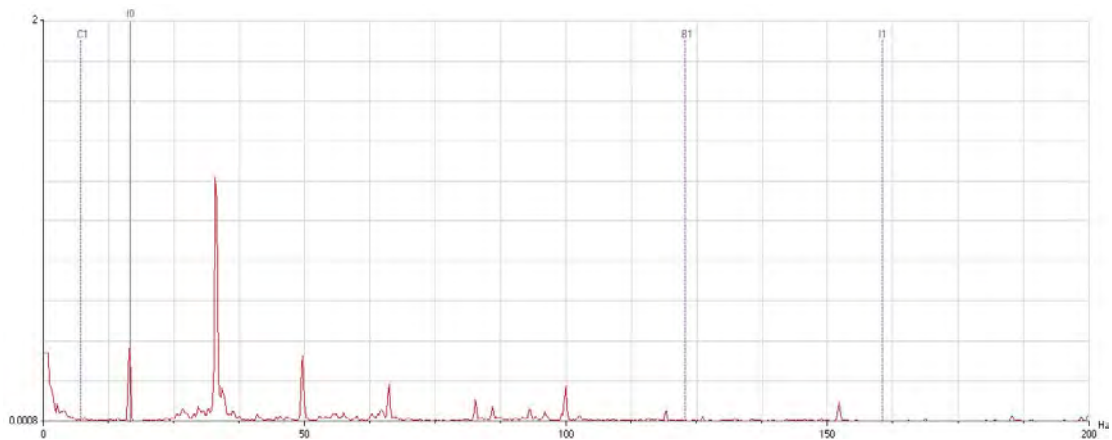


Εικόνα ΠΙ.6: Διάγραμμα για Νο1 περωτή σημείο μέτρησης FN – NDE AX 17/04/2023

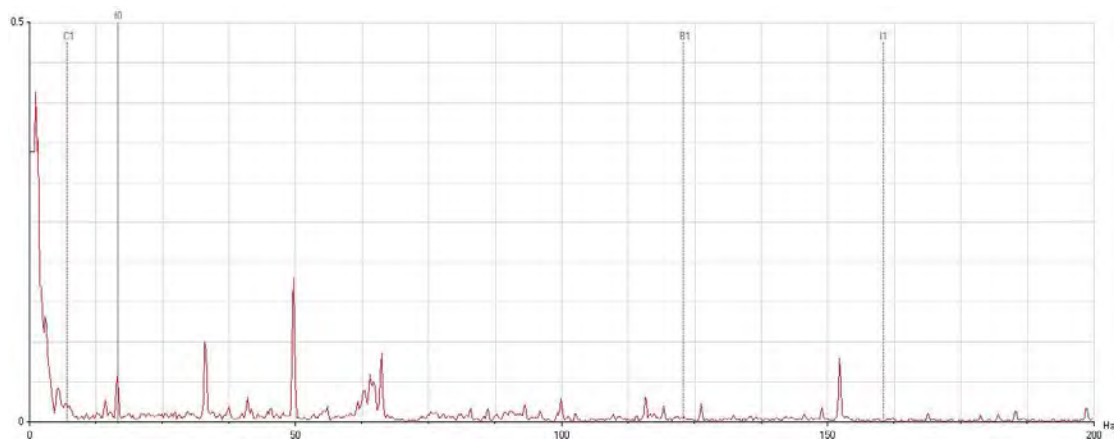




Εικόνα ΠΙ.7: Διάγραμμα για Νο1 περωτή σημείο μέτρησης FN – NDE HR 17/04/2023

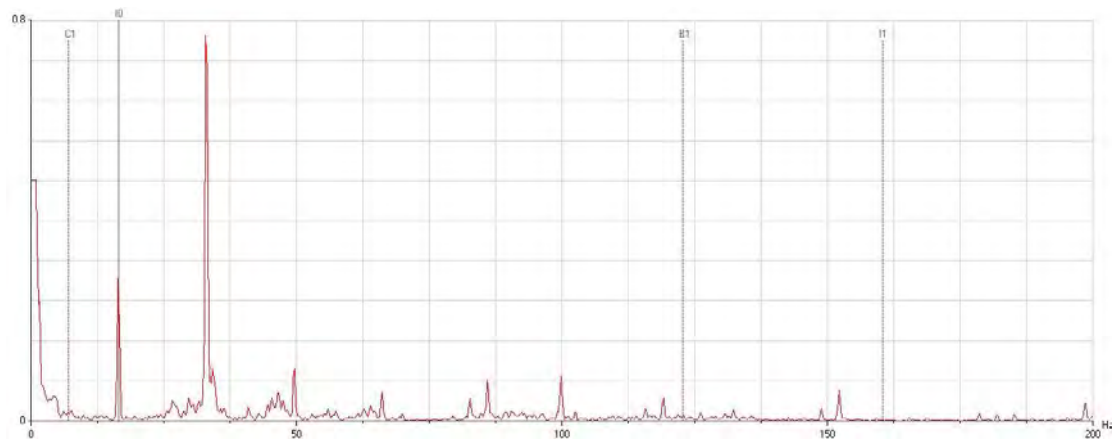


Εικόνα ΠΙ.8: Διάγραμμα για Νο2 περωτή σημείο μέτρησης MT – NDE AX 9/11/2022

