

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ  
ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΣΕ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ, Α.Μ:5840**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΜΠΟΥΡΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΠΡΟΪΣΤΑΜΕΝΟΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε. Τ.Ε.Ι. ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2015**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την πτυχιακή εργασία η οποία εκπονήθηκε στο εργοστάσιο « Α.Ε. Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ» στο Δρέπανο Αχαΐας και αναφέρεται στην ανάλυση των παραμέτρων της προβλεπτικής συντήρησης σε βιομηχανία τσιμέντου.

Αρχικά, γίνεται μια αναφορά στις αιτίες και στις μορφές των βλαβών οι οποίες προκαλούν δονήσεις σε μηχανήματα. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση των ταλαντώσεων με τη βοήθεια αναλυτή κραδασμών (vibration analyzer) αλλά και ζυγοστάθμιση σε πτερωτή ανεμιστήρα. Τέλος γίνεται μια αναφορά στην ανίχνευση σφαλμάτων με τη βοήθεια υπερήχων.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Καμπουρίδη, προϊστάμενο του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδος, τον κ. Αλέξανδρο Λαϊνά για την αμέριστη βοήθειά του κατά τη διάρκεια της πτυχιακής εργασίας αλλά και τους κ. Ιωάννη Παυλόπουλο και κ. Δημήτριο Φωτόπουλο.

**Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή:** Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολόκληρου του κειμένου εξ ίσου, έχω δε αναφέρει στην βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής  
ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ

.....

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στην ανάλυση των παραμέτρων της προβλεπτικής συντήρησης σε βιομηχανία τσιμέντου. Η προβλεπτική συντήρηση αποτελεί τη μέθοδο πρόβλεψης διαφόρων σφαλμάτων μέσω μετρητικών οργάνων και της έγκαιρης επιδιόρθωσής τους ούτως ώστε να μην αποβούν ικανά να σταματήσουν την παραγωγή και έτσι να αποφέρουν ζημία στην επιχείρηση.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή στην ανάλυση των ταλαντώσεων και των μηχανικών δονήσεων. Ακόμα, δίνονται οι ορισμοί της μηχανικής ταλάντωσης αλλά και της μηχανικής δόνησης και ορίζεται η έννοια της βλάβης ενός εξοπλισμού. Τέλος, αναλύονται οι αιτίες οι οποίες προκαλούν βλάβες σε έναν εξοπλισμό παρουσιάζοντας τις διάφορες μορφές των φασμάτων που κατέχει η κάθε μία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται η μέθοδος μέτρησης των ταλαντώσεων με τον αναλυτή κραδασμών (vibration analyzer), γίνεται αναφορά στα αισθητήρια του μετρητικού οργάνου και ορίζονται οι παράμετροι των δονήσεων (συχνότητα, εύρος). Ακόμα, αναλύεται και περιγράφεται ο εντοπισμός σφαλμάτων σε ανεμιστήρα, με τη βοήθεια του αναλυτή κραδασμών και αναφέρονται τα αποτελέσματα.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η διαδικασία της μέτρησης και της διόρθωσης της αζυγοσταθμίας πτερωτής ανεμιστήρα με τη βοήθεια του αναλυτή κραδασμών και περιγράφονται τα βήματα επίτευξής της.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται η ανίχνευση σφαλμάτων με υπέρηχους. Αναλύονται οι βασικές αρχές των υπέρηχων και η παραγωγή και η ανίχνευση των υπέρηχων. Ακόμα προσδιορίζονται οι περιορισμοί οι οποίοι υφίστανται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με υπέρηχους. Τέλος, γίνεται μια αναφορά στην αρχή λειτουργίας των ανιχνευτών σφαλμάτων με τη βοήθεια των υπέρηχων αλλά και στους διάφορους τύπους των αισθητηρίων του μετρητικού οργάνου.

Τα σπουδαιότερα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από την παρούσα εργασία είναι (α) η κατανόηση της αναγκαιότητας και της σημαντικότητας της συντήρησης και ειδικότερα της προβλεπτικής, η οποία αποτελεί το βασικότερο είδος συντήρησης για τις βιομηχανίες σήμερα οι οποίες έχουν ως κύριο σκοπό την αποφυγή επικείμενων βλαβών οι οποίες είναι ικανές να διακόψουν την παραγωγή και τέλος (β) η κατανόηση των διάφορων μορφών των βλαβών και η διάγνωσή τους με την χρησιμοποίηση μετρητικών οργάνων όπως είναι ο αναλυτής κραδασμών με αποτέλεσμα την επιδιόρθωση τους.

# Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	ii
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	iii
<b>Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α</b> .....	iv
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	1
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	7
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΟΝΗΣΕΩΝ</b> .....	7
1.1 Βλάβες εξοπλισμού.....	8
1.2 Αιτίες που προκαλούν βλάβες εξοπλισμού και απεικόνιση φάσματος.....	9
1.2.1 Απουσία ζυγοστάθμισης (Unbalance).....	9
1.2.2 Πρόβλημα εκκεντρότητας στροφέα (Eccentric rotor).....	12
1.2.3 Κάμψη άξονα ( Bent shaft).....	13
1.2.4 Πρόβλημα τοποθέτησης ρουλεμάν (Misaligned bearing cocked on shaft).....	15
1.2.5 Απουσία ευθυγράμμισης (Misalignment).....	16
1.2.6 Χαλάρωση εξαρτημάτων (Mechanical looseness).....	20
1.2.7 Τριβή στροφέα (Rotor rubs).....	25
1.2.8 Συντονισμός (Resonance).....	26
1.2.9 Πρόβλημα ρουλεμάν (Rolling element bearings).....	28
1.2.10 Ηλεκτρικά προβλήματα.....	31
1.2.11 Προβλήματα μειωτήρων.....	31
1.2.12 Προβλήματα ιμάντων (Belt defects).....	34
1.2.13 Κραδασμοί σε κουζινέτα εδράσεως (Journal bearings vibrations).....	36
1.2.14 Στροβιλισμός ελαίου σε κουζινέτο (Oilwhirl).....	36
1.2.15 Παλινδρομικές μηχανές (Reciprocating machines).....	36
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	37
<b>2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΥΤΗ ΚΡΑΔΑΣΜΩΝ (VIBRATION ANALYZER)</b> .....	37
2.1 Δημιουργία σημείων μέτρησης του ανεμιστήρα ( Route).....	42
2.2 Διαδικασία μετρήσεων στον ανεμιστήρα.....	43
2.3 Διαδικασία απεικόνισης μετρήσεων στο software.....	50

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....</b>	<b>53</b>
<b>3. ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΑΖΥΓΟΣΤΑΘΜΙΑΣ ΠΤΕΡΩΤΗΣ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ ΑΝΑΛΥΤΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ. ....</b>	<b>53</b>
3.1 Δημιουργία αρχικών ρυθμίσεων στη συσκευή.....	53
3.2 Διαδικασία ζυγοστάθμισης της πτερωτής.....	57
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....</b>	<b>63</b>
<b>4. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ.....</b>	<b>63</b>
4.1 Βασικές αρχές των υπέρηχων.....	63
4.2 Παραγωγή και ανίχνευση υπέρηχων.....	64
4.3 Έλεγχος με υπέρηχους.....	64
4.4 Περιορισμοί κατά τη μέτρηση με υπέρηχους.....	65
4.5 Συσκευές και αισθητήρες ανίχνευσης σφαλμάτων υπέρηχων.....	65

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα παρακάτω κεφάλαια, θα ασχοληθούμε με τη διαδικασία της προβλεπτικής συντήρησης σε βιομηχανία τσιμέντου και συγκεκριμένα με την ανάλυση κραδασμών. Θα περιγραφούν οι περιπτώσεις σφαλμάτων και η διατύπωση τους σε συγκεκριμένα φάσματα ανάλογα με την περίπτωση τους με τη βοήθεια ειδικού software. Μέσω ειδικού μετρητικού μηχανήματος θα ζυγοσταθμιστεί η πτερωτή ενός ανεμιστήρα αλλά και τέλος, θα περιγραφεί η ανίχνευση σφαλμάτων με υπερήχους.

## 1. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

Η συντήρηση μέχρι πριν από κάποιες δεκαετίες αποτελούσε μια δραστηριότητα κατά την οποία αν κάποιο τμήμα εξοπλισμού παρουσίαζε πρόβλημα, τότε γινόταν η αντικατάστασή του άμεσα και έμπαινε ξανά σε λειτουργία. Στη συνέχεια η συντήρηση άρχισε να παίρνει τη μορφή προληπτικών ενεργειών με στόχους οι οποίοι ήταν σαφής.

(Πηγή: Αρχείο Α.Ε. Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ, *Προβλεπτική συντήρηση*)

Κάποιες βασικές αρχές της συντήρησης είναι ότι:

- Κατά τη σχεδίαση ενός εξοπλισμού, λαμβάνεται υπόψη η μέθοδος και το κόστος συντήρησης. Αυτό βέβαια δεν πρέπει να επηρεάσει τη σχεδίαση ή την ποιότητα των υλικών.
- Είναι αναγκαίο η συντήρηση να προσαρμόζεται σε νέες τεχνολογίες.
- Η συντήρηση θα πρέπει να είναι μέρος της γενικής στρατηγικής της κάθε επιχείρησης και να βρίσκεται στο σύνολο των δραστηριοτήτων της.

**Συντήρηση** είναι η λειτουργία μιας επιχείρησης, επιφορτισμένη με:

- Τη διατήρηση των εγκαταστάσεων και του εξοπλισμού σε προδιαγεγραμμένες επιδόσεις.
- Την διαφύλαξη της ασφάλειας και της υγιεινής του προσωπικού κατά τη χρήση του εξοπλισμού.
- Την προστασία του περιβάλλοντος.
- Τη διατήρηση του κόστους στα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα.

Ως βασικοί στόχοι της λειτουργίας της συντήρησης είναι οι εξής:

- Η ελαχιστοποίηση του κόστους των παραγωγικών απωλειών. Αυτό σημαίνει:

1) **Ελαχιστοποίηση** του χρόνου κατά τον οποίο βρίσκεται εκτός λειτουργίας ο παραγωγικός εξοπλισμός.

2) **Διατήρηση** των χαρακτηριστικών και των ικανοτήτων του εξοπλισμού στα πλαίσια των προδιαγραφών του κατασκευαστή.

- Η ελαχιστοποίηση του κόστους της λειτουργίας συντήρησης (μισθοί, ανταλλακτικά, αναλώσιμα).
- Η ελαχιστοποίηση του ολικού κόστους.
- Η διάρκεια της συντήρησης να είναι η συντομότερη δυνατή, έτσι ώστε ο εξοπλισμός να δοθεί προς παραγωγή και να μην χαθεί πολύτιμος χρόνος.
- Πρέπει να περιορίζει τη φθορά του εξοπλισμού και όπου καθίσταται δυνατό και μη δαπανηρό, να επεκτείνει τη ζωή του.
- Η προστασία του περιβάλλοντος.
- Η διαφύλαξη της υγείας και της ασφάλειας των εργαζομένων από κινδύνους που ελλοχεύονται στον εξοπλισμό.

Οι κατηγορίες συντήρησης είναι οι εξής:

- **Προληπτική συντήρηση.**
- **Επιβελτιωτική συντήρηση.**
- **Προβλεπτική συντήρηση.**
- **Διορθωτική συντήρηση.**

Ως **διορθωτική συντήρηση** ορίζεται η συντήρηση η οποία εκτελείται για την αποκατάσταση μιας βλάβης, που εμφανίζεται συνήθως αιφνίδια στον εξοπλισμό και προκαλεί τη μερική ή την ολική ακινησία του. Συνήθως, η συντήρηση αυτή συντελείται με αντικατάσταση εξαρτημάτων ή και με επισκευή. Η διάγνωση της αιτίας της βλάβης και κατ' επέκταση του εξαρτήματος του εξοπλισμού που την προκάλεσε, είναι πολλές φορές προβληματική και χρονοβόρα.

Με τον όρο **επιβελτιωτική συντήρηση** ορίζεται η διαδικασία της τροποποίησης και της αναβάθμισης του λειτουργούντος παραγωγικού

εξοπλισμού. Σε ευρύτερη διατύπωση, η έννοια της επιβελτιωτικής συντήρησης περιλαμβάνει και την ολική αντικατάσταση των μηχανημάτων, όπου κρίνεται ότι αυτή είναι οικονομοτεχνικά αναγκαία. Η αντικατάσταση καθώς και η προσθήκη κάποιων εξαρτημάτων στον εξοπλισμό, πραγματοποιείται έπειτα από τη σύνταξη σχετικής μελέτης και επανασχεδίασης του εξοπλισμού.

Η **προληπτική συντήρηση** είναι η εξέλιξη της διορθωτικής συντήρησης. Εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια που μία μηχανή λειτουργεί ομαλά, προκειμένου να αποφευχθεί μια μελλοντική αστοχία της. Η συχνότητα εφαρμογής της προληπτικής συντήρησης είναι συνήθως σταθερή και βασίζεται στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων του κάθε μηχανήματος.

(Πηγή: Αρχείο Α.Ε. Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ, *Προβλεπτική συντήρηση*)

Εμείς στα παρακάτω κεφάλαια θα ασχοληθούμε με την **προβλεπτική** συντήρηση η οποία αποτελεί την σημαντικότερη και αποδοτικότερη μορφή συντήρησης.

## **2. ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ (Predictive maintenance)**

Προβλεπτική συντήρηση ονομάζεται η παρακολούθηση ενός μηχανολογικού εξοπλισμού και η ανακάλυψη επικείμενων βλαβών του, πριν αυτές εμφανιστούν. Η προβλεπτική συντήρηση αποτελεί μια καινοτομία στην προσέγγιση της διαχείρισης των συστημάτων συντήρησης τα οποία εφαρμόζονται σε εργοστασιακές μονάδες τα τελευταία χρόνια.

(Πηγή: Αρχείο Α.Ε. Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ, *Προβλεπτική συντήρηση*)

Οι σύγχρονες επιχειρηματικές συνθήκες του σήμερα απαιτούν ταχύτητα και ευελιξία καθώς κάθε απρόσμενη βλάβη μπορεί να επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στην παραγωγή. Έτσι χρησιμοποιώντας σύγχρονα συστήματα και μεθόδους διάγνωσης βλαβών που βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης παρέχεται συνεχής ή περιοδικός έλεγχος της κατάστασης ενός μηχανολογικού εξοπλισμού, διαμορφώνοντας μία άποψη για την χρονική στιγμή κατά την οποία θα πρέπει να γίνει η συντήρηση. Αυτό σημαίνει πως κάθε φυσική παράμετρος λειτουργίας του εξοπλισμού, όπως είναι η



λίπανση, η θερμοκρασία, η τάση και η ένταση του ρεύματος, η πίεση, πρέπει να υπολογίζονται και αντίστοιχα να ορίζονται τα μηχανικά όρια λειτουργίας για κάθε μηχάνημα ξεχωριστά έτσι ώστε να μπορεί να ανακαλυφθεί οποιοδήποτε πρόβλημα κατά τη διάρκεια της συστηματικής επιτήρησης μέσω μετρήσεων και περιοδικών επιθεωρήσεων. Τα μηχανικά όρια λειτουργίας είναι συνήθως αυστηρά ώστε τα προβλήματα να εντοπίζονται πολύ πριν πραγματοποιηθεί εκτεταμένη ζημιά στον εξοπλισμό. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τη συνεχή παρακολούθηση μπορεί να είναι εβδομαδιαίες, μηνιαίες, εξαμηνιαίες και αυτό ορίζεται από την κρίση του εκάστοτε μηχανικού συντήρησης. Στην περίπτωση που οι μετρήσεις προσεγγίζουν τιμές που απέχουν αρκετά από τα καθορισμένα όρια, οι υπεύθυνοι έχουν την πολυτέλεια του χρόνου να επιδιορθώσουν ο πρόβλημα.

### **3. Η ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ**

Η προβλεπτική συντήρηση εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια σε βιομηχανίες και αποσκοπεί στην έγκαιρη επιδιόρθωση τυχόν προβλημάτων πριν αυτά εξελιχθούν σε ζημιά. Έτσι λοιπόν εφαρμόζεται και στις βιομηχανίες τσιμέντου. Μερικά στατιστικά γεγονότα όσο αναφορά τη συντήρηση, μας αποδεικνύουν πόσο χρήσιμη είναι η προβλεπτική συντήρηση για μια βιομηχανία. Αυτά είναι τα εξής:

- Το 15%-40% του έμμεσου κατασκευαστικού κόστους καταναλώνεται κατά τη συντήρηση, ενώ περίπου το ½ δεν χρειάζεται.
- Το 20%-40% της συντήρησης είναι επιδιορθωτική. Η επιδιορθωτική συντήρηση είναι 6-10 φορές ακριβότερη της προβλεπτικής.
- Το 25%-60% της συντήρησης είναι προληπτική. Ωστόσο αυτή είναι 4-5 φορές πιο ακριβή από την προβλεπτική.

(Πηγή: Αρχείο Α.Ε. Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ, *Προβλεπτική συντήρηση*)

Οι κυριότερες μέθοδοι προβλεπτικής συντήρησης σε βιομηχανία τσιμέντου είναι οι εξής:

- Φασματογραφική ανάλυση λιπαντικών.
- Θερμογραφία.
- Ανίχνευση σφαλμάτων με υπερήχους.
- Μέτρηση και ανάλυση ταλαντώσεων ή μηχανικών δονήσεων.

### **Πλεονεκτήματα της προβλεπτικής συντήρησης**

Συνοπτικά τα προτερήματα της προβλεπτικής συντήρησης είναι τα ακόλουθα:

- Μειώνει ή και μηδενίζει πολλές φορές τον εκτός λειτουργίας χρόνο του βιομηχανικού εξοπλισμού, αυξάνοντας το χρόνο χρησιμοποίησής του.
- Ελαχιστοποιεί ή και μηδενίζει τις περιπτώσεις καταστροφικών βλαβών, οι οποίες τις περισσότερες φορές είναι πιο δαπανηρές από τις συνηθισμένες βλάβες.
- Μειώνει το συνολικό κόστος συντήρησης.
- Ελαχιστοποιεί την πιθανότητα για απρόβλεπτη συντήρηση και επισκευή η οποία τις περισσότερες φορές επιδρά αρνητικά στον προγραμματισμό και τη ροή της παραγωγής.
- Συντελεί στη μείωση των αποθεμάτων των ανταλλακτικών, καθώς η δυνατότητα που έχουν οι μηχανικοί συντήρησης να προγραμματίζουν τις επισκευές, ενισχύει την προσπάθεια για εδραίωση και εφαρμογή της φιλοσοφίας «Just in time».
- Ενισχύει τη λειτουργικότητα του εξοπλισμού με καθορισμένες προδιαγραφές.
- Μειώνει σημαντικά την υπέρογκη κατανάλωση ρεύματος που οφείλεται σε μη σωστή λειτουργία των μηχανών.
- Επιτυγχάνει αποταμιεύσεις σε επενδύσεις εξοπλισμού και κτηριακών εγκαταστάσεων ελαχιστοποιώντας την ανάγκη για επιπρόσθετο εξοπλισμό που θα εξασφαλίζει την ορθή λειτουργία της βιομηχανικής μονάδας και που τις περισσότερες φορές απαιτεί και επιπρόσθετο χώρο για την τοποθέτησή του.
- Αυξάνει την παραγωγικότητα.