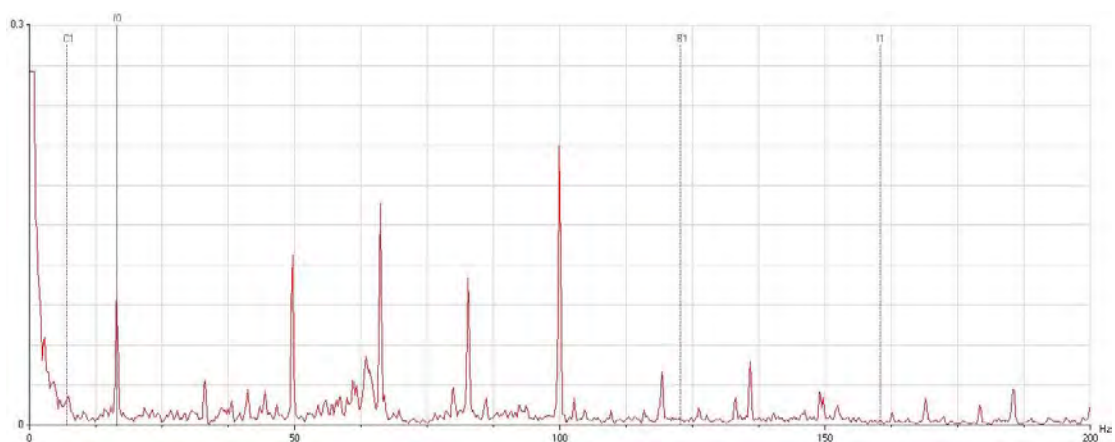


Εικόνα ΠΙ.9: Διάγραμμα για Νο2 περωτή σημείο μέτρησης MT – NDE HR 9/11/2022

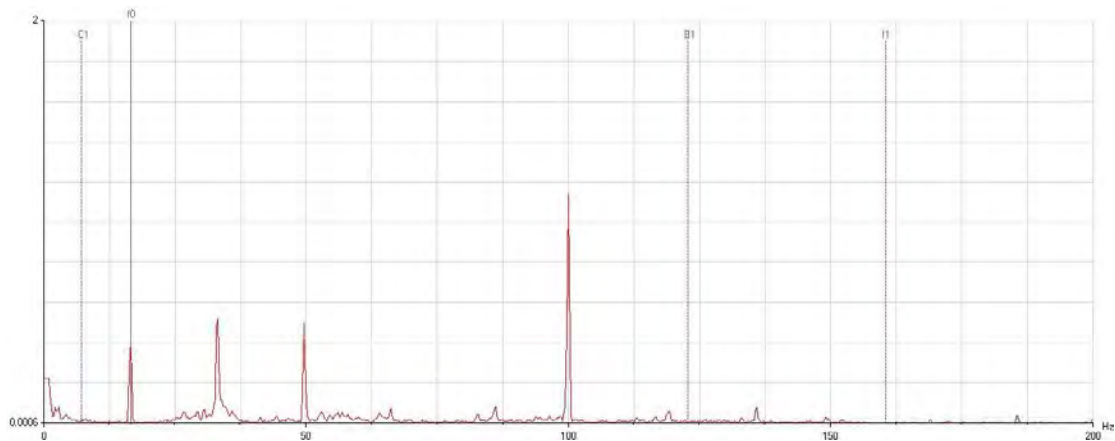




Εικόνα ΠΙ.10: Διάγραμμα για No2 περωτή σημείο μέτρησης MT – NDE VR 9/11/2022

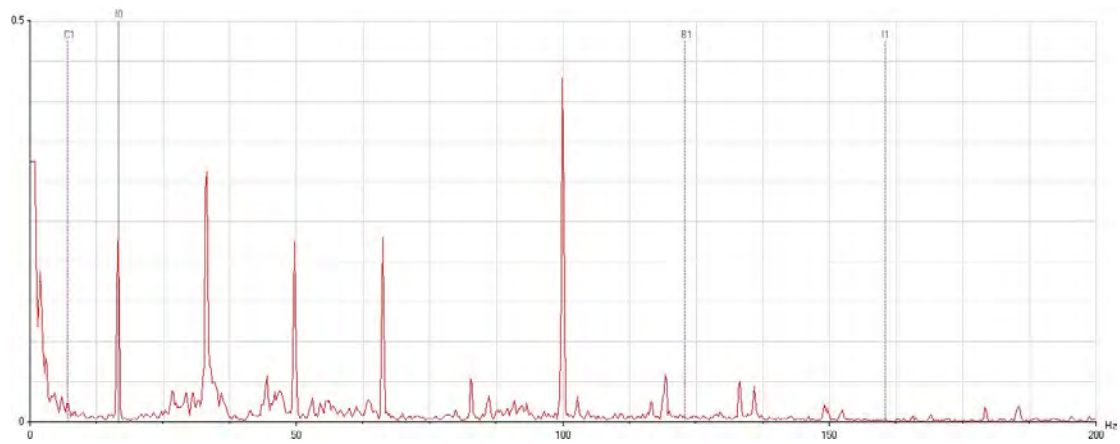


Εικόνα ΠΙ.11: Διάγραμμα για No2 περωτή σημείο μέτρησης MT – NDE AX 17/4/2023