- Μειώνει σημαντικά την πιθανότητα υποτίμησης του βιομηχανικού εξοπλισμού που συνήθως οφείλεται στη φτωχή συντήρηση του. Με την προβλεπτική συντήρηση τα μηχανήματα ζουν περισσότερο και λειτουργούν καλύτερα.
- Μειώνει τις μη απαραίτητες επισκευές, καθώς τα μηχανήματα επιδιορθώνονται μόνο στην περίπτωση που αποδίδουν λιγότερο των καθορισμένων προδιαγραφών.
- Ελαχιστοποιεί τις περιπτώσεις επισκευής λόγω λανθασμένης διάγνωσης.
- Συνηγορεί στη μείωση των ανικανοποίητων ή και χαμένων πελατών εξαιτίας της φτωχής ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων.
- Συντελεί στην ελαχιστοποίηση της επανάληψης της παραγωγής των αγαθών που οφείλεται πολλές φορές στην κακή αποδοτικότητα του εξοπλισμού.
- Συντελεί στη σημαντική μείωση των ελαττωματικών προϊόντων που οφείλονται στην κακή λειτουργία του παραγωγικού εξοπλισμού και που δημιουργούν επιπλέον κόστη στις δραστηριότητες των «reserve logistic» του εργοστασίου.
- Ελαχιστοποιεί την αναγκαιότητα για υπερωρίες που μπορεί να οφείλονται είτε σε απροσδόκητη διακοπή της παραγωγής, είτε σε φτωχή απόδοση του εξοπλισμού.
- Μειώνει την πιθανότητα υλοποίησης των ποινικών ρητρών που υπάρχουν σε κάθε σύμβαση και που έχουν να κάνουν με την καθυστέρηση στην παράδοση των προϊόντων.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

### **Εισαγωγή στην ανάλυση ταλαντώσεων και μηχανικών δονήσεων**

Ο έγκαιρος εντοπισμός μιας βλάβης, όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω, θα ελαχιστοποιήσει το ρίσκο μιας αιφνίδιας κράτησης ενός μηχανήματος, με συνέπεια τη διακοπή της παραγωγής καθώς και το κόστος αποκατάστασής του. Σε αυτό ακριβώς στοχεύει και η μέθοδος μέτρησης ταλαντώσεων. Επιπρόσθετα αποτελεί το βασικό εργαλείο για την επιβεβαίωση της ορθής επισκευής ενός μηχανήματος, ελαχιστοποιώντας έτσι το ρίσκο εμφάνισης προβλημάτων.

Ως ταλάντωση ορίζεται η κίνηση ενός σημείου κατά την οποία αυτό κινείται εμπρός και πίσω από μία θέση η οποία ονομάζεται σημείο ηρεμίας. Όταν ένα στερεό ταλαντεύεται, κάθε σημείο του εκτελεί τη δική του κίνηση ταλάντωσης.

Δόνηση ονομάζεται ένα φαινόμενο σύμφυτο σε κάθε περιστρεφόμενο ή παλινδρομικό μηχάνημα. Ακόμα και κάτω από τις καλύτερες λειτουργικές συνθήκες, υπάρχει ένα ελάχιστο επίπεδο δόνησης το οποίο οφείλεται σε μικροσφάλματα και στις απαραίτητες κατασκευαστικές ανοχές. Ορισμένα μηχανήματα, παρουσιάζουν λόγω της λειτουργίας τους, φυσιολογικά, ένα σημαντικό εύρος δόνησης.

Η απαρχή ενός μηχανικού προβλήματος, συνοδεύεται από αλλαγές στη δόνηση ή το θόρυβο που εκπέμπει το μηχάνημα. Όταν η δόνηση αυξάνεται, υφίστανται κάποια αίτια τα οποία συνήθως αποτελούν ένα μηχανικό πρόβλημα.

Ένα συγκεκριμένο πρόβλημα προκαλεί κραδασμούς κατά ένα μοναδικό τρόπο. Το γεγονός αυτό επιτρέπει να προσδιοριστεί ένα μηχανικό πρόβλημα, μετρώντας απλά και αξιολογώντας τα δονητικά συμπτώματα. Ο τρόπος με τον οποίο δονείται το μηχάνημα, αποτυπώνεται σε ένα συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων του δονητικού σήματος.

## 1.1 Βλάβες εξοπλισμού

Ως βλάβη ή ελάττωμα ενός εξαρτήματος ή ενός μηχανήματος στη γραμμή παραγωγής μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε ασυμφωνία ενός χαρακτηριστικού του ή κάποιας λειτουργίας του με κάποιες προκαθορισμένες τιμές. Πρέπει να επισημανθεί ότι η παρουσία βλάβης δεν είναι απαραίτητο να συνδέεται με την αχρηστία. Τα μηχανήματα έχουν την τάση να μας προειδοποιούν πολύ νωρίτερα για τις επικείμενες βλάβες τους. Οι ενδείξεις οι οποίες είναι υπεύθυνες και παραπέμπουν σε περίπτωση βλάβης ενός μηχανήματος είναι οι εξής:

- 1) Ασυνήθιστος θόρυβος.
- 2) Ύπαρξη εξωγενών σωματιδίων στα λιπαντικά.
- 3) Αυξημένη θερμοκρασία λειτουργίας.
- 4) Ανεπιθύμητη διαρροή ηλεκτρικών φορτίων.
- 5) Καταγραφή αλλαγών στο διάγραμμα δονήσεων.

Όταν λοιπόν παρατηρηθούν οι παραπάνω ενδείξεις σε ένα μηχάνημα, τότε αμέσως από τους αρμόδιους μηχανικούς πραγματοποιείται ανάλυση κραδασμών για να «μεταφραστεί» η συγκεκριμένη ένδειξη και διαπιστωθεί το αίτιο της βλάβης.

Στο εσωτερικό ενός μηχανήματος ενεργούν δυνάμεις ως αποτέλεσμα των αλληλεπιδράσεων των εξαρτημάτων στο εσωτερικό του. Αποτέλεσμα αυτών των δυνάμεων είναι η παρουσία των κραδασμών. Καθώς η λειτουργική κατάσταση ενός μηχανήματος χειροτερεύει, τόσο το επίπεδο των κραδασμών, όσο και η μορφή τους αλλάζει. Μελετώντας την ένταση των κραδασμών και αναλύοντας τη μορφή τους, μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με τη λειτουργική κατάσταση του μηχανήματος και των εσωτερικών εξαρτημάτων του. Οι συνηθισμένες αιτίες παρουσίας κραδασμών είναι η απουσία ευθυγράμμισης, απώλεια ζυγοστάθμισης, πρόβλημα σφαιροτριβέων, κάμψη άξονα, χαλάρωση εσωτερικών εξαρτημάτων από θέση άρμωσης, τριβή άξονα με κουζινέτα, σπηλαίωση, προβλήματα ηλεκτρικής φύσεως κινητήρα ή γεννήτριας, προβλήματα φθοράς ιμάντων, φθορά οδόντων ή κακή ευθυγράμμιση οδόντων μειωτήρα. Το πλάτος (ένταση) των κραδασμών εξαρτάται (και πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη κατά την ανάλυση) και από τον τρόπο στήριξης του μηχανήματος και την σκληρότητα αυτής. Άλλες αιτίες που προκαλούν κραδασμούς σε μηχανήματα είναι η τριβή μεταξύ εξαρτημάτων εντός του μηχανήματος, η φθορά σε πτερωτές (όπως για παράδειγμα σε μια πτερωτή ανεμιστήρα), οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που σχηματίζονται εντός του μηχανήματος, οι υδραυλικές δυνάμεις, οι αεροδυναμικές και τέλος ο συντονισμός διαφόρων επιφανειών εκτός ή εντός του μηχανήματος σε ένα εύρος συχνοτήτων.

## 1.2 Αιτίες που προκαλούν βλάβες εξοπλισμού και απεικόνιση φάσματος

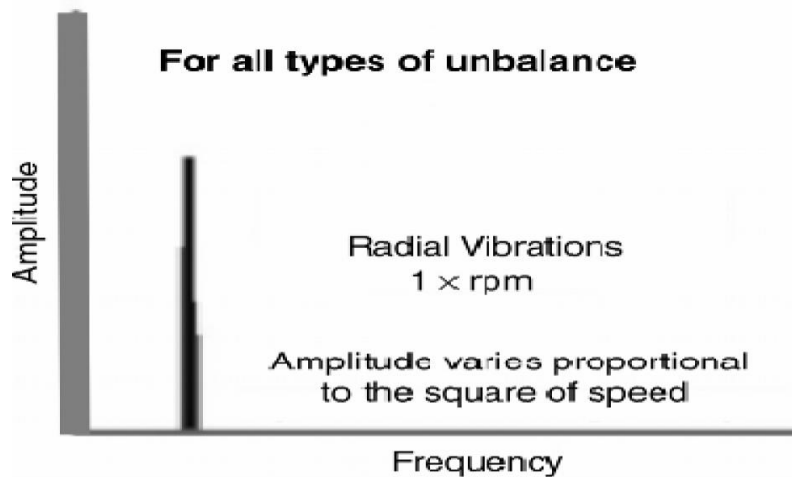
Στη συνέχεια θα γίνει μια αναφορά των κυριότερων αιτιών που προκαλούν κραδασμούς(και κατά συνέπεια βλάβη ενός εξοπλισμού)και θα απεικονιστεί η μορφή του φάσματος της καθεμίας.

### 1) Απουσία ζυγοστάθμισης (Unbalance)

#### 1.1 Στατική (Static unbalance)

Η στατική αζυγοσταθμία αφορά την άνιση κατανομή βάρους ενός περιστρεφόμενου εξαρτήματος κατά τις κάθετες διακυμάνσεις δυνάμεων σε αυτό.

Στην περίπτωση προβλήματος ζυγοστάθμισης (unbalance), το peak παρατηρείται στην 1<sup>η</sup> αρμονική στις ακτινικές ρυθμίσεις όπως φαίνεται στο σχ. 1.1. Όταν ο αισθητήρας μετακινηθεί από τη θέση οριζόντια, παρατηρείται μετακίνηση φάσης 90°. Το πρόβλημα αυτό δημιουργεί δυνάμεις επί των δύο ρουλεμάν του στροφέα και οι δυνάμεις αυτές είναι πάντα προς την ίδια κατεύθυνση. Οι κραδασμοί στα σημεία των ρουλεμάν είναι στην περίπτωση αυτή συμφασικοί όπως διαπιστώνουμε στο σχ.1.2.



Σχήμα 1.1: Μορφή φάσματος σε πρόβλημα ζυγοστάθμισης

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων)



Σχήμα 1.2: Διαφορές φάσεων στην στατική αζυγοσταθμία

### 1.2 Δυναμική (Couple unbalance)

Η δυναμική αζυγοσταθμία αφορά τις πλευρικές διακυμάνσεις των δυνάμεων.

Το φάσμα αυτό παρουσιάζει εικόνα όμοια με εκείνη όταν υφίσταται στατική αζυγοσταθμία (σχ.1.2). Το φαινόμενο της δυναμικής αζυγοσταθμίας παρατηρείται όταν ο αισθητήρας μετακινείται από κάθετη σε οριζόντια θέση μετακίνησης φάσης κατά  $90^\circ$ . Επιπρόσθετα, πραγματοποιώντας μετρήσεις ως προς την ίδια κατεύθυνση, παρουσιάζεται αλλαγή φάσης μεταξύ των δύο άκρων του άξονα.



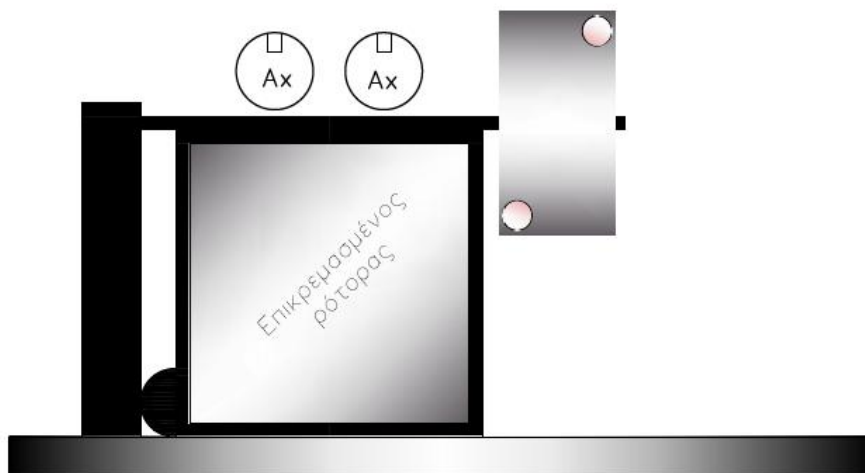
Σχήμα 1.3 : Διαφορές φάσεων στη δυναμική αζυγοσταθμία

### 1.3 Επικρεμασμένος ρότορας (*overhung rotors*)

Όπως και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις αναμένεται η ίδια εικόνα φάσματος με την στατική αζυγοσταθμία.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι πιθανό να υπάρξουν κραδασμοί στην αξονική κατεύθυνση και δονήσεις μεγάλου πλάτους σε αξονικές, οριζόντιες αλλά και κάθετες κατευθύνσεις. Η σχέση μεταξύ των φάσεων των κραδασμών στα σημεία των ρουλεμάν σε οριζόντια αλλά και σε κάθετη κατεύθυνση δεν είναι σταθερή.

Στην αξονική κατεύθυνση, ο λόγος ο οποίος παρατηρείται μεγάλη τιμή αξονικών κραδασμών, είναι η δημιουργία τάσεων κάμψης στον άξονα επί της φωλιάς του ρουλεμάν λόγω αστάθειας και κατά συνέπεια υφίσταται αξονική μετακίνηση σε αυτό το σημείο.



Σχήμα 1.4 : Διαφορές φάσεων σε επικρεμασμένο ρότορα



#### 1.4 Μηχανήματα κάθετης στήριξης

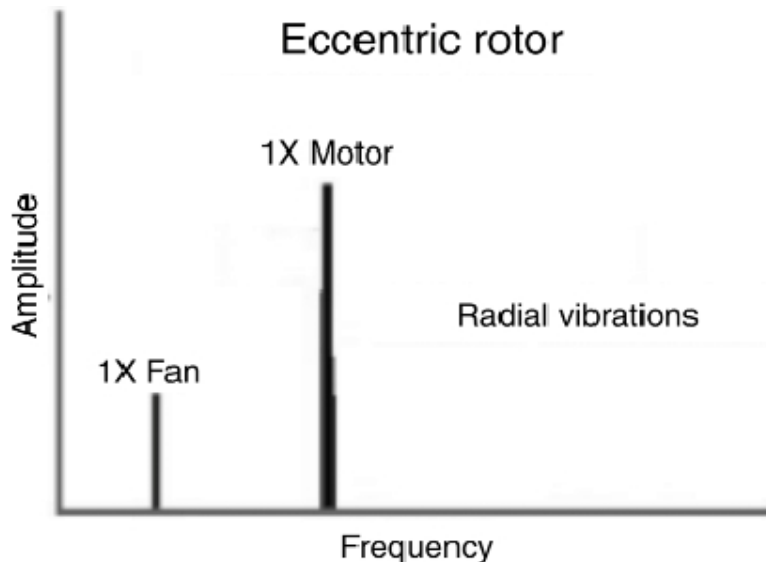
Σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται υψηλή τιμή στην 1<sup>η</sup> αρμονική κατά την οριζόντια μέτρηση (horizontal).

Για να διαπιστωθεί εάν το πρόβλημα ζυγοστάθμισης οφείλεται στον κινητήρα ή στην αντλία, απαιτείται αποσύμπλεξη και λειτουργία του κινητήρα χωρίς την αντλία. Εάν το επίπεδο των κραδασμών στο παραμένει ακόμα μεγάλο, τότε το πρόβλημα είναι στον κινητήρα, διαφορετικά οφείλεται στην αντλία.

#### 2) Πρόβλημα εκκεντρότητας στροφέα (Eccentric rotor)

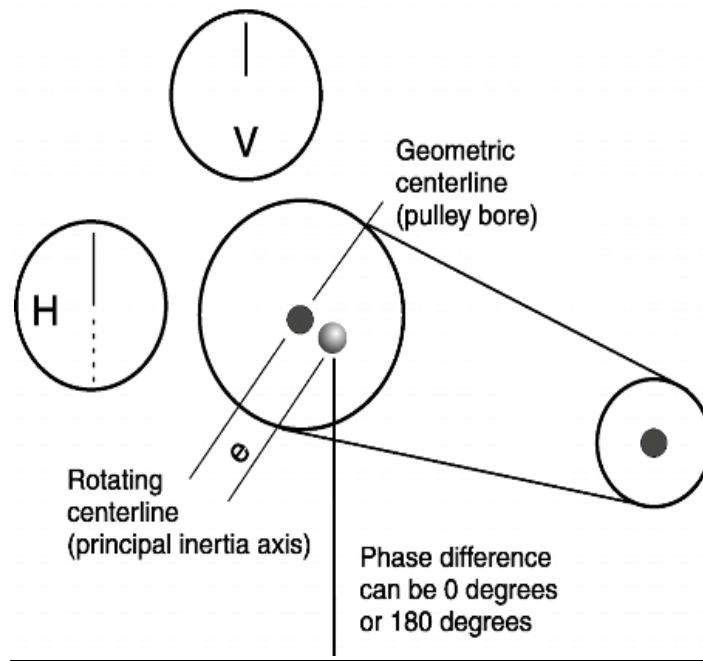
Πρόβλημα εκκεντρότητας του στροφέα εμφανίζεται συνήθως σε περιπτώσεις όπου η σύνδεση στρεπτού και στρεφόμενου μέρους γίνεται με ιμάντα. Μάλιστα η μετακίνηση του κέντρου γίνεται προς το σημείο στο οποίο τραβάει ο ιμάντας όπως φαίνεται και στο σχ.1.6.

Στην περίπτωση αυτή το φάσμα έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχ.1.5 και εντοπίζεται διαφορά φάσης 0 ή 180° όταν εκτελούνται μετρήσεις σε οριζόντια και κάθετη κατεύθυνση.



Σχήμα 1.5 :Μορφή φάσματος σε πρόβλημα εκκεντρότητας

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων*)



Σχήμα 1.6 : Διαφορά φάσης σε πρόβλημα εκκεντρότητας

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων*)

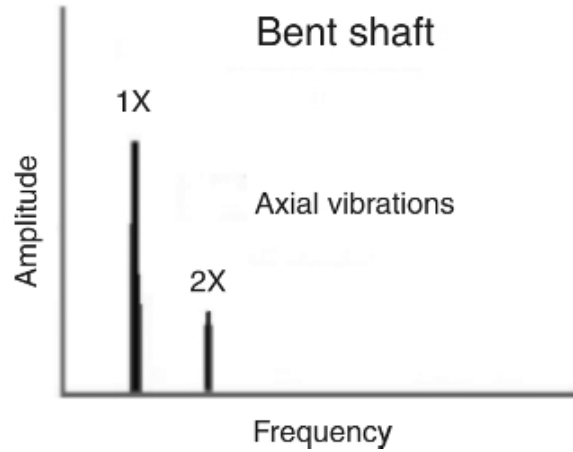
### 3) Κάμψη άξονα (Bent shaft)

Στην περίπτωση της κάμψης του άξονα υφίσταται η παρουσία ακτινικών κραδασμών (radial) σε οριζόντια ή κάθετη κατεύθυνση.

Το πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής είναι αυτό το οποίο επικρατεί στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου η κάμψη είναι κοντά στο κέντρο του άξονα.

Το πλάτος της 2<sup>ης</sup> αρμονικής είναι αυτό το οποίο επικρατεί κατά την περίπτωση όπου η κάμψη είναι στα άκρα του άξονα.

Το φάσμα για την περίπτωση της κάμψης άξονα έχει το ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 1.7: Μορφή φάσματος σε κάμψη άξονα

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων*)

Η διαφορά φάσεων σε αξονική αλλά και σε κάθετη ή οριζόντια κατεύθυνση είναι  $180^\circ$  και η αλλαγή του αισθητήρα από κάθετη σε οριζόντια θέση δεν προκαλεί αλλαγή φάσης (σχ.1.8).

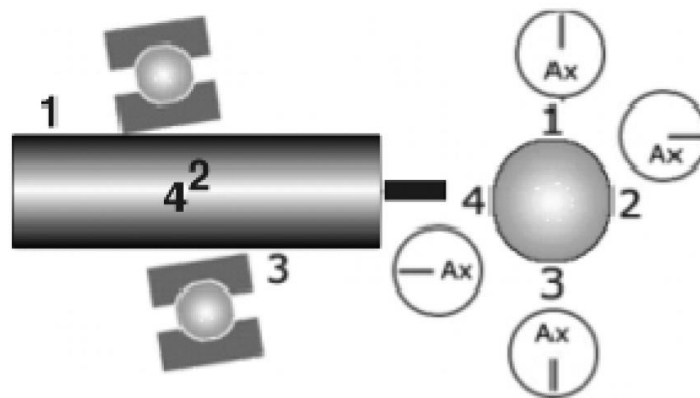


Σχήμα 1.8: Διαφορά φάσης σε κάμψη άξονα

#### 4) Πρόβλημα τοποθέτησης ρουλεμάν (*Misaligned bearing cocked on shaft*)

Κατά το πρόβλημα τοποθέτησης ρουλεμάν, το φάσμα στην αξονική κατεύθυνση μέτρησης παρουσιάζει υψηλές τιμές στην 1<sup>η</sup>, 2<sup>η</sup>, και 3<sup>η</sup> αρμονική.

Επίσης παρατηρείται διαφορά φάσης 180° κατά τη μέτρηση του επάνω σημείου του ρουλεμάν επί της φωλιάς με το κάτω, ή του αριστερού με το δεξιό σημείο (σχ.1.9).



Misaligned bearing  
cocked on a shaft

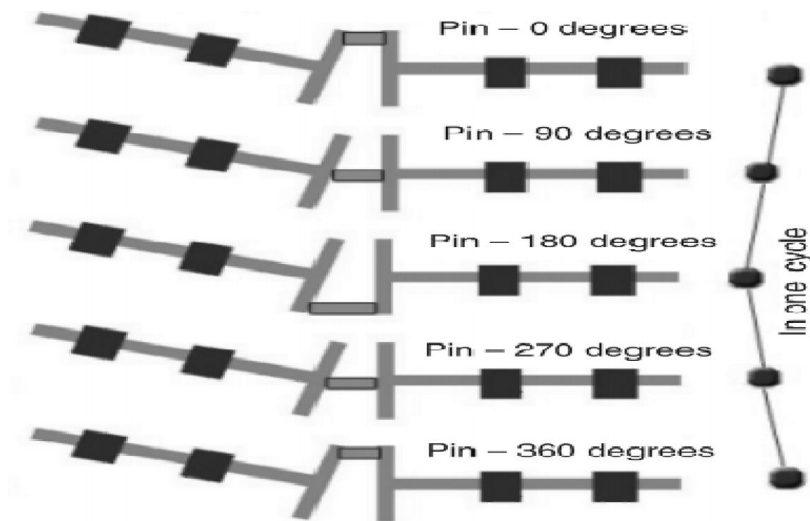
Σχήμα 1.9: Διαφορές φάσης ρουλεμάν

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων*)

## 5) Απουσία ευθυγράμμισης (Misalignment)

### 5.1 Γωνιακή (Angular misalignment)

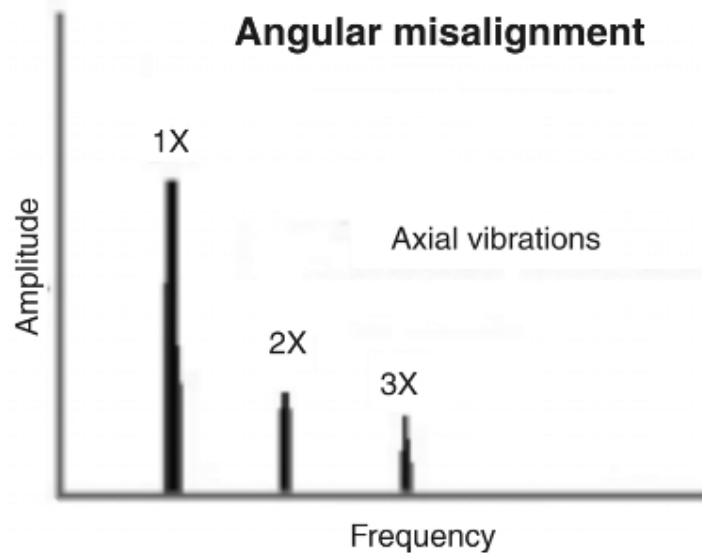
Στην περίπτωση της απουσίας γωνιακής ευθυγράμμισης, η κίνηση του άξονα κατά τη διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής, είναι αυτή η οποία παρουσιάζεται στο σχ.1.10.



Σχήμα 1.10: Απουσία γωνιακής ευθυγράμμισης

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων)

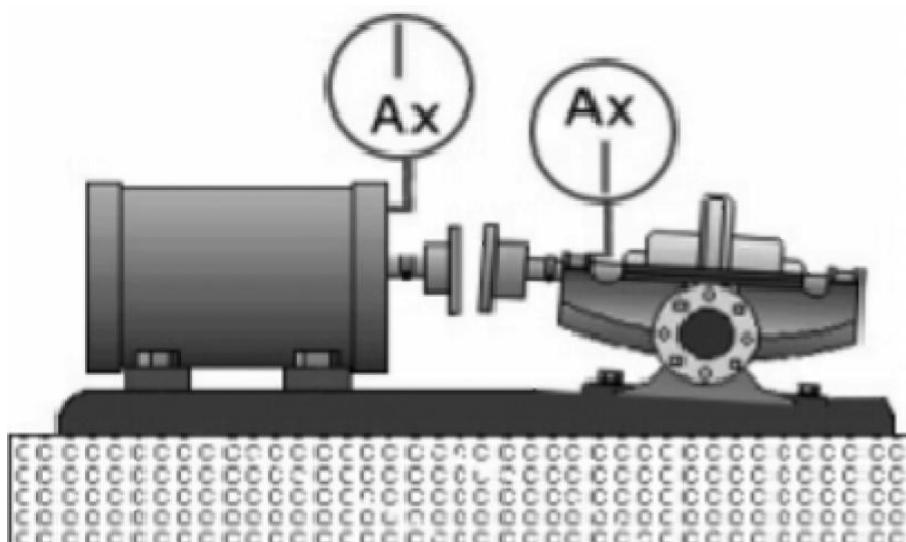
Το φάσμα κατά την αξονική κατεύθυνση παρουσιάζει συνήθως την ακόλουθη εικόνα (σχ.1.11).



Σχήμα 1.11: Μορφή φάσματος κατά την απουσία γωνιακής ευθυγράμμισης

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων)

Κατά τις μετρήσεις σε αξονική κατεύθυνση επί των ρουλεμάν αριστερά και δεξιά του συνδέσμου, παρατηρείται διαφορά φάσης 180°. Αντιθέτως κατά τις αντίστοιχες μετρήσεις σε οριζόντια ή κάθετη κατεύθυνση δεν υφίσταται διαφορά φάσης (σχ.1.12).

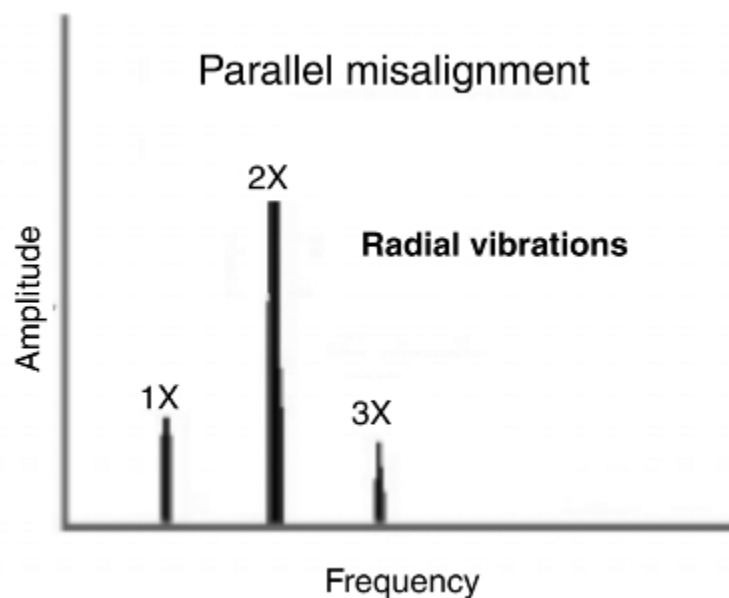


Σχήμα 1.12: Διαφορά φάσης σε απουσία γωνιακής ευθυγράμμισης

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων)

## 5.2 Παράλληλη (*Parallel misalignment*)

Σε ακτινικές κατευθύνσεις, το φάσμα αυτό παρουσιάζει συνήθως την ακόλουθη εικόνα (σχ.1.13).

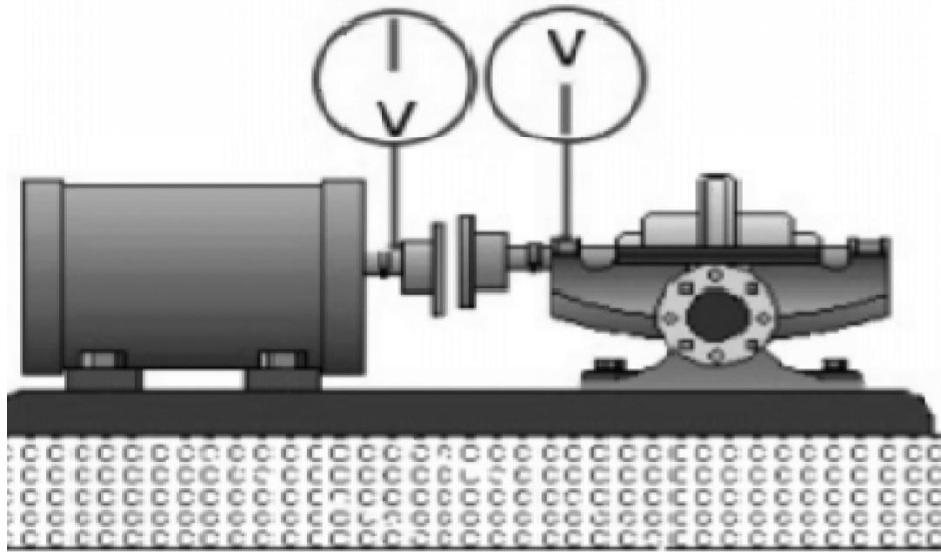


Σχήμα 1.13: Μορφή φάσματος σε παράλληλη μη ευθυγράμμιση

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων*)

Όταν τα προβλήματα της γωνιακής ή της παράλληλης μη ευθυγράμμισης θεωρούνται σοβαρά, παρατηρούνται μεγάλα πλάτη κραδασμών ακόμα και σε υψηλότερες αρμονικές (3<sup>η</sup> έως και 8<sup>η</sup>).

Οι κραδασμοί παρουσιάζουν διαφορά φάσης 180° εκατέρωθεν του συνδέσμου, τόσο σε αξονική όσο και στις λοιπές κατευθύνσεις μετρήσεων (σχ.1.14).



Σχήμα 1.14: Διαφορά φάσης στην παράλληλη μη ευθυγράμμιση

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων)

### 5.3 Σύγκριση ενδείξεων μη ευθυγράμμισης και κάμψης άξονα

Συχνά τα προβλήματα κάμψης του άξονα (*bent shaft*) απεικονίζονται δίνοντας το ίδιο φάσμα με αυτά της γωνιακής μη ευθυγράμμισης.

Οι κραδασμοί παρουσιάζονται έντονοι στην αξονική αλλά και στις υπόλοιπες κατευθύνσεις.

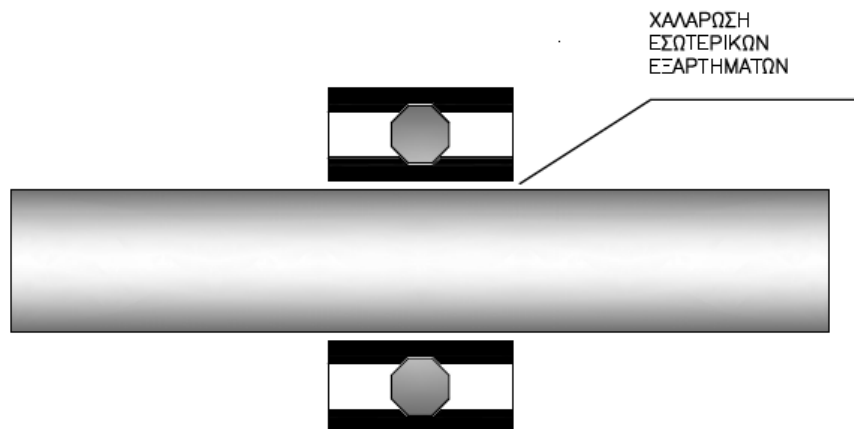
Ο διαχωρισμός του προβλήματος της κάμψης του άξονα από αυτό της γωνιακής μη ευθυγράμμισης μπορεί να γίνει μόνο με την μέτρηση των φάσεων. Σε ένα μηχάνημα στο οποίο υφίσταται κάμψη στον άξονά του, παρατηρείται διαφορά φάσης των κραδασμών στα ρουλεμάν. Στην περίπτωση μη ευθυγράμμισης, η διαφορά φάσης παρατηρείται στις μετρήσεις αριστερά και δεξιά του συνδέσμου.



## 6) Χαλάρωση εξαρτημάτων (*Mechanical looseness*)

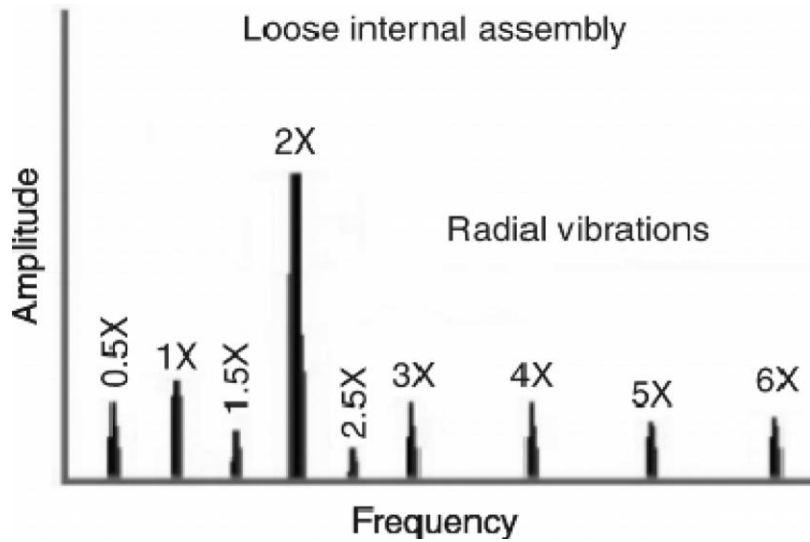
### 6.1 Χαλάρωση εσωτερικών εξαρτημάτων (*Internal assembly*)

Η χαλάρωση εσωτερικών εξαρτημάτων υφίσταται μεταξύ ρουλεμάν και φωλιάς, ή μεταξύ στροφείου και άξονα όπως φαίνεται στο σχ.1.15. Η φάση του συγκεκριμένου προβλήματος παρουσιάζει συνήθως αστάθεια και μεταβάλλεται από μέτρηση σε μέτρηση.



Σχήμα 1.15: Χαλάρωση εσωτερικών εξαρτημάτων

Οι κραδασμοί σε αυτήν την περίπτωση αλλάζουν ιδιαίτερα με κάθε μεταβολή της τιμής καταγραφής, ακόμη και για αλλαγές θέσης αισθητήρα κατά 30° περιφερειακά του ρουλεμάν σε οριζόντια ή κάθετη κατεύθυνση. Η μορφή του φάσματος στο συγκεκριμένο πρόβλημα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (σχ.1.16).