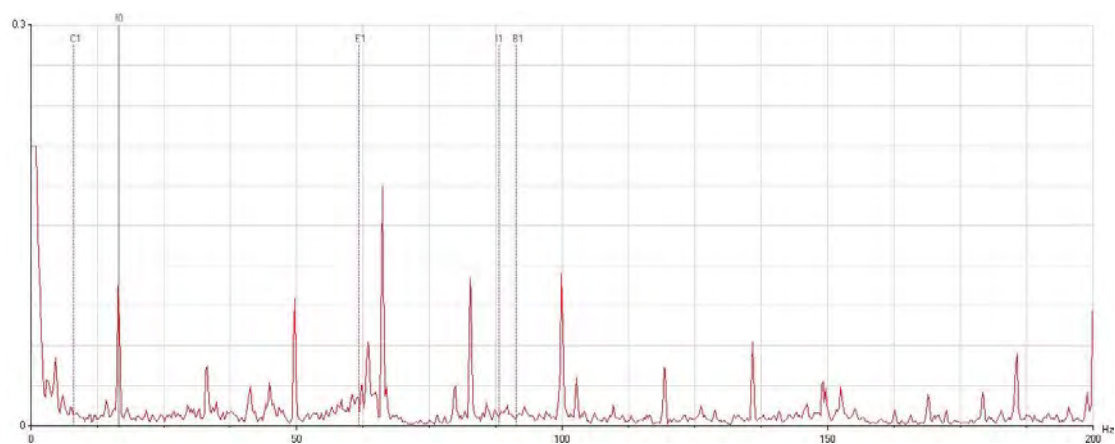


Εικόνα ΠΙ.12: Διάγραμμα για No2 περωτή σημείο μέτρησης MT – NDE HR 17/4/2023

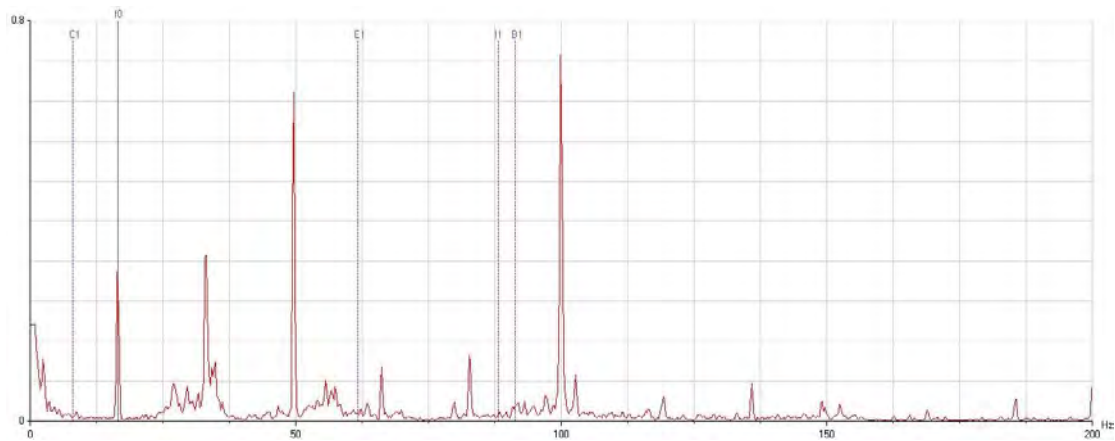




Εικόνα ΠΙ.13: Διάγραμμα για No2 περωτή σημείο μέτρησης MT – NDE VR 17/4/2023

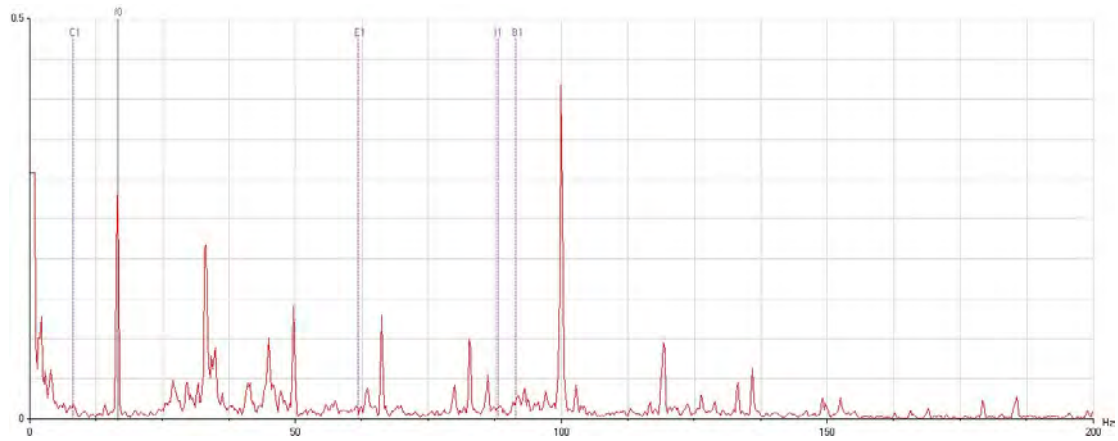


Εικόνα ΠΙ.14: Διάγραμμα για No2 περωτή σημείο μέτρησης MT – DE AX 17/4/2023

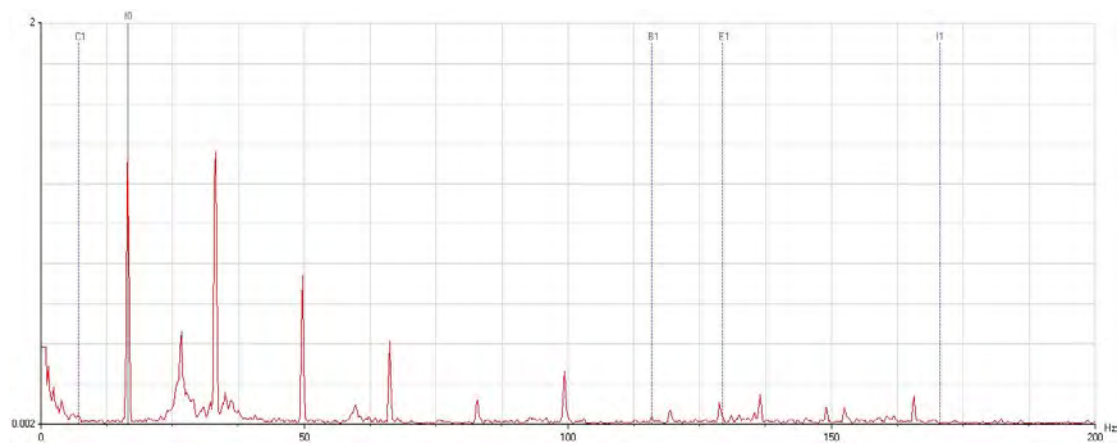


Εικόνα ΠΙ.15: Διάγραμμα για No2 περωτή σημείο μέτρησης MT – DE HR 17/4/2023

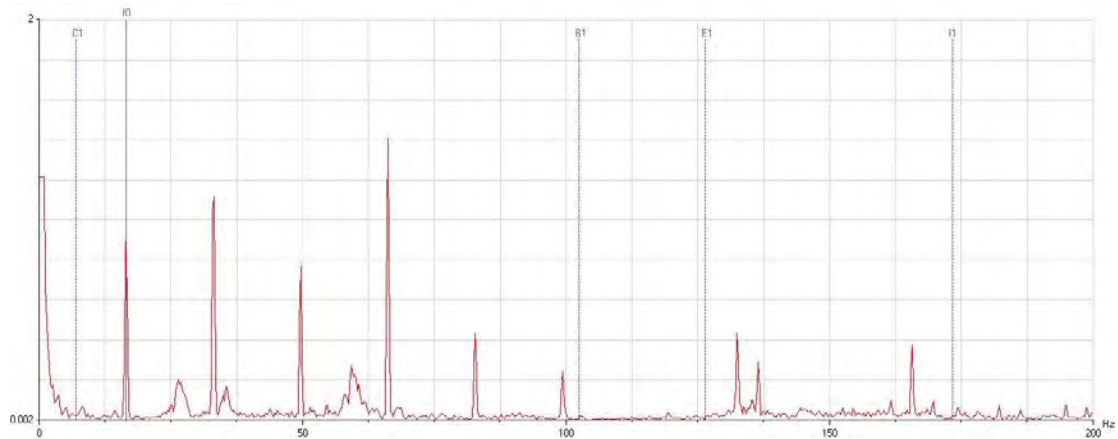




Εικόνα ΠΙ.16: Διάγραμμα για Νο2 περωτή σημείο μέτρησης MT – DE VR 17/4/2023

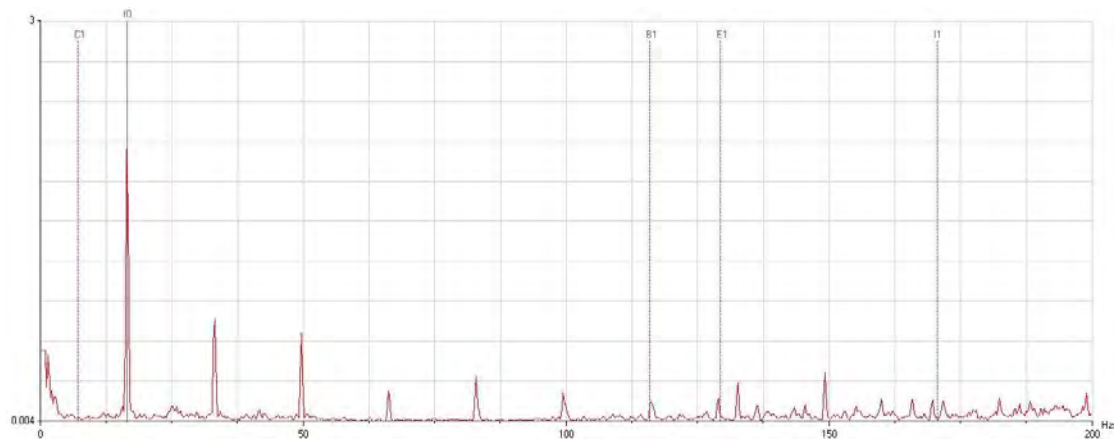


Εικόνα ΠΙ.17: Διάγραμμα για Νο3 περωτή σημείο μέτρησης FN – DE HR 9/11/2022