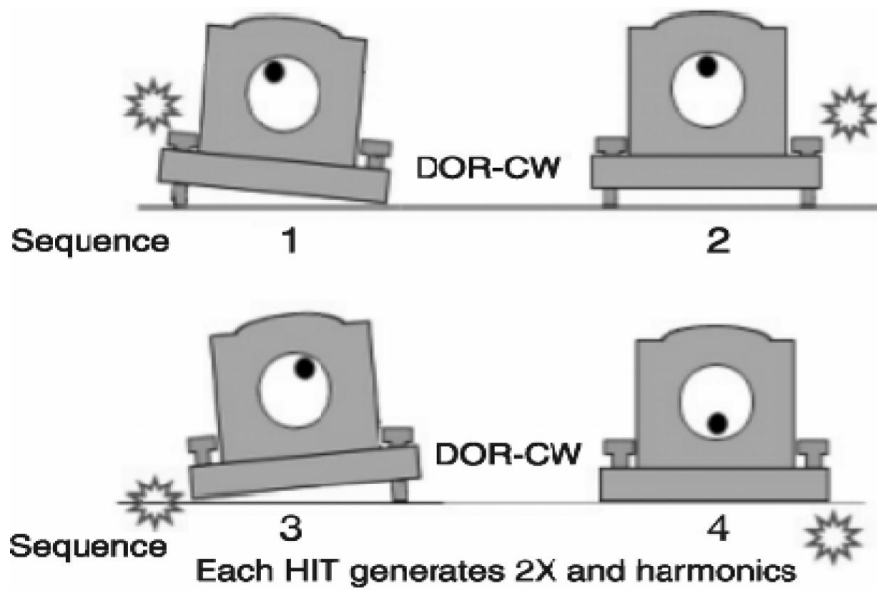


Σχήμα 1.16: Μορφή φάσματος με χαλάρωση εξαρτημάτων

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων)

## 6.2 Χαλάρωση στη βάση στήριξης

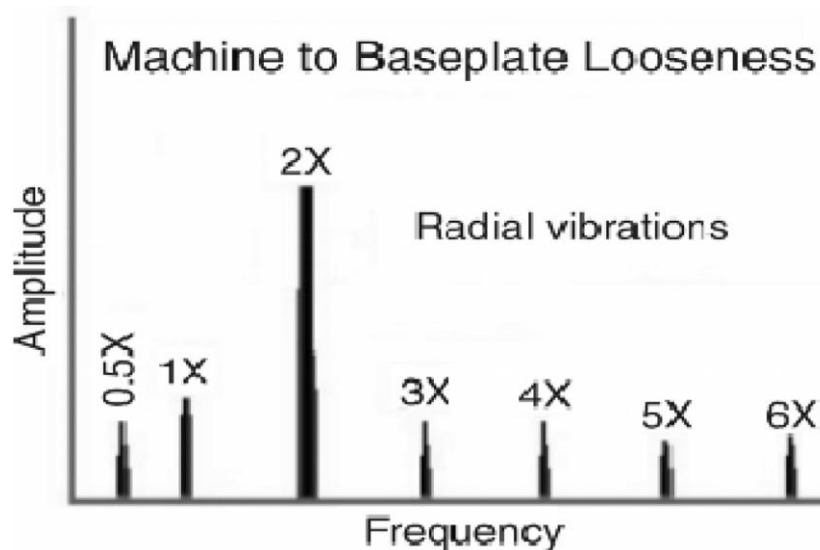
Στην περίπτωση αυτή οι υψηλές τιμές των κραδασμών οφείλονται σε χαλαρούς κοχλίες στήριξης (σχ.1.17) ή ρήγματα (cracks) στο πλαίσιο κατασκευής.



Σχήμα 1.17: Χαλαροί κοχλίες στήριξης

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων)

Σε αυτό το πρόβλημα το φάσμα έχει ψηλή τη 2<sup>η</sup> αρμονική του καμπύλη κατά τις ακτινικές μετρήσεις (σχ.1.18).

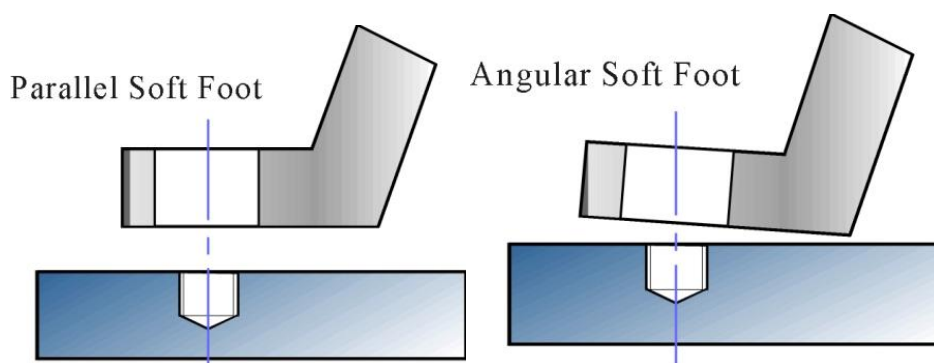


Σχήμα 1.18: Μορφή φάσματος με χαλαρούς κοχλίες στήριξης

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων)

### 6.3 Χαλάρωση κατασκευής (Soft foot)

Είναι η κατάσταση κατά την οποία ένα εκ των σημείων βάσεως δεν στηρίζεται ορθώς με αποτέλεσμα τα άκρα στήριξης του μηχανήματος ή η βάση του να παρουσιάζουν καταπονήσεις. Κατά τη σύσφιξη κοχλία βάσης οι κραδασμοί δύνανται να αυξηθούν.



Σχήμα 1.19: Παράλληλη χαλάρωση

Σχήμα 1.20: Γωνιακή χαλάρωση

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων*)

Η χαλάρωση κατασκευής μπορεί να οφείλεται στη διαφορά μήκους των σημείων στήριξης του μηχανήματος ή ακόμα, στη γωνία με την οποία στηρίζεται σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία στήριξης. Αυτή η ανομοιομορφία δύνανται να προκαλέσει εντονότερη καταπόνηση όταν ο κοχλίας σφίχτεί περαιτέρω. Έτσι, η φθορά και η εξασθένηση της ικανότητας στήριξης της βάσης, ή η κάμψη ενός εκ των άκρων στήριξης του μηχανήματος, δύνανται να προκαλέσουν το πρόβλημα.

Για να διερευνηθεί λοιπόν το πρόβλημα, πρέπει να χαλαρώνει ο εκάστοτε κοχλίας και ταυτόχρονα να πραγματοποιηθεί η μέτρηση των κραδασμών, διατηρώντας τους υπόλοιπους σφιχτούς. Εάν το πλάτος των κραδασμών στην 1<sup>η</sup> αρμονική καμπύλη μειωθεί αισθητά, τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αυτό να αποτελεί την αιτία του προβλήματος.

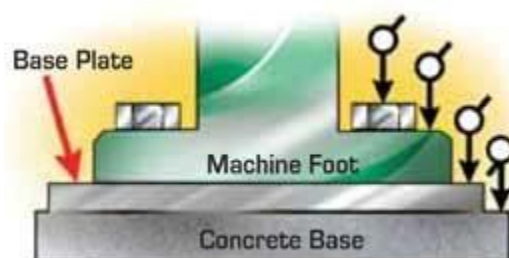
Ο παραπάνω τρόπος, δίνει μια αρκετά καλή εικόνα της αιτίας του προβλήματος, όμως απαιτούνται επιπρόσθετες ενέργειες.

Στην πραγματικότητα, ο εντοπισμός της χαλάρωσης κατασκευής είναι αρκετά δύσκολος. Συνήθως, εμφανίζεται με αυξημένη την 1<sup>η</sup> αρμονική καμπύλη σε όλες τις κατευθύνσεις, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις παρουσιάζεται με υψηλές την 2<sup>η</sup> και την 3<sup>η</sup>.

Συγκεκριμένα, εάν η 1<sup>η</sup> αρμονική καμπύλη κατά την οριζόντια μέτρηση, είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν της κάθετης μέτρησης τότε υφίσταται υποψία χαλάρωσης. Στην αντίθετη περίπτωση υπάρχει υποψία απουσίας ζυγοστάθμισης.

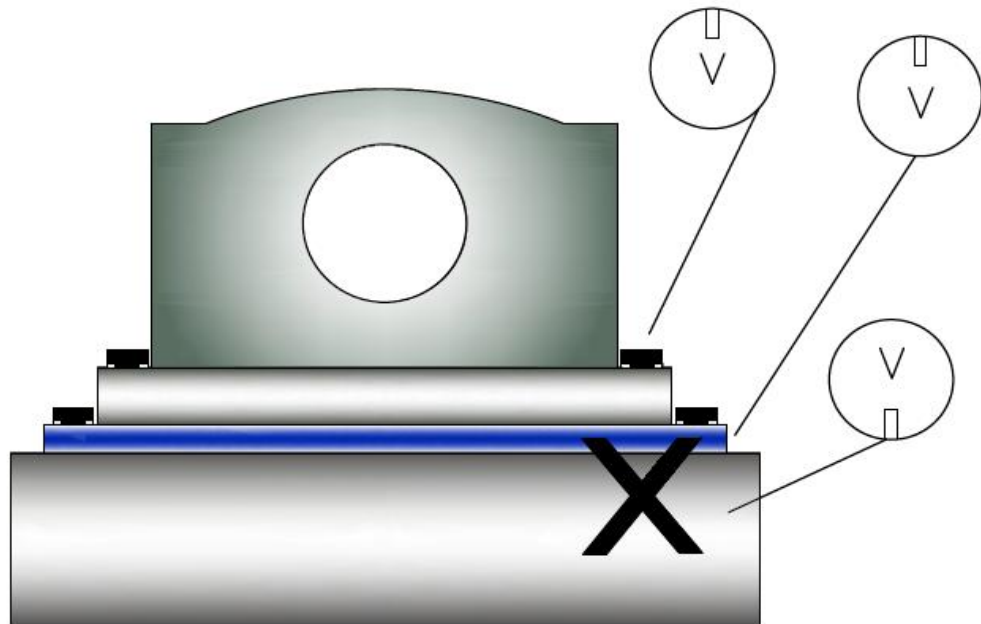
Χαλάρωση ή πρόβλημα στη βάση δύναται να προκληθεί εξαιτίας της καταπόνησης της, φθορά ή σπάσιμο του κοχλία στήριξης. Η ανάλυση της φάσης του συγκεκριμένου προβλήματος αποτελεί ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την επιβεβαίωση.

Στην περίπτωση προβλήματος παρατηρείται η διαφορά 90~180° σε κάθετη μέτρηση μεταξύ κοχλία βάσης και βάσης, ή δαπέδου στήριξης του μηχανήματος (σχ.1.21).



Σχήμα 1.21: Τρόπος μέτρησης κραδασμών

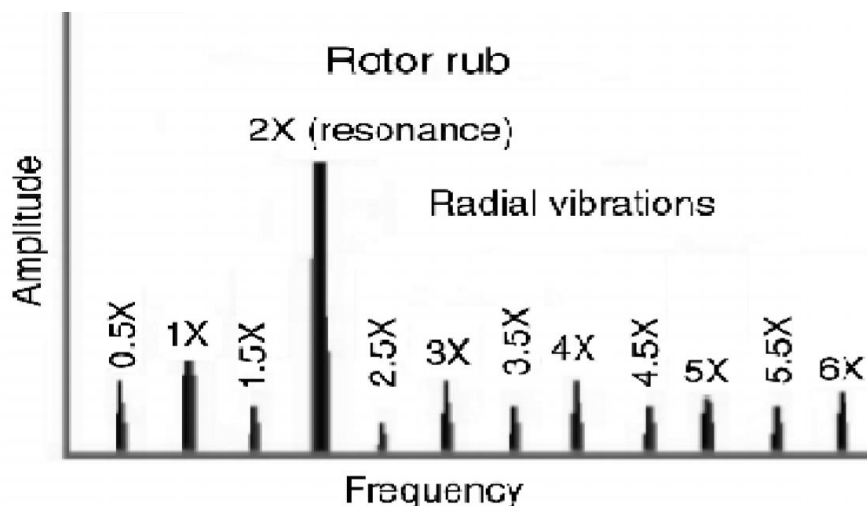
(Πηγή: Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων*)



Σχήμα 1.22: Διαφορά φάσης σε χαλαρή βάση

### 7) Τριβή στροφέα (*Rotor rubs*)

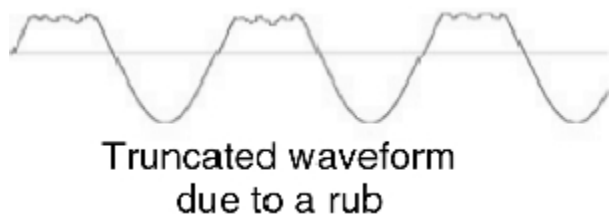
Ένα άλλο είδος προβλήματος είναι και η τριβή στροφέα. Κατά αυτή την περίπτωση, ο στροφέας έρχεται σε επαφή με το σταθερό τμήμα του μηχανήματος με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κραδασμοί στο μηχάνημα. Το φάσμα σε αυτήν την περίπτωση φαίνεται στο σχ.1.23.



Σχήμα 1.23: Μορφή φάσματος κατά την τριβή στροφέα

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων*)

Για να διαπιστώσουμε εάν πρόκειται για τριβή στο στροφέα τότε πρέπει να αξιοποιηθεί το διάγραμμα χρόνου, καθώς στο συγκεκριμένο πρόβλημα παρουσιάζει την παρακάτω μορφή.

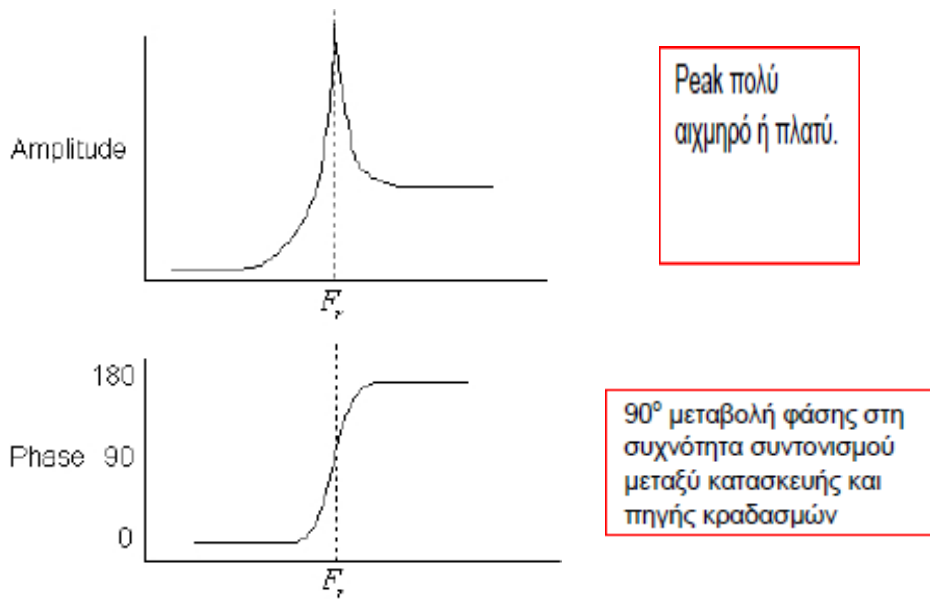


Σχήμα 1.24: Διάγραμμα χρόνου κατά την τριβή του στροφέα

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων*)

## 8) Συντονισμός (Resonance)

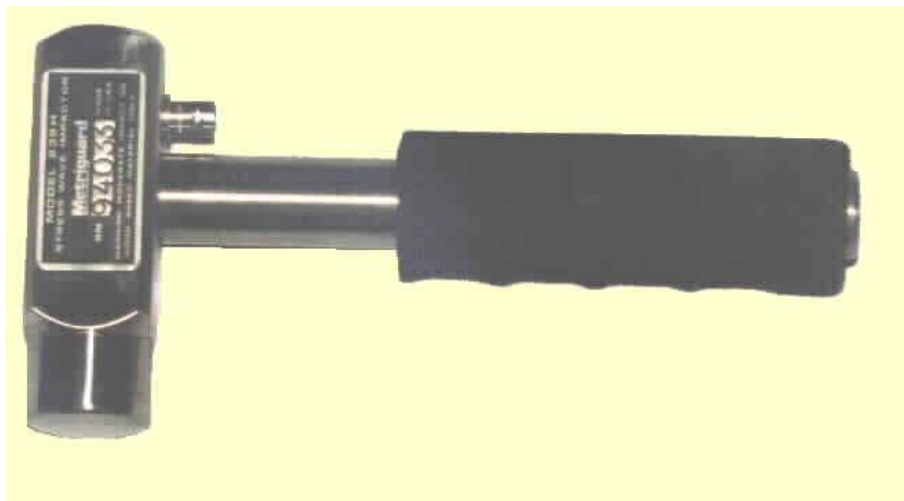
Κατά την ανάλυση φάσματος ενός μηχανήματος, το φαινόμενο του συντονισμού παρουσιάζεται ως ένα peak του οποίου η συχνότητα είναι σταθερή ακόμη και αν αυξηθούν οι στροφές του μηχανήματος. Αυτό το peak μπορεί να είναι πολύ αιχμηρό ή πιο πλατύ στη βάση, αναλόγως τη σταθερότητα της στήριξης του μηχανήματος. Στο σχ.1.25 απεικονίζεται το peak το οποίο οφείλεται σε συντονισμό.



Σχήμα 1.25

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων*)

Η ελεύθερη ταλάντωση στη φυσική συχνότητα ονομάζεται συντονισμός. Η απλούστερη μέθοδος για τον υπολογισμό της φυσικής συχνότητας ενός αντικείμενου ονομάζεται bump test. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ο αισθητήρας κραδασμών τοποθετείται επί του σώματος του συστήματος και με ένα ειδικό εργαλείο που ονομάζεται impact hammer χτυπάμε το σύστημα με σκοπό να καταγράψουμε το φάσμα.



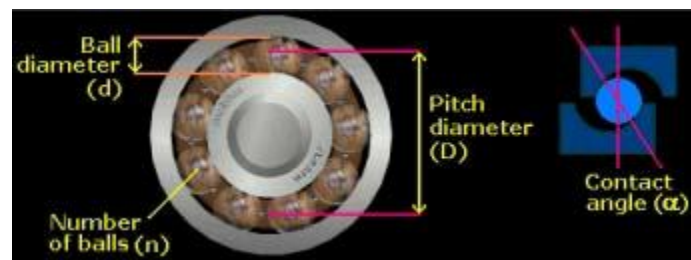
Εικόνα 1.26: Impact hammer

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων*)



## 9) Πρόβλημα ρουλεμάν (Rolling element bearings)

Κατά την ανάλυση φάσματος στην περίπτωση βλάβης ενός ρουλεμάν, παρουσιάζονται οι ονομαζόμενες ελαττωματικές συχνότητες. Κάθε ρουλεμάν παρουσιάζει τέσσερις ελαττωματικές συχνότητες. Ο υπολογισμός τους πραγματοποιείται με το τυπολόγιο του σχ.1.27 ή με τη χρήση *software bearing database*.



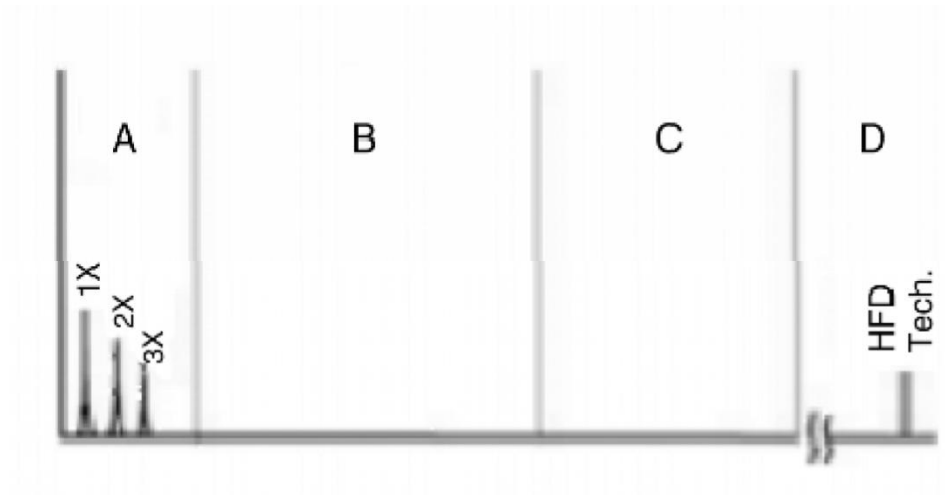
$$\begin{aligned} \text{Defect on inner race (BPI)} &= \frac{1}{2} n \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \\ \text{Defect on outer race (BPO)} &= \frac{1}{2} n \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \\ \text{Defect on cage (FT)} &= \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \\ \text{Defect on ball (BS)} &= \frac{1}{2} \frac{D}{d} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2 \cos^2 \alpha \right] \end{aligned}$$

Where:  $d$  = Ball diameter  
 $D$  = Pitch diameter  
 $n$  = Number of balls  
 $\alpha$  = Contact angle

Σχήμα 1.27: Τυπολόγιο για τον υπολογισμό των ελαττωματικών συχνοτήτων των ρουλεμάν

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (*vibration analysis*) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων)

Στην περίπτωση του προβλήματος ρουλεμάν, το φάσμα χωρίζεται σε τέσσερις ζώνες (Α,Β,С και D), όπου με αυτά παρακολουθούμε τη μεταβολή της κατάστασης των ρουλεμάν. Οι ζώνες αυτές απεικονίζονται στο σχ.1.28.