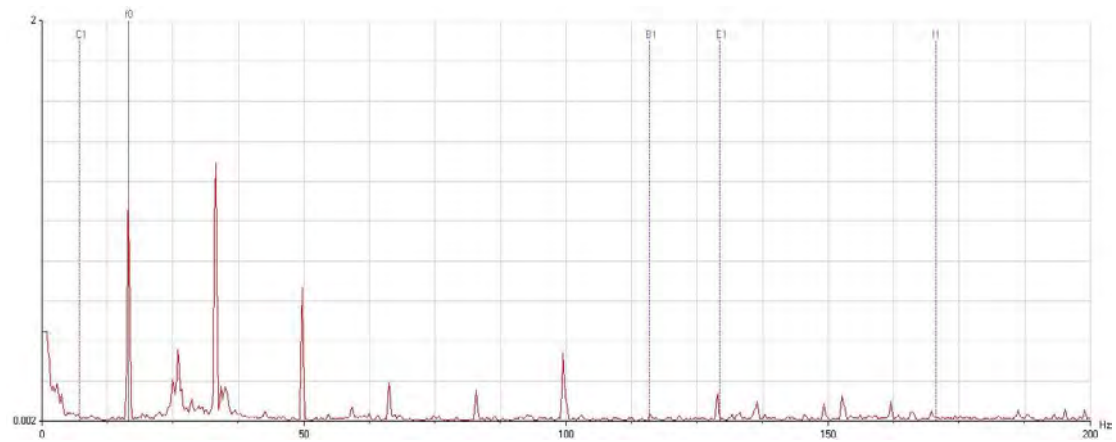


Εικόνα ΠΙ.18: Διάγραμμα για Νο3 περωτή σημείο μέτρησης FN – NDE HR 9/11/2022

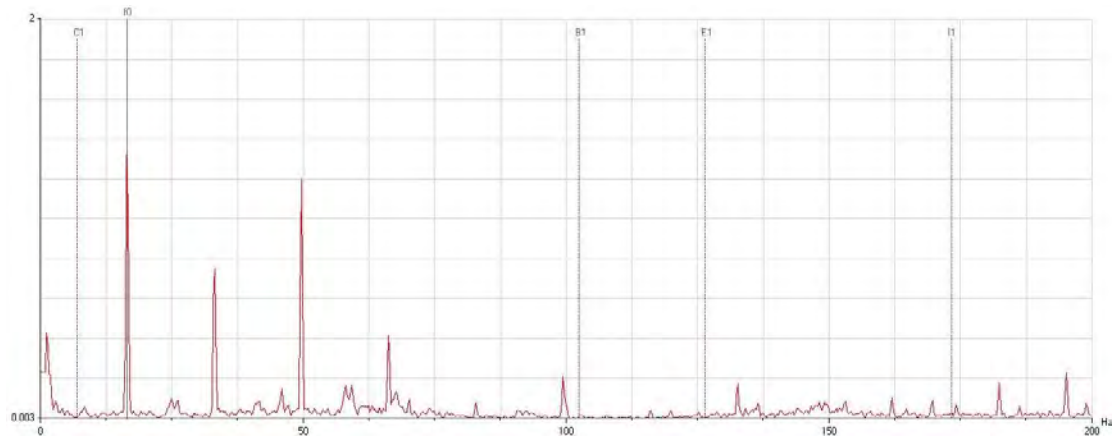




Εικόνα ΠΙ.19: Διάγραμμα για Νο3 περωτή σημείο μέτρησης FN – DE AX 17/4/2023

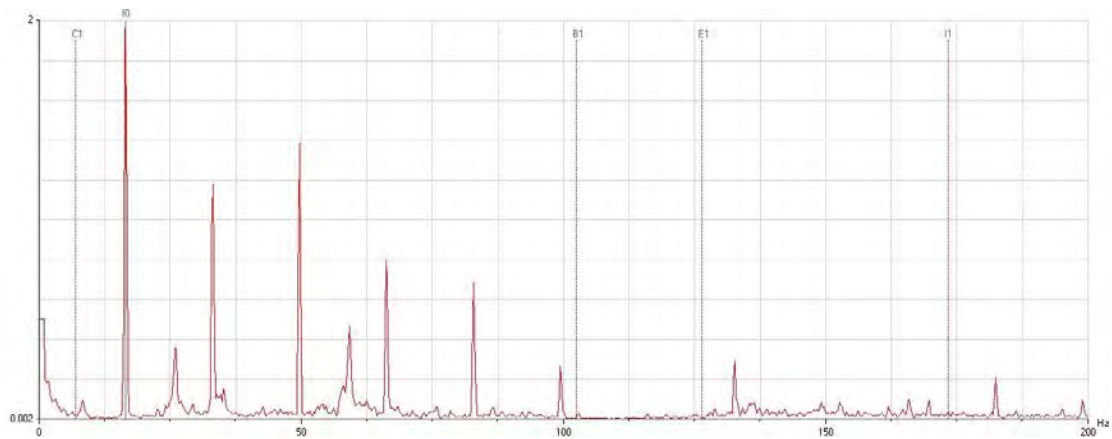


Εικόνα ΠΙ.20: Διάγραμμα για Νο3 περωτή σημείο μέτρησης FN – DE HR 17/4/2023

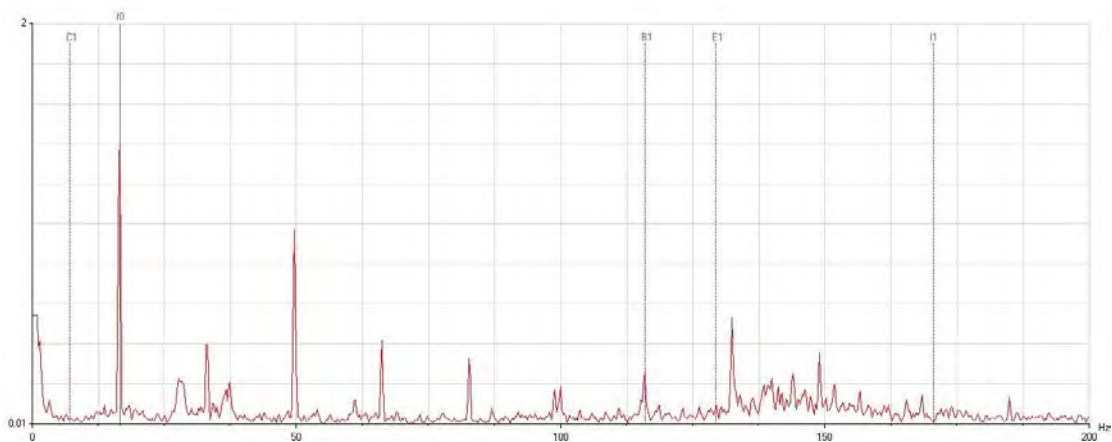


Εικόνα ΠΙ.21: Διάγραμμα για Νο3 περωτή σημείο μέτρησης FN – NDE AX 17/4/2023

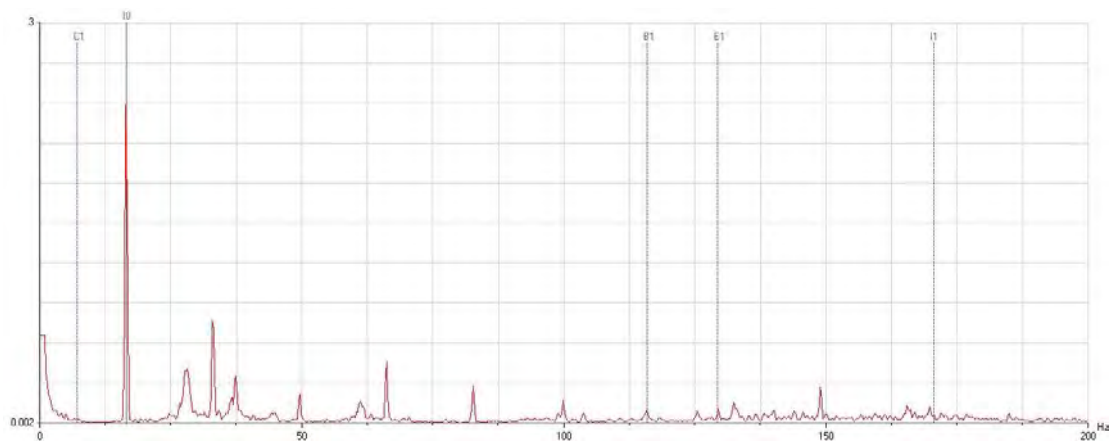




Εικόνα ΠΙ.22: Διάγραμμα για Νο3 περωτή σημείο μέτρησης FN – NDE HR 17/4/2023

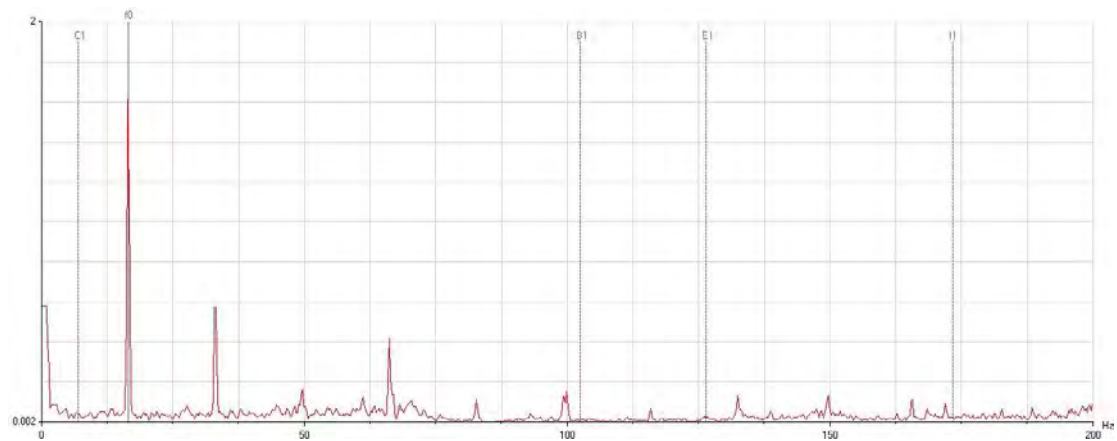


Εικόνα ΠΙ.23: Διάγραμμα για Νο4 περωτή σημείο μέτρησης FN – DE AX 9/11/2022

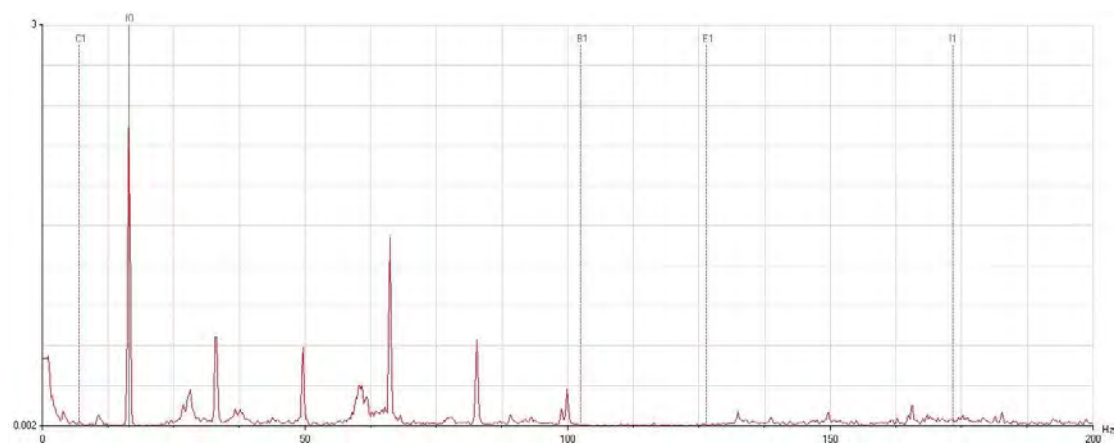