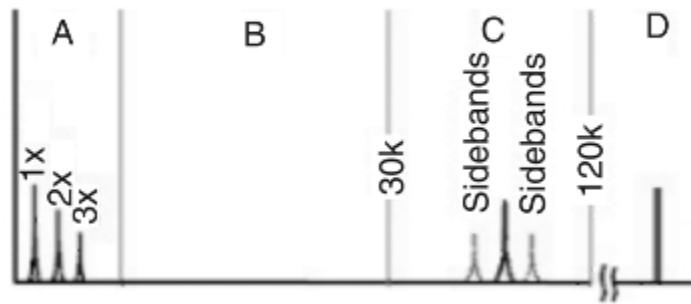


Σχήμα 1.28: Τέσσερις ζώνες φάσματος ρουλεμάν

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων*)

- Κατά την πρώτη φάση, η φθορά του ρουλεμάν παρουσιάζεται στην περιοχή εύρους 20~60 kHz. Αυτή η περιοχή είναι η D περιοχή.
- Κατά τη δεύτερη φάση, η φθορά επάνω στις επιφάνειες κύλισης (εσωτερικά και εξωτερικά) του ρουλεμάν, ξεκινάει να εμφανίζεται με τη μορφή μικρών εγκοπών. Οι σφαίρες του ρουλεμάν, καθώς περνούν επάνω από αυτές τις εγκοπές δημιουργούν αντήχηση στην περιοχή C.

Ανάλογα με τη σοβαρότητα του προβλήματος, είναι πιθανό να παρουσιάζονται και πλευρικές συχνότητες όπως φαίνεται και στο σχ.1.29. Σε αυτή την κατάσταση βρισκόμαστε στα τελευταία στάδια της 2<sup>ης</sup> φάσης.

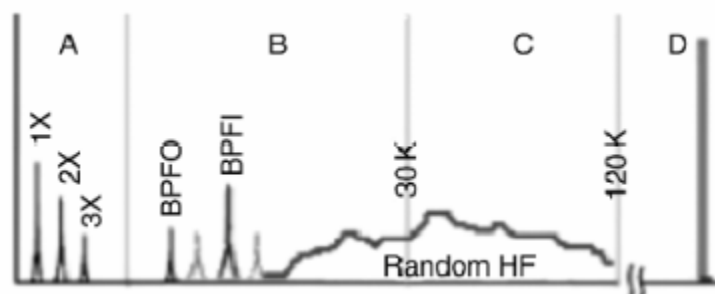


Σχήμα 1.29: 2<sup>η</sup> φάση προβλήματος σε ρουλεμάν

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων*)

Κατά την 3<sup>η</sup> φάση, οι μικρές εγκοπές που είχαν σχηματιστεί στα προηγούμενα στάδια έχουν πλέον μεγαλώσει και πιθανόν να έχουν αυξηθεί. Εάν εντοπιστούν πλευρικές συχνότητες σε αυτά τα στάδια, τότε το πρόβλημα βρίσκεται σίγουρα σε προχωρημένο στάδιο και συνήθως απαιτείται η αντικατάσταση του ρουλεμάν.

Κατά τη 4<sup>η</sup> φάση, οι εγκοπές έχουν αυξηθεί και επίσης έχουν ενωθεί μεταξύ τους δημιουργώντας αυλακώσεις εντός του ρουλεμάν. Σε αυτή την περίπτωση το ρουλεμάν απαιτεί άμεση αλλαγή. Στο στάδιο αυτό η θερμοκρασία του ρουλεμάν είναι ιδιαίτερα υψηλή και η λειτουργία του ιδιαίτερα θορυβώδεις. Η εικόνα του φάσματος απεικονίζεται στο παρακάτω σχ.1.30.



Σχήμα 1.30: 3<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> φάση ρουλεμάν

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων*)

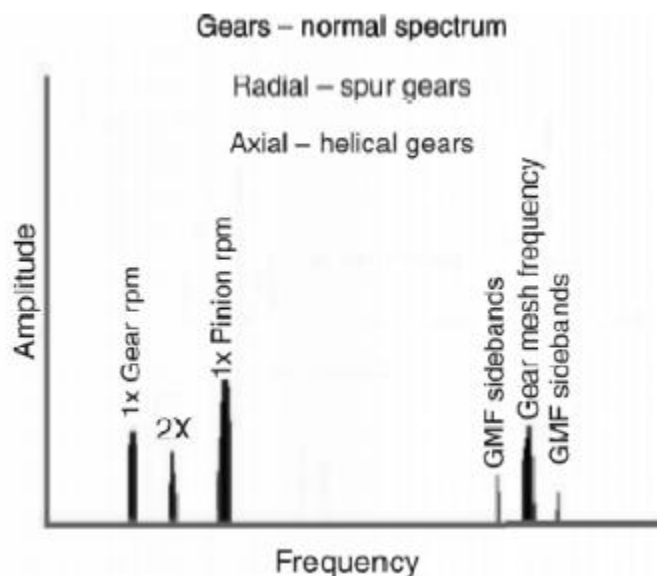
## 10) Ηλεκτρικά προβλήματα

Ο πλέον συνηθισμένος τρόπος για τον εντοπισμό των ηλεκτρικών προβλημάτων αλλά και το διαχωρισμό τους από τα μηχανολογικά, είναι η διακοπή ηλεκτρικής τροφοδότησης κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Εάν το πλάτος μειωθεί ακαριαία τότε το αίτιο ήταν ηλεκτρικό, ειδάλλως εάν υπάρξει βαθμιαία μείωση του τότε το πρόβλημα είναι μηχανικό.

## 11) Προβλήματα μειωτήρων

Σε αυτή την παράγραφο περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο διαπιστώνονται προβλήματα που οφείλονται είτε σε δόντια μειωτήρων, είτε σε πρόβλημα φορτίου, ευθυγράμμισης κτλ.

Γενικά η εικόνα του φάσματος ενός τέτοιου προβλήματος είναι η εξής.

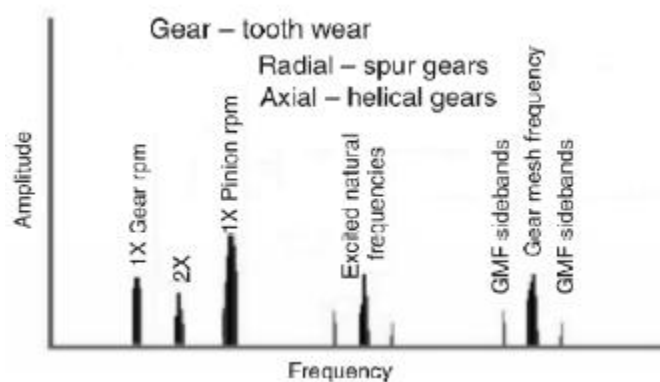


Σχήμα 1.31: Μορφή φάσματος σε πρόβλημα μειωτήρα

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων)

### 11.1 Φθορά οδόντος (*Gear tooth wear*)

Το βασικό χαρακτηριστικό της φθοράς οδόντος, είναι η παρουσία πλευρικών συχνοτήτων στη συχνότητα του μειωτήρα σε απόσταση ίση με την ταχύτητα περιστροφής του «πληγωμένου» γκραναζιού. Η εικόνα του φάσματος θα είναι η ακόλουθη.

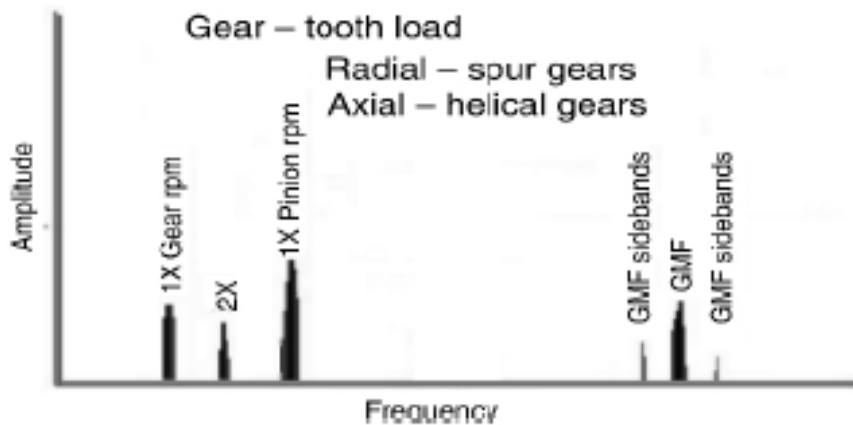


Σχήμα 1.32: Μορφή φάσματος σε φθορά οδόντος

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων*)

### 11.2 Αυξημένο φορτίο επί οδόντος (*Gear tooth load*)

Σε αυτή την περίπτωση προβλήματος η μορφή του φάσματος θα είναι η ακόλουθη.

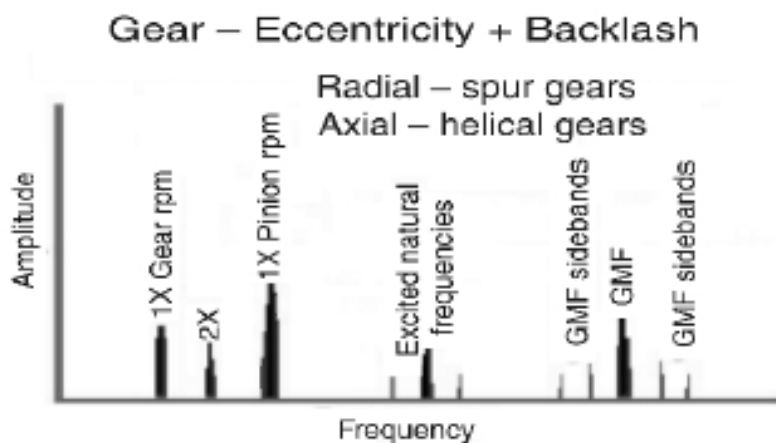


Σχήμα 1.33: Μορφή φάσματος σε αυξημένο φορτίο επί οδόντος

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων)

### 11.3 Πρόβλημα εκκεντρότητας σε γρανάζι (Gear eccentricity and backlash)

Η μορφή του φάσματος σε περίπτωση προβλήματος εκκεντρότητας στο γρανάζι θα είναι η εξής:

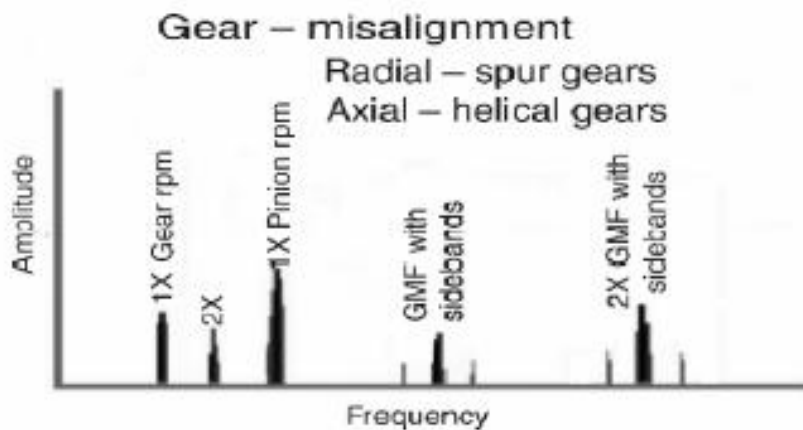


Σχήμα 1.34: Μορφή φάσματος σε πρόβλημα εκκεντρότητας γραναζιού

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων)

#### 11.4 Πρόβλημα ευθυγράμμισης (*Gear misalignment*)

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα η μορφή την οποία θα πάρει το φάσμα θα είναι η εξής:



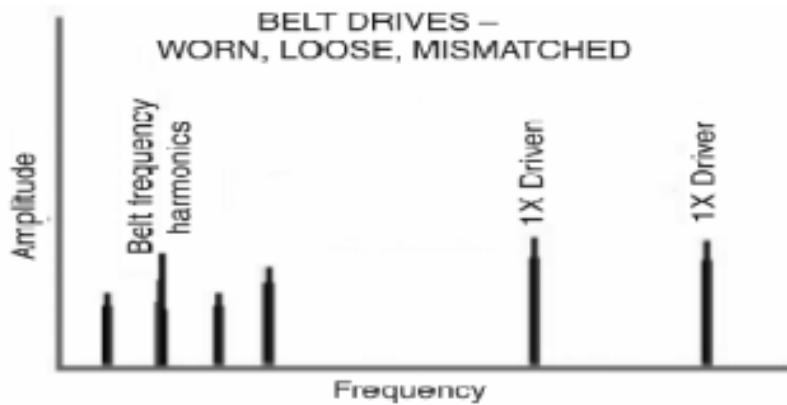
Σχήμα 1.35: Μορφή φάσματος σε πρόβλημα ευθυγράμμισης γραναζιού

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων*)

## 12) Προβλήματα ιμάντων (*Belt defects*)

### 12.1 Φθορά, χαλάρωση, ασυμβατότητα ιμάντων

Όταν υφίσταται ένα εξ' αυτών των προβλημάτων σε ένα μηχάνημα τότε η μορφή του φάσματος κατά την μέτρηση της ανάλυσης κραδασμών θα είναι η παρακάτω.

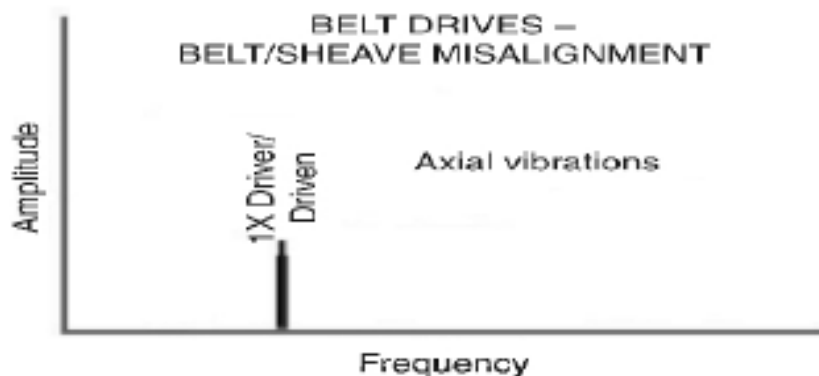


Σχήμα 1.36: Μορφή φάσματος κατά τη φθορά ή τη χαλάρωση ιμάντα

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων)

### 12.2 Μη ευθυγράμμιση (Belt misalignment)

Το φάσμα σε αυτήν την περίπτωση θα έχει την παρακάτω μορφή.



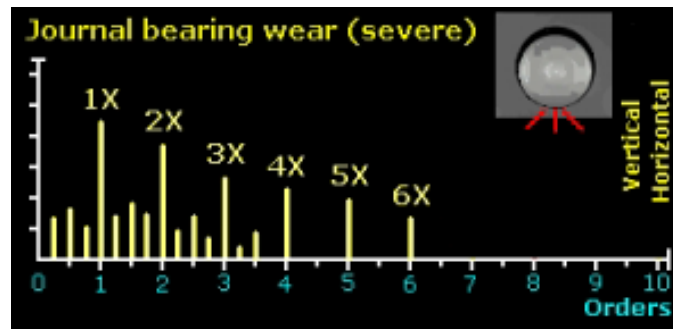
Σχήμα 1.37: Μορφή φάσματος κατά τη μη ευθυγράμμιση ιμάντα

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων)



### 13) Κραδασμοί σε κουζινέτα εδράσεως (Journal bearings vibrations)

Όταν υφίσταται πρόβλημα σε διάκενο στο κουζινέτο, τότε το φάσμα δείχνει όμοιο της περίπτωσης της χαλάρωσης περιστροφής. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι κραδασμοί στον κάθετο άξονα έχουν μεγαλύτερο πλάτος από αυτές στον οριζόντιο.



Σχήμα 1.38: Μορφή φάσματος σε πρόβλημα κουζινέτου εδράσεως

(Πηγή: Τρουλάκη Ν., Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων)

### 14) Στροβιλισμός ελαίου σε κουζινέτο (Oil whirl)

Στην Ελλάδα είναι γνωστό ως «το φαινόμενο του ανεμόμυλου» και αποτελεί τη διέγερση του λιπαντικού φιλμ. Κατά τη διάρκεια αυτού του φαινομένου η πίεση της «σφήνας» λαδιού είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για τη συγκράτηση του άξονα.

### 15) Παλινδρομικές μηχανές (Reciprocating machines)

Σε παλινδρομικές μηχανές, τα επίπεδα των κραδασμών είναι αρκετά υψηλά αφού υπάρχουν πολλά μέρη τα οποία παράγουν θόρυβο (εξαρτημένες αντλίες, βαλβίδες, έμβολα κλπ).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **Μέθοδος μέτρησης ταλαντώσεων με αναλυτή κραδασμών (vibration analyzer)**

Βασικοί στόχοι της μεθόδου ανάλυσης κραδασμών, είναι ο εντοπισμός μιας βλάβης σε πρόωρο στάδιο και η λήψη διορθωτικών μέτρων πριν την παρουσία προβλήματος και η βελτιστοποίηση της συντήρησης των μηχανημάτων, με αποτέλεσμα την αύξηση της αξιοπιστίας αυτών και τη βελτίωση της αποδοτικότητας της συντήρησης ( χρησιμοποιώντας το ελάχιστο των πόρων- χρήματα, ανθρώπινο δυναμικό, υλικά- να πετύχουμε το μέγιστο αποτέλεσμα, χωρίς να μειώνονται τα κριτήρια ασφαλείας του προσωπικού, της εγκατάστασης και του περιβάλλοντος).