Εικόνα ΠΙ.24: Διάγραμμα για Νο4 περωτή σημείο μέτρησης FN – DE HR 9/11/2022

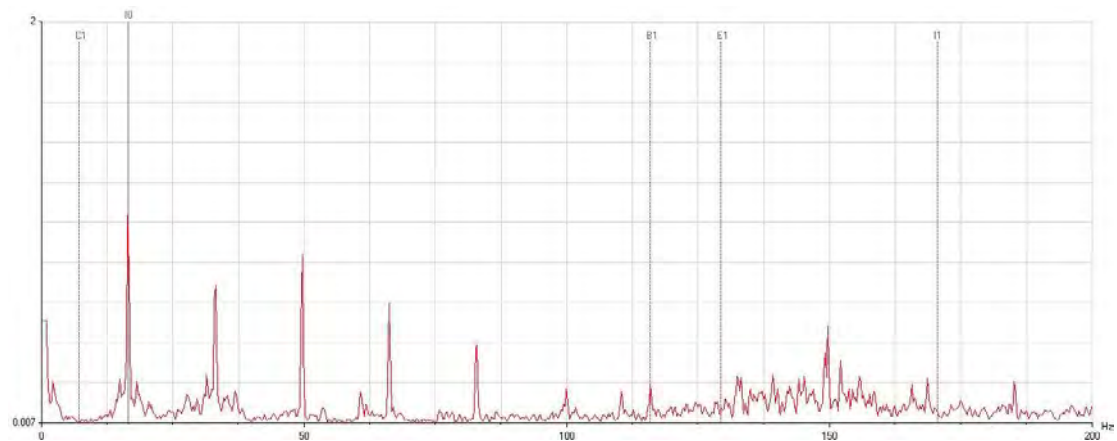




Εικόνα ΠΙ.25: Διάγραμμα για Νο4 περωτή σημείο μέτρησης FN – NDE AX 9/11/2022

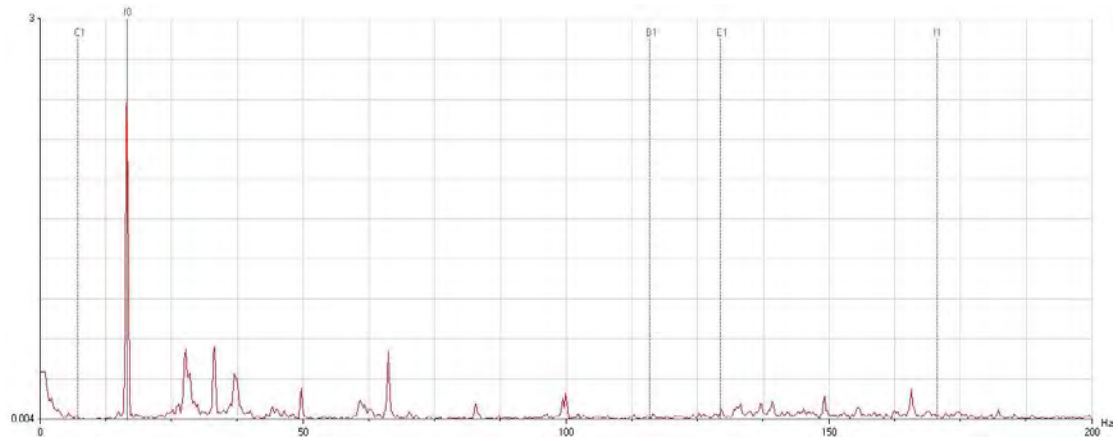


Εικόνα ΠΙ.25: Διάγραμμα για Νο4 περωτή σημείο μέτρησης FN – NDE HR 9/11/2022

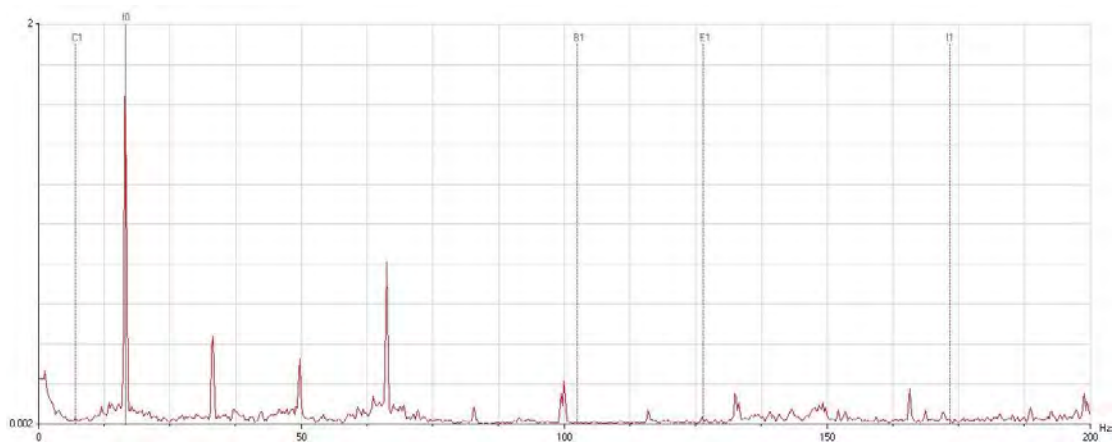