Για τη διαγνωστική ανάλυση δεν είναι αρκετή μία απλή μέτρηση της δόνησης. Απαιτούνται συσκευές που εκτελούν πιο σύνθετες εργασίες και οι οποίες ονομάζονται αναλυτές δονήσεων. Μερικές στοιχειώδεις δυνατότητες που πρέπει να διαθέτει ένας αναλυτής είναι οι εξής:

- Η λήψη φάσματος συχνοτήτων.
- Ρυθμιζόμενο φίλτρο για την απομόνωση συγκεκριμένων συχνοτήτων μέσα από ένα σύνθετο δονητικό σήμα.
- Αναλογική ή ψηφιακή ένδειξη του συνολικού εύρους ή του εύρους μιας επιλεγμένης με το φίλτρο συχνότητας.
- Επιλογή μονάδας μέτρησης εύρους.

Η μέθοδος Vibration Analysis εφαρμόζεται για τον έλεγχο λειτουργικής κατάστασης περιστροφικών μηχανημάτων, όπως κινητήρες, μειωτήρες, αντλίες, ανεμιστήρες, άξονες, ηλεκτρογεννήτριες κ.α.

Για την εφαρμογή της δύναται να χρησιμοποιηθεί μόνιμα εγκατεστημένο σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας ή φορητός εξοπλισμός σε συνδυασμό με κατάλληλο λογισμικό επεξεργασίας των καταγραφών. Στην αγορά υπάρχει πληθώρα συστημάτων που συνοδεύονται με ειδικό λογισμικό τα οποία δύναται να εκτελέσουν το εν λόγω έργο. Οι διαφορές τους έγκειται κατά κύριο λόγο στο λογισμικό που διαθέτουν και στον επεξεργαστή που διαθέτουν ενσωματωμένο οι συσκευές. Η κύρια λειτουργία των συσκευών καταγραφής κραδασμών, είναι η επικοινωνία μέσω καλωδίου με ένα ή περισσότερα επιταχυνσιόμετρα τα οποία τοποθετούνται με συγκεκριμένο τρόπο σε σημείο επί του υπό μέτρηση μηχανήματος, λήψη του αναλογικού σήματος από αυτά, ολοκλήρωση αναλογικού σήματος για τη μετατροπή της καταγραφής από επιτάχυνση ( $\text{mm/sec}^2$ ) σε μέγεθος ταχύτητας ( $\text{mm/sec}$  ή  $\text{IPS}$ ) μετακίνησης του σημείου μέτρησης επί του μηχανήματος, ψηφιοποίηση αναλογικής καταγραφής, μετατροπή της καταγραφής

από time waveform σε φάσμα και αποθήκευση αυτών σε ενσωματωμένη κάρτα μνήμης για την επεξεργασία των καταγραφών σε υπολογιστή.

### **Μετατροπείς (αισθητήρια) δόνησης**

Για να λειτουργήσει ο αναλυτής, πρέπει στην είσοδο του να δεχθεί ένα σήμα ηλεκτρικής μορφής. Τη μετατροπή της δόνησης σε ένα ανάλογο ηλεκτρικό σήμα επιτελεί ένα όργανο το οποίο ονομάζεται αισθητήριο ή μετατροπέας δόνησης.

### **Μετατροπέας ταχύτητας**

Αυτός ο τύπος αισθητηρίου μετατρέπει κατ' ευθείαν την ταχύτητα της δόνησης σε ηλεκτρικό σήμα. Η λειτουργία του βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Ένας μαγνήτης στον πυρήνα ενός πηνίου μπορεί να κινείται κατά μήκος, στηριζόμενος μέσω ενός ελατηρίου στο σταθερό περίβλημα του οργάνου. Καθώς το περίβλημα κινείται ακολουθώντας την δόνηση του μετρούμενου σημείου, ο πυρήνας λόγω αδράνειας παραμένει σταθερός και κατ' αυτόν τον τρόπο ακολουθεί μια κίνηση σχετικά προς το πηνίο. Έτσι παράγεται τάση από επαγωγή στο πηνίο, ανάλογη της ταχύτητας κίνησης. Το χαρακτηριστικό μειονέκτημα αυτού του αισθητηρίου είναι η ευαισθησία του σε παρεμβολές από ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Για το λόγο αυτό, μετρήσεις οι οποίες γίνονται σε μεγάλους κινητήρες επαγωγής μπορούν να παρουσιάσουν πρόβλημα.

Ένας άλλος τύπος μετατροπέα ταχύτητας είναι ο πιεζοηλεκτρικός. Δεν διαθέτει κινούμενα μέρη και δεν χρησιμοποιεί μαγνητικό πεδίο. Για το λόγο αυτό είναι λιγότερο ευαίσθητος και δεν επηρεάζεται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ο πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας ταχύτητας έχει καλή ανταπόκριση στις πολύ χαμηλές συχνότητες μέχρι 1 Hz(60 CPM).

### Μετατροπέας επιτάχυνσης ή επιταχυνσιόμετρο

Επιταχυνσιόμετρο ονομάζεται ο μετατροπέας που παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της στιγμιαίας επιτάχυνσης της δόνησης. Ο τύπος αισθητήρα που χρησιμοποιείται σήμερα είναι πιεζοηλεκτρικός με ενσωματωμένο ενισχυτή σήματος. Στον πυρήνα του οργάνου είναι τοποθετημένη μια πιεζοηλεκτρική κρυσταλλική πλάκα ανάμεσα στο σώμα και σε μια αδρανειακή μάζα. Καθώς αυτή η μάζα ταλαντεύεται ακολουθώντας την κίνηση του σώματος και κατά συνέπεια του μετρούμενου σημείου, ασκεί μια δύναμη ανάλογη της επιτάχυνσης επάνω στον κρύσταλλο. Η ηλεκτρική τάση η οποία παράγεται από τον κρύσταλλο κατά αυτόν τον τρόπο είναι ανάλογη της αδρανειακής δύναμης και κατά συνέπεια της επιτάχυνσης του μετρούμενου σημείου. Επειδή η τάση αυτή είναι πολύ χαμηλή και για να είναι δυνατή η μεταφορά της μέσω καλωδίου χωρίς παρεμβολές, ενισχύεται από ενσωματωμένο στο όργανο ενισχυτή. Λόγω της άμεσης μέτρησης της επιτάχυνσης, αυτό το είδος μετατροπέα είναι πολύ ευαίσθητο στις υψηλές συχνότητες. Αυτή η διαδικασία κάνει τα επιταχυνσιόμετρα ιδιαίτερα χρήσιμα για ανάλυση δεδομένων από ρουλεμάν, γρανάζια κτλ.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των επιταχυνσιόμετρων είναι η ευρεία περιοχή συχνοτήτων στην οποία μπορεί να μετρά.

### Μετατροπέας Προσέγγισης (Non-contact or proximity transducer)

Πολλές φορές κρίνεται αναγκαίο να μετρηθεί και να αναλυθεί η πραγματική δόνηση του περιστρεφόμενου άξονα σε σχέση με το έδρανο. Είναι δυνατό έτσι, να διαπιστώσουμε την ύπαρξη μεγάλου διάκενου σε ένα ρουλεμάν ή μια δυσλειτουργία ενός εδράνου ολίσθησης. Σε βαριά μηχανήματα, η δόνηση ενός μικρού ρότορα δεν προκαλεί σοβαρή δόνηση στο σώμα και κατά συνέπεια είναι δύσκολη η διάγνωση ενός προβλήματος με μόνο τις μετρήσεις επάνω σε αυτό.

Ο μετατροπέας προσέγγισης, εδράζεται επάνω στο σώμα του εδράνου και μετρά τη στιγμιαία απόσταση ανάμεσα στο άκρο του και στην επιφάνεια του άξονα που περιστρέφεται. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα μετατροπέα μετακόμισης ο οποίος αντί της απόλυτης κίνησης του εδράνου, αντιλαμβάνεται τη σχετική κίνηση του άξονα ως προς το έδρανο.

(Πηγή: SKF, Manual of Microlog GX)

## Παράμετροι της δόνησης

### A) Συχνότητα

**Συχνότητα** είναι ο αριθμός των κύκλων στη μονάδα του χρόνου. Στην προβλεπτική συντήρηση προτιμάται η μονάδα CPM, κύκλοι ανά λεπτό, διότι αυτή συνδέεται άμεσα με τη συνήθη μονάδα περιστροφικής ταχύτητας RPM, στροφές ανά λεπτό. Η σχέση μεταξύ τους είναι:  $1 \text{ Hz} = 60 \text{ CPM}$ .

Η συχνότητα είναι μια χρήσιμη παράμετρος στη διάγνωση διότι μας πληροφορεί για την προέλευση της δόνησης και συνδράμει στον εντοπισμό του προβληματικού εξαρτήματος.

### B) Εύρος

Είναι η παράμετρος η οποία χαρακτηρίζει την ένταση της δόνησης. Το εύρος μπορεί να εκφρασθεί σαν μετατόπιση, οπότε αντιπροσωπεύει την απόσταση μεταξύ των δύο ακραίων θέσεων της κίνησης της ταλάντωσης και μετράται σε μονάδες μήκους, συνήθως mm.

Το εύρος ταλάντωσης μπορεί να μετρηθεί και σε μονάδες ταχύτητας. Κατά την κίνηση της ταλάντωσης, η ταχύτητα δεν παραμένει σταθερή αλλά μεταβάλλεται μέσα στον κύκλο μιας περιόδου. Η μέγιστη τιμή  $U$  της ταχύτητας είναι αυτή η οποία καταγράφεται σαν εύρος δόνησης. Η συνήθης μονάδα μέτρησης είναι το mm/sec και η μεταβλητή συμβολίζεται με το λατινικό  $p$ , από τη λέξη *peak*. Ακόμα, το εύρος μπορεί να μετρηθεί και σαν επιτάχυνση.

Η μετατόπιση, σαν παράμετρος εύρους, τονίζει τις χαμηλότερες συχνότητες, γι' αυτό προσφέρεται για την περιοχή από 60 CPM έως 600 CPM χωρίς να αποκλείεται η χρήση σε υψηλότερες συχνότητες. Η μετατόπιση προσδιορίζει μια κατ' ευθείαν εικόνα της κίνησης του μετρούμενου σημείου.

Η ταχύτητα καλύπτει μια ευρύτερη περιοχή συχνοτήτων αλλά τυπικά πλεονεκτεί στην περιοχή από 600 έως 60.000 CPM. Η ταχύτητα δόνησης συνδέεται άμεσα με την κόπωση του υλικού.

Τέλος, η επιτάχυνση προσφέρεται για συχνότητες άνω των 60.000 CPM.

(Πηγή: Αρχείο Α.Ε. Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ, *Προβλεπτική συντήρηση*)

## **Εντοπισμός σφαλμάτων με τη βοήθεια αναλυτή κραδασμών**

Στο παρόν κεφάλαιο, θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα (software) ανάλυσης ταλαντώσεων της εταιρίας SKF για τις μετρήσεις κραδασμών σε διάφορα μηχανήματα, κύρια και δευτερεύοντα. Οι παρακάτω μετρήσεις που θα αναλύσουμε θα αφορούν συγκεκριμένα τον ανεμιστήρα ενός εκ των σακόφιλτρων του Περιστροφικού Κλιβάνου 2. Ο συγκεκριμένος ανεμιστήρας χρησιμοποιείται για την αποκονίωση, δηλαδή την αναρρόφηση της σκόνης η οποία προέρχεται από τον κλίβανο, τη συγκράτησή της στα υφασμάτινα παντελόνια και την αποστολή της στο κύκλωμα. Το υλικό στη συνέχεια επιστρέφει στην παραγωγή για αποθήκευση ή κατευθύνεται απευθείας στον προθερμαντή του κλιβάνου για έψηση. Ο ανεμιστήρας αποτελείται από έναν ηλεκτροκινητήρα, έναν μηχανικό σύνδεσμο και δύο αμφιέριστες εδράσεις στον άξονα της φτερωτής. Οι εδράσεις αποτελούνται από διαιρούμενα κουζινέτα με βαρελοειδή ρουλεμάν στο εσωτερικό τους. Η πτερωτή του ανεμιστήρα είναι διαμέτρου 1.942 mm και αποτελείται από 10 πτερύγια. Ο κινητήρας αποτελείται από 2 ρουλεμάν εσωτερικά στη μεριά μηχανικού συνδέσμου και ένα ρουλεμάν στο πίσω άκρο του (ελεύθερο). Η λίπανση των ρουλεμάν τόσο του κινητήρα όσο και του ανεμιστήρα πραγματοποιείται με γράσο. Η συσκευή με την οποία πραγματοποιούνται μετρήσεις αναλύσεων κραδασμών απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



*Εικόνα 2.1: Συσκευή ανάλυσης κραδασμών*

Για να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες μετρήσεις στον ανεμιστήρα αλλά και ύστερα να απορροφηθούν αυτές οι μετρήσεις μέσω του ειδικού software και να δημιουργήσουν ένα φάσμα το οποίο θα μας καθοδηγήσει σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα, υπάρχουν ορισμένες ενέργειες οι οποίες πρέπει να γίνουν.

## **2.1 Δημιουργία σημείων μέτρησης του ανεμιστήρα (Route)**

Αρχικά, θα πρέπει να οριστούν στο εκάστοτε software οι περιοχές των συχνοτήτων οι οποίες θα μετρηθούν σε κάθε διεύθυνση, ούτως ώστε να ληφθούν όσο πιο αξιόπιστα αποτελέσματα γίνεται. Οι διευθύνσεις κατά τις οποίες πραγματοποιούνται οι μετρήσεις είναι τρείς:

- 1) Η οριζόντια διεύθυνση (H).
- 2) Η κάθετη διεύθυνση (V).
- 3) Η αξονική μέτρηση (A).

Ύστερα, ορίζονται τα στοιχεία της κάθε έδρασης (ρουλεμάν) και ο αριθμός στροφών του ανεμιστήρα. Το software παρέχει όλες τις συχνότητες για κάθε ρουλεμάν που ενδιαφέρει τον αναλυτή.

Κάθε ρουλεμάν απαρτίζεται από τέσσερα είδη συχνοτήτων. Αυτές είναι οι:

- BPF1 : Συχνότητα εσωτερικού δακτυλίου.
- BPF0 : Συχνότητα εξωτερικού δακτυλίου.
- BSF : Συχνότητα στοιχείων κύλισης.
- FTF : Συχνότητα κλωβού.

Για να είναι εφικτή η διάγνωση από το 1<sup>ο</sup> έως το τελευταίο στάδιο των σφαλμάτων των ρουλεμάν, έχουν επιμεριστεί οι μετρήσεις κάθε διεύθυνσης, σε υπομετρήσεις τις οποίες τις λαμβάνει η συσκευή αυτόματα και οι οποίες είναι σε διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων.

Π.χ. στην οριζόντια διεύθυνση θα πραγματοποιηθούν μετρήσεις με φίλτρο 300 CPM έως 6 kCPM αλλά και μέτρηση με φίλτρο από 300 kCPM έως 2,4 MCPM. Με αυτό τον τρόπο καλύπτουμε όλο το φάσμα των μετρήσεων.

Συγκεκριμένα, η συχνότητα περιστροφής του συγκεκριμένου ανεμιστήρα είναι  $920 \text{ RPM (CPM)} \div 60 = 15,33 \text{ Hz}$ .

## **2.2 Διαδικασία μετρήσεων στον ανεμιστήρα**

Αρχικά αφού κατευθυνθήκαμε στον ανεμιστήρα, καθαρίσαμε την επιφάνεια στην οποία θα τοποθετήσουμε το αισθητήριο του αναλυτή ταλαντώσεων για λάβουμε τις μετρήσεις.





*Εικόνα 2.2: Καθαρισμός σημείου επαφής κουζινέτου-αισθητηρίου*

Ύστερα ενεργοποιούμε τον αναλυτή κραδασμών και επιλέγουμε τον συγκεκριμένο ανεμιστήρα τον οποίο θα αναλύσουμε.



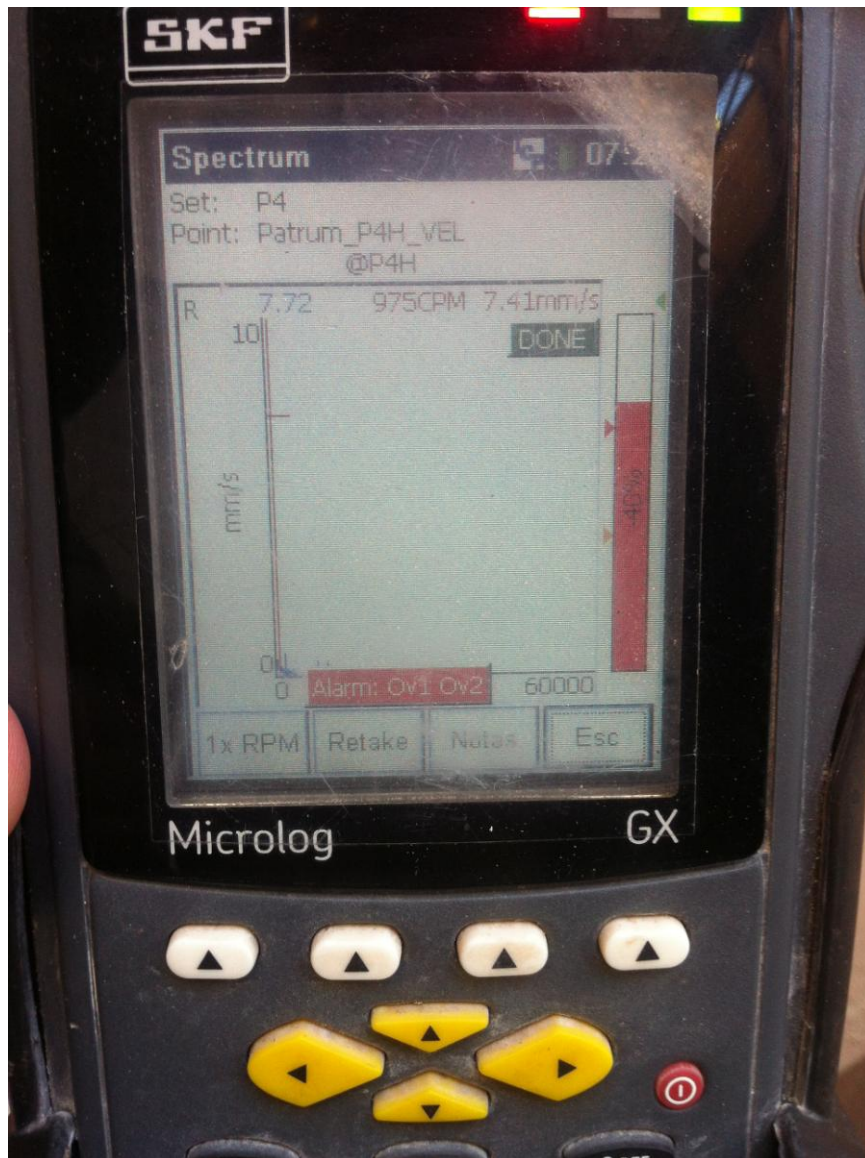
*Εικόνα 2.3: Επιλογή ανεμιστήρα στον αναλυτή κραδασμών*

Στη συνέχεια τοποθετούμε το αισθητήριο και πραγματοποιούμε την πρώτη μέτρηση, η οποία θα είναι η οριζόντια μέτρηση (H). Το σημείο μέτρησης στην οριζόντια διεύθυνση ορίζεται στο κάτω μέρος του εδράνου λόγω της στήριξης στο κάτω μέρος του μηχανήματος. Κατ' αυτή τη μέτρηση μετράται η ταχύτητα (mm/sec) η οποία απεικονίζει μια γενική εικόνα για το αν υφίσταται βλάβη στο μηχάνημα. Αφού πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη μέτρηση, προχωράμε στις επόμενες μετρήσεις.



*Εικόνα 2.4: Τοποθέτηση αισθητηρίου*

Καθώς η μετρητική συσκευή ολοκληρώνει την κάθε μέτρηση, απεικονίζει στην οθόνη της ένα διάγραμμα.



*Εικόνα 2.5: Απεικόνιση διαγράμματος οριζόντιας μέτρησης*

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα διακρίνεται η 1<sup>η</sup> αρμονική της συχνότητας περιστροφής του ανεμιστήρα, δηλαδή το 1X RPM (CPM).

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η μέτρηση κατά την αξονική διεύθυνση.



*Εικόνα 2.6: Μέτρηση κατά την αξονική διεύθυνση*

Τέλος ακολουθεί η μέτρηση κατά την κάθετη διεύθυνση και η συσκευή αποθηκεύει αυτόματα τις συγκεκριμένες μετρήσεις ούτως ώστε να τις απεικονίσουμε στο software και να διαπιστώσουμε την επικείμενη βλάβη.

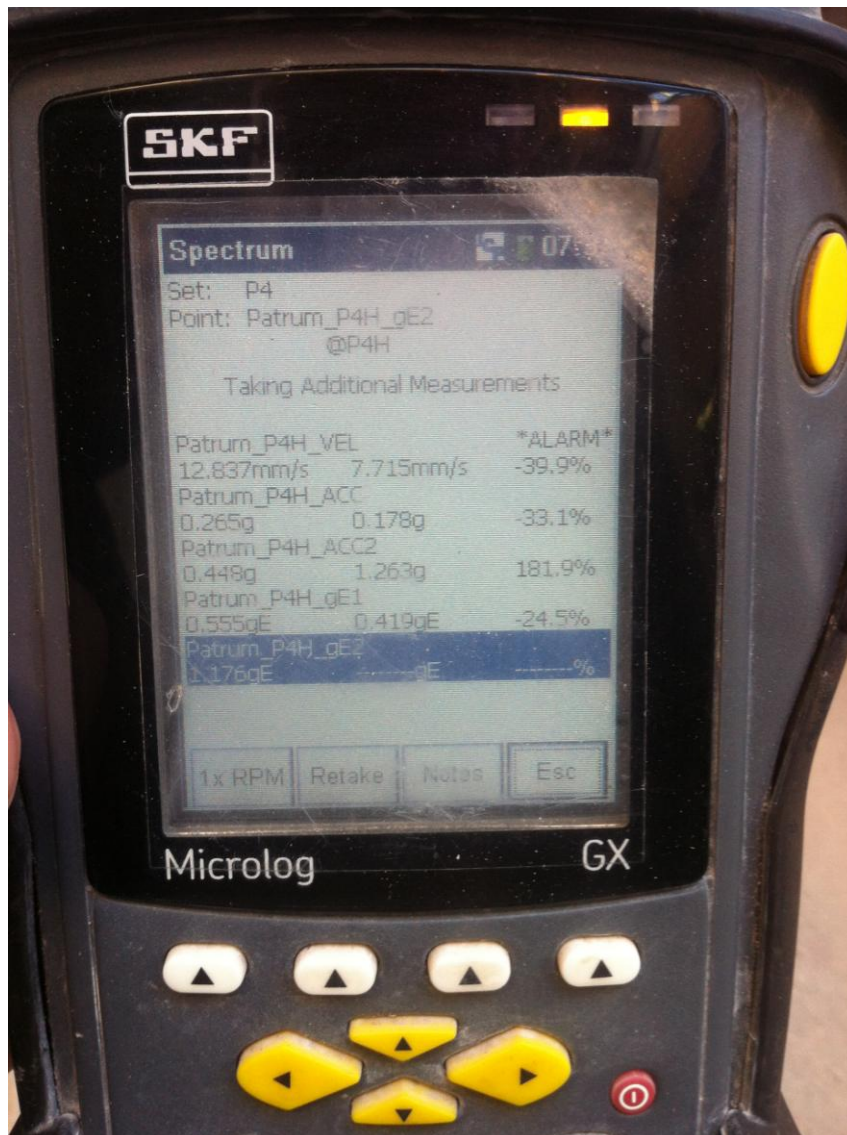


*Εικόνα 2.7: Μέτρηση κατά την κάθετη διεύθυνση*

Η μετρητική συσκευή, κατά την διάρκεια των μετρήσεων, παρέχει τη δυνατότητα της παράλληλης απεικόνισης των προηγούμενων μετρήσεων. Αυτό συμβάλει στη σύγκριση των μετρήσεων. Το ιστορικό των μετρήσεων είναι ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα για την εκτίμηση μιας βλάβης.

Ακόμα η συσκευή έχει τη δυνατότητα να αναγνωρίζει κατά ένα μεγάλο ποσοστό την περιοχή των δονήσεων οι οποίες είναι αποδεκτές και τις απεικονίζει με πράσινο χρώμα, εκείνες τις οποίες είναι προχωρημένες και τις απεικονίζει με πορτοκαλί χρώμα και εκείνες τις οποίες είναι στην επικίνδυνη ζώνη και τις απεικονίζει με κόκκινο χρώμα.

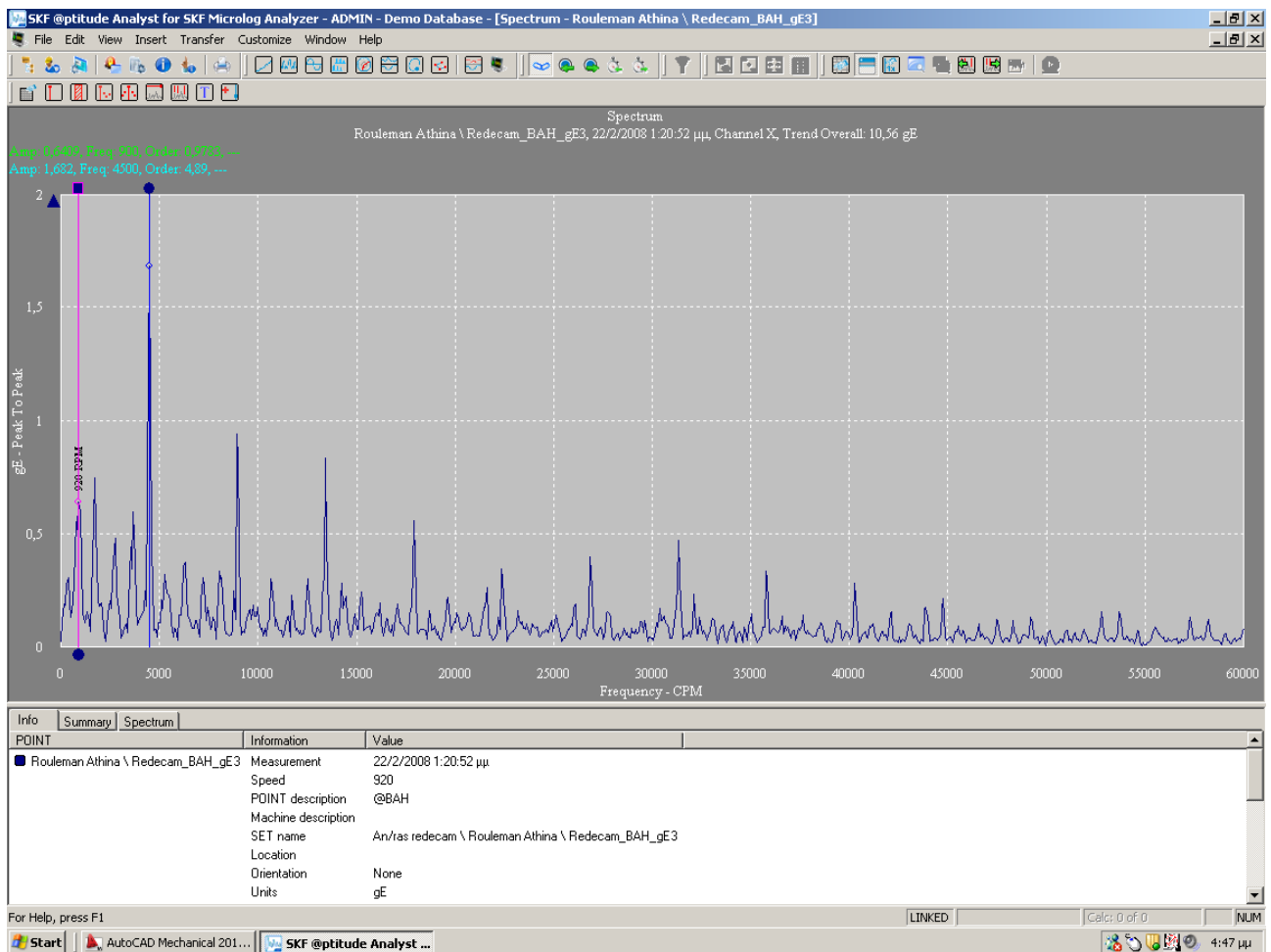
Οι μετρήσεις στις οποίες δίνεται έμφαση, όπως είναι κατανοητό, είναι αυτές που βρίσκονται στην επικίνδυνη ζώνη.



*Εικόνα 2.8: Απεικόνιση ιστορικού μετρήσεων*

### **2.3 Διαδικασία απεικόνισης μετρήσεων στο software**

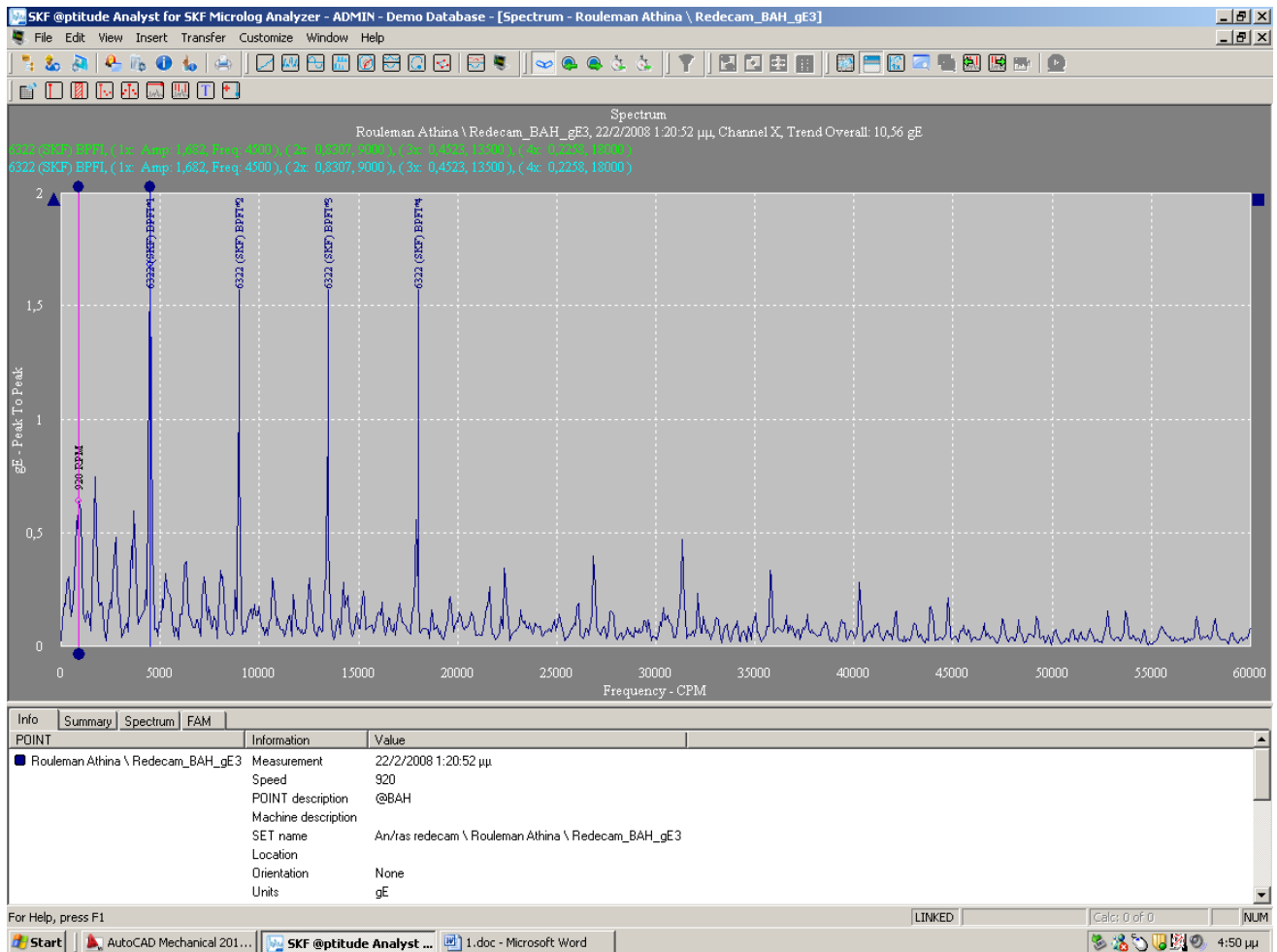
Εφόσον πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις στον ανεμιστήρα, στη συνέχεια τις «περνάμε» στο ειδικό software το οποίο συνδέεται με τη μετρητική συσκευή. Συγκεκριμένα, οι συγκεκριμένες μετρήσεις στον ανεμιστήρα απεικόνισαν το παρακάτω φάσμα.



Εικόνα 2.9: Απεικόνιση φάσματος στο software

Παρατηρώντας το φάσμα, κατανοούμε πως υπάρχουν κάποια peaks σε διάφορες συχνότητες τα οποία ξεχωρίζουν κατά πολύ από το υπόλοιπο φάσμα των συχνοτήτων. Για να μπορέσουμε να αναγνωρίσουμε που οφείλονται αυτές οι υψηλές τιμές, ζητάμε από το πρόγραμμα να μας εμφανίσει τις συχνότητες των ρουλεμάν τις οποίες είχαμε προηγουμένως προκαθορίσει στο software. Έτσι θα προκύψει ένα φάσμα με τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε και το οποίο απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.





*Εικόνα 2.10: Απεικόνιση φάσματος μετά την προσθήκη των προκαθορισμένων συχνοτήτων*

Στο συγκεκριμένο φάσμα, παρατηρούμε πως η συχνότητα του ρουλεμάν για τον εσωτερικό δακτύλιο (BPFI) συμπίπτει με τα peaks του φάσματος της προηγούμενης εικόνας. Όπως φαίνεται συμπίπτουν και οι τέσσερις αρμονικές του BPFI. Αυτό μας δείχνει με βεβαιότητα ότι υπάρχει σφάλμα στον εσωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν.

Η σοβαρότητα του προβλήματος και η αμεσότητα στην αντικατάστασή του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα εξής:

- Την αρχική μέτρηση των δονήσεων όταν το ρουλεμάν είναι καινούργιο.
- Το ιστορικό των μετρήσεων.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως το κάθε μηχάνημα, ανάλογα τη θέση και το μέγεθός του, λειτουργεί είτε σε υψηλότερες είτε σε χαμηλότερες συχνότητες από κάποιο άλλο. Έτσι απαιτείται μεγάλη εμπειρία για να διαπιστωθεί εάν το συγκεκριμένο εξάρτημα χρήζει άμεσης αλλαγής.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **Μέτρηση και διόρθωση αζυγοσταθμίας πτερωτής ανεμιστήρα με τη βοήθεια του αναλυτή ταλαντώσεων**

Ένα από τα πολλά είδη σφαλμάτων τα οποία δύνανται να δημιουργήσουν κραδασμούς σε ένα μηχάνημα είναι και η αζυγοσταθμία.

Ως ζυγοστάθμιση ορίζεται η διαδικασία ελέγχου και επίτευξης της συμμετρικής κατανομής του βάρους ενός περιστρεφόμενου συστήματος. Στην περίπτωση κατά την οποία υφίσταται μη συμμετρική κατανομή του βάρους, δημιουργούνται κραδασμοί προκαλώντας βλάβες στα υπόλοιπα εξαρτήματα του εκάστοτε μηχανήματος.

Στο παρόν κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί ζυγοστάθμιση σε πτερωτή ακτινικού ανεμιστήρα ο οποίος δημιουργεί ροή σε αγωγό και βοηθά στην απομάκρυνση των καυσαερίων του κινητήρα ο οποίος περιστρέφει το μύλο χώματος. Η πτερωτή απαρτίζεται από 12 πτερύγια και οι στροφές με τις οποίες περιστρέφεται είναι 1.490 RPM.

Η διαδικασία της ζυγοστάθμισης διαφέρει από αυτή της ανάλυσης των κραδασμών.

Αρχικά, η λειτουργία του ανεμιστήρα θα πρέπει να διακοπεί αρκετές φορές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Για να πραγματοποιηθούν αυτές οι διακοπές θα πρέπει ο εκάστοτε μηχανικός που θα αναλάβει τη ζυγοστάθμιση, να έχει άμεση και συνεχή επικοινωνία με το πάνελ ούτως ώστε να διακόπτεται η λειτουργία του ανεμιστήρα και να παρέχεται η απαραίτητη ασφάλεια.

#### **3.1 Δημιουργία αρχικών ρυθμίσεων στη συσκευή**

Για να πραγματοποιηθεί η ζυγοστάθμιση θα πρέπει να γίνουν ορισμένες ρυθμίσεις στη μετρητική συσκευή ακολουθώντας ορισμένα βήματα. Αυτά τα βήματα θα περιγραφούν παρακάτω.

**Βήμα 1<sup>ο</sup>**: Αφού διακοπεί η λειτουργία του ανεμιστήρα τότε αριθμούμε τα πτερύγια της πτερωτής με ένα ανεξίτηλο μαρκαδόρο ούτως ώστε να είμαστε σε θέση μετά, με τη βοήθεια της συσκευής μέτρησης, να γνωρίζουμε σε ποια θέση θα προσθέσουμε το αντίβαρο για την ζυγοστάθμιση. Επίσης σημαντικό είναι να δημιουργήσουμε μια οριζόντια γραμμή επάνω στον άξονα για να μπορέσει το αισθητήριο να «διαβάσει» τις στροφές του.



Εικόνα 3.1: Αρίθμηση πτερυγίων περωτής

**Βήμα 2<sup>ο</sup>:** Αφού αριθμήσουμε τα πτερύγια, στη συνέχεια συνδέουμε τη συσκευή με το ειδικό αισθητήριο (ταχύμετρο) και ορίζουμε το σημείο μέτρησης επάνω στον άξονα.