Εικόνα ΠΙ.26: Διάγραμμα για Νο4 περωτή σημείο μέτρησης FN – DE AX 17/4/2023

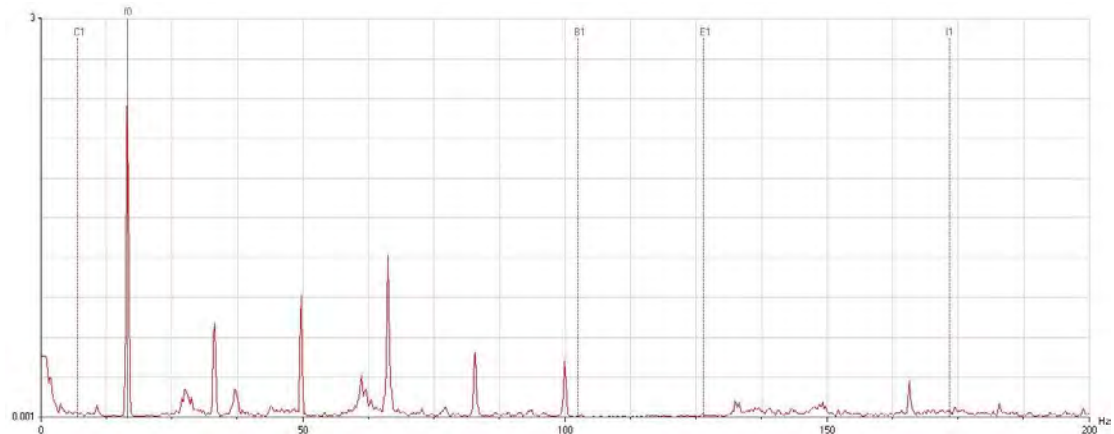




Εικόνα ΠΙ.27: Διάγραμμα για Νο4 περωτή σημείο μέτρησης FN – DE HR 17/4/2023



Εικόνα ΠΙ.28: Διάγραμμα για Νο4 περωτή σημείο μέτρησης FN – NDE AX 17/4/2023



Εικόνα ΠΙ.29: Διάγραμμα για Νο4 περωτή σημείο μέτρησης FN – NDE HR 17/4/2023