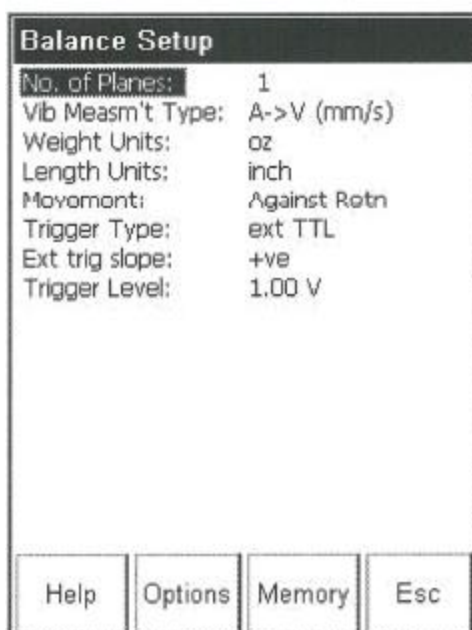
**Βήμα 3<sup>ο</sup>:** Στη συσκευή, στο κύριο μενού, διαλέγουμε την επιλογή *Balancing* για να εμφανιστεί το *balance setup*, το μενού δηλαδή, στο οποίο θα κάνουμε τις απαραίτητες ρυθμίσεις για τη ζυγοστάθμιση.

**Βήμα 4<sup>ο</sup>:** Στο *balance setup* και στην επιλογή *No. Of planes*, επιλέγουμε τον αριθμό των επιπέδων μέτρησης. Θα πληκτρολογήσουμε τον αριθμό 1 καθώς ο αισθητήρας της συσκευής θα μετρήσει σε ένα σημείο.

**Βήμα 5<sup>ο</sup>:** Στη συνέχεια καθορίζουμε τη μονάδα μέτρησης της ταχύτητας. Αυτή εξαρτάται από τον τύπο του αισθητηρίου που χρησιμοποιούμε. Συνήθως η μονάδα η οποία χρησιμοποιείται είναι mm/sec.

**Βήμα 6<sup>ο</sup>:** Ύστερα επιλέγουμε τη μονάδα βάρους την οποία επιθυμούμε. Η επιλογή είναι ανάμεσα σε g,kg,oz, και lb.

**Βήμα 7<sup>ο</sup>:** Ως τελευταία επιλογή στο *balance setup* είναι η υιοθέτηση φοράς περιστροφής είτε αυτή είναι *with rotation* δηλαδή κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού είτε αντιθέτως αυτή είναι *against rotation*.



Εικόνα 3.2: Απεικόνιση οθόνης κατά το *balance setup*

(Πηγή: SKF, Manual of Microlog GX)

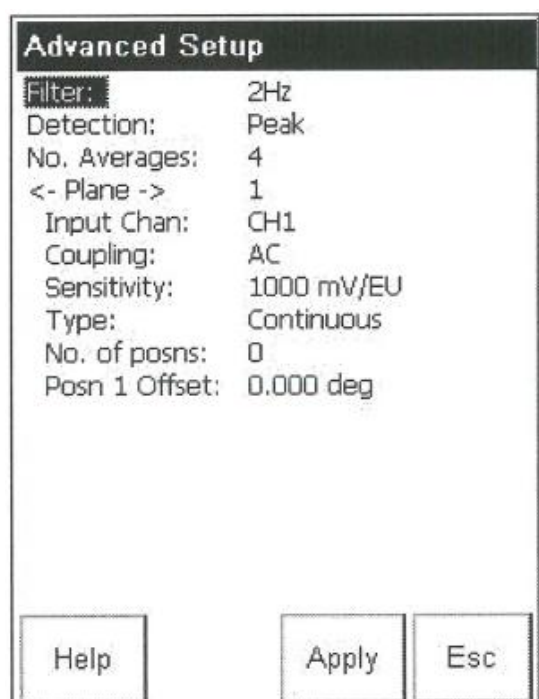
**Βήμα 8<sup>ο</sup>:** Όταν ολοκληρώσουμε τη διαδικασία των αρχικών ρυθμίσεων, τότε διαλέγουμε την επιλογή *options* ούτως ώστε να εμφανιστεί το μενού των προχωρημένων ρυθμίσεων (*advanced setup*).

**Βήμα 9<sup>ο</sup>:** Αρχικά επιλέγουμε το φίλτρο συχνοτήτων το οποίο επιθυμούμε. Ο κατασκευαστής της μετρητικής συσκευής προτείνει ως το πιο αξιόπιστο φίλτρο για τις μετρήσεις, τα 2 Hz.

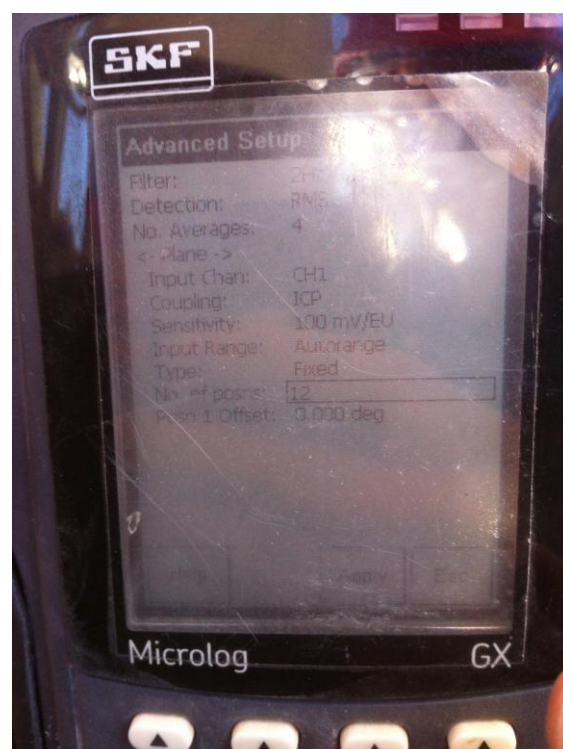
**Βήμα 10<sup>ο</sup>:** Επιλέγουμε τη θύρα την οποία θα χρησιμοποιήσουμε για τις μετρήσεις (CH1). Στην περίπτωση κατά την οποία θα χρειαζόταν να μετρηθούν δύο σημεία του άξονα ταυτόχρονα, υπάρχει και η επιλογή CH2.

**Βήμα 11<sup>ο</sup>:** Ύστερα επιλέγουμε την ευαισθησία την οποία επιθυμούμε να έχει το αισθητήριο. Η προτεινόμενη ρύθμιση είναι 100mV/EU. Η μονάδα μέτρησης είναι 1 miliVolt ανά 1 Engineer Unit. Η συγκεκριμένη μονάδα χρησιμοποιείται για τα περισσότερα αισθητήρια.

**Βήμα 12<sup>ο</sup>:** Τέλος, καθορίζουμε τον αριθμό των πτερυγίων τον οποίο αριθμήσαμε προηγουμένως. Στην προκειμένη περίπτωση τα πτερύγια είναι 12.



Εικόνα 3.3



Εικόνα 3.4

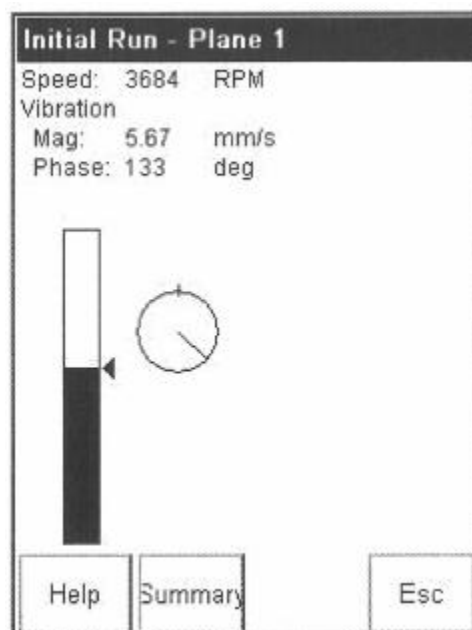
Απεικόνιση των προχωρημένων ρυθμίσεων στη συσκευή

(Πηγή: SKF, Manual of Microlog GX)

### 3.2 Διαδικασία ζυγοστάθμισης της πτερωτής

Μετά το πέρας των ρυθμίσεων ακολουθεί η διαδικασία της ζυγοστάθμισης, η οποία περιγράφεται από τα παρακάτω βήματα.

**Βήμα 1<sup>ο</sup>:** Αρχικά θα πραγματοποιηθεί μια αρχική μέτρηση ή μέτρηση αναφοράς (*Initial run*) σε κανονική λειτουργία του ανεμιστήρα. Έτσι η συσκευή θα σχηματίσει μια πρώτη εικόνα για την κατάσταση του ανεμιστήρα. Κατά το πέρας αυτής της μέτρησης εμφανίζεται η παρακάτω εικόνα στη συσκευή.



Εικόνα 3.5: Απεικόνιση αποτελεσμάτων της μέτρησης αναφοράς

(Πηγή: SKF, Manual of Microlog GX)

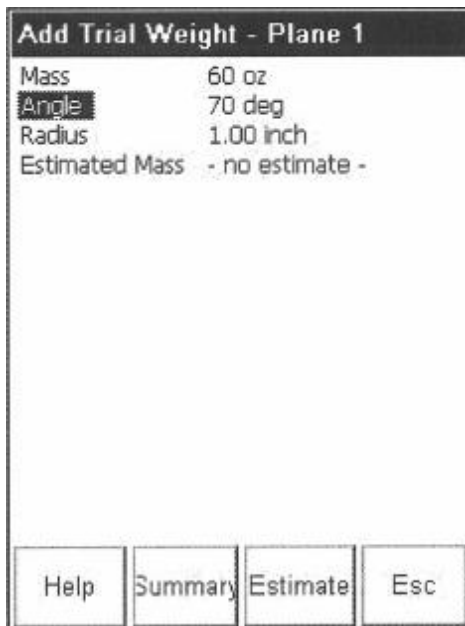


*Εικόνα 3.6: Τοποθέτηση αισθητηρίου για την μέτρηση*

**Βήμα 2<sup>ο</sup>**: Η επόμενη ενέργεια η οποία πρέπει να γίνει είναι η τοποθέτηση δοκιμαστικού αντίβαρου σε ένα τυχαίο πτερύγιο. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται σταματώντας τον ανεμιστήρα.

Η συγκόλληση του αντίβαρου γίνεται με ηλεκτροσυγκόλληση.

**Βήμα 3<sup>ο</sup>**: Στη συνέχεια ορίζουμε το βάρος του αντίβαρου, τη γωνία και την ακτίνα του σημείου συγκόλλησής του στο όργανο.



Εικόνα 3.7: Ορισμός μάζας, γωνίας και ακτίνας του σημείου συγκόλλησης του αντίβαρου

(Πηγή: SKF, Manual of Microlog GX)

**Βήμα 4<sup>ο</sup>:** Ύστερα πραγματοποιείται η πρώτη δοκιμαστική μέτρηση με τον ανεμιστήρα να βρίσκεται σε κανονική λειτουργία. Η παρακάτω εικόνα δείχνει το αποτέλεσμα αυτής της μέτρησης.



Εικόνα 3.8: Απεικόνιση αποτελεσμάτων 1<sup>ης</sup> δοκιμαστικής μέτρησης

(Πηγή: SKF, Manual of Microlog GX)



Η μετρητική συσκευή, μετά από κάθε μέτρηση υπολογίζει το μέγεθος των κραδασμών (*vibration magnitude*) και τις μοίρες στις οποίες τοποθετήθηκε το αντίβαρο. Για να επιτύχουμε μια αξιόλογη μέτρηση και η συσκευή να προτείνει μια αξιόλογη επόμενη κίνηση, θα πρέπει με την επιλογή μάζας και μοιρών του αντίβαρου να επηρεάσουμε αυτές τις δύο μεταβλητές κατά 30% και άνω.

**Βήμα 5<sup>ο</sup>:** Η επόμενη μέτρηση είναι αυτή της διόρθωσης του αντίβαρου και της προσαρμογής του μόνιμου αντίβαρου στην πτερωτή. Αυτή η μέτρηση πραγματοποιείται σε κανονική λειτουργία του ανεμιστήρα. Το μετρητικό όργανο κατ' αυτή την μέτρηση, θα μας εμφανίσει τα δεδομένα τα οποία απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα.

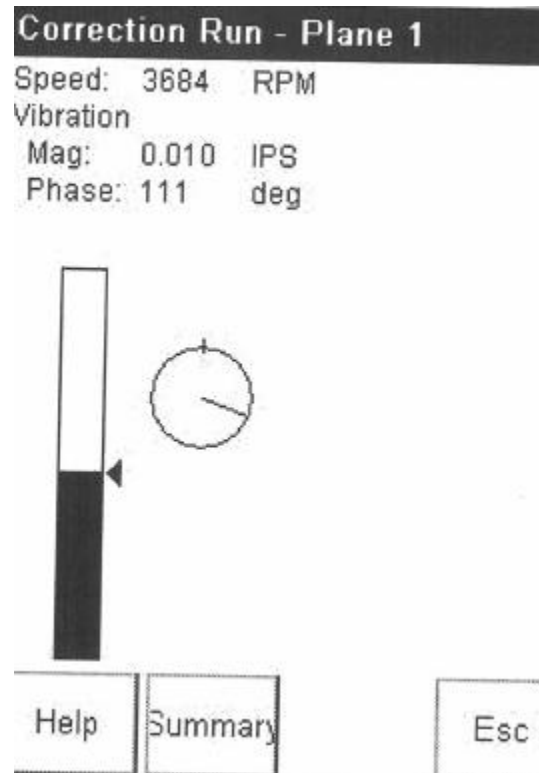
Correction Weight - Solution			
Plane	1 of 1		
Split Mass?	No		
Weight	Add		
Radius (1)	1.00 inch		
Last Run Speed	3684 RPM		
<hr/>			
Mass	63.8	oz	
Angle	219	deg	
Radius	1.00	inch	
<hr/>			
Help	Summary	Memory	Esc

Εικόνα 3.9: Απεικόνιση δεδομένων κατά την διορθωτική μέτρηση

(Πηγή: SKF, Manual of Microlog GX)

Το όργανο, αφού πραγματοποιήσει τη συγκεκριμένη μέτρηση, εμφανίζει την τιμή της μάζας, την τιμή της γωνίας και την τιμή της ακτίνας κατά την οποία πρέπει να τοποθετηθεί το αντίβαρο στην πτερωτή. Συνίσταται, για την πλέον αποτελεσματική κατάληξη της ζυγοστάθμισης, οι συγκεκριμένες τιμές να είναι ιδιαίτερα ακριβείς κατά την τοποθέτηση του αντίβαρου.

**Βήμα 6<sup>ο</sup>:** Κατά την τελευταία μέτρηση, το μετρητικό όργανο υπολογίζει ξανά το μέγεθος των κραδασμών ούτως ώστε να διαπιστώσουμε εάν η ζυγοστάθμιση ήταν αποτελεσματική. Η ένδειξη του οργάνου μετέπτεται αυτής της μέτρησης απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.10: Απεικόνιση οργάνου κατά την τελευταία μέτρηση

(Πηγή: SKF, Manual of Microlog GX)

Εάν η τιμή των κραδασμών παραμένει σε υψηλά επίπεδα, τότε επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία της ζυγοστάθμισης.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, γίνεται η ζυγοστάθμιση σε διάφορα περιστρεφόμενα μηχανήματα για την αποφυγή των ανεπιθύμητων κραδασμών.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Ανίχνευση σφαλμάτων με υπέρηχους

Μία άλλη μέθοδος ανίχνευσης σφαλμάτων σε μηχανήματα είναι η μέθοδος των υπέρηχων.

#### 4.1 Βασικές αρχές των υπέρηχων

Ως υπέρηχοι, ορίζονται τα κύματα τα οποία μεταφέρουν ενέργεια στο χώρο. Ένα κύμα είναι μια μεταβολή σε κάποιες ποσότητες, γνωστές σαν κυματικές μεταβλητές, η οποία διαδίδεται στο χώρο μια μία χαρακτηριστική ταχύτητα. Οι υπέρηχοι δεν είναι τίποτε άλλο παρά ακουστικά κύματα με συχνότητες μεγαλύτερες από εκείνες στις οποίες συγχρονίζεται το ανθρώπινο αυτί (συχνότητες μεγαλύτερες των 20 kHz). Η διαφορά τους με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έγκειται στο ότι για τη μεταφορά ενέργειας στο χώρο απαιτείται κάποιο μέσο διάδοσης. Η ταχύτητα διάδοσης των υπέρηχων ( $c$ ) αλλά και του ήχου γενικότερα, είναι συνάρτηση της πυκνότητας ( $\rho$ ) και της ελαστικότητας του όγκου ( $K$ ) του μέσου διάδοσης. Ισχύει πως:

$$c = \left( \frac{K}{\rho} \right)^{1/2} \quad \text{εξ. (4.1)}$$

Η ελαστικότητα του όγκου είναι το μέτρο της μεταβολής του όγκου ενός υλικού κάτω από μια ορισμένη πίεση, δηλαδή το μέτρο της αντίστασης του υλικού στη συμπίεση.

Τα ακουστικά κύματα διαδίδονται βάζοντας τα σωματίδια του μέσου διάδοσης σε παλμική κίνηση γύρω από τη θέση ισορροπίας τους και στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Οι υπέρηχοι, όπως όλα τα κύματα, χαρακτηρίζονται από ορισμένες παραμέτρους. Οι παράμετροι αυτές είναι η συχνότητα, η περίοδος, το μήκος κύματος, η ταχύτητα διάδοσης, το πλάτος κύματος και η ένταση. Η συχνότητα, η περίοδος, το πλάτος κύματος και η ένταση εξαρτώνται από την πηγή των υπέρηχων, η ταχύτητα είναι χαρακτηριστική του μέσου διάδοσης και το μήκος κύματος εξαρτάται τόσο από την πηγή των υπέρηχων όσο και από το μέσο διάδοσης.

Συχνότητα (f) ονομάζεται ο αριθμός κύκλων μίας κυματικής μεταβλητής ανά sec και εκφράζεται σε μονάδες Hertz (Hz) (1 Hz=1 κύκλος/sec). Περίοδος (T) είναι η διάρκεια ενός κύκλου και ισούται με το αντίστροφο της συχνότητας:

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{εξ. (4.2)}$$

(Πηγή: Ορφανουδάκης Σ. και Μαριάς Κ., *Βασικές αρχές υπέρηχων*)

## 4.2 Παραγωγή και ανίχνευση υπερήχων

Η λειτουργία των συστημάτων παραγωγής και ανίχνευσης των υπερήχων βασίζεται στο όργανο το οποίο ονομάζεται μετατροπέας ενέργειας (transducer). Η χρήση και η λειτουργία των μετατροπέων ενέργειας είναι ανάλογη με αυτή των ηχείων και των μικροφώνων στην περίπτωση κοινών ήχων που είναι ακουστοί στον άνθρωπο. Όταν χρειάζεται να δοθεί έμφαση στο διπλό ρόλο που παίζουν αυτοί σαν πομποί και σαν δέκτες υπερήχων ταυτόχρονα, οι μετατροπείς ονομάζονται και πομποδέκτες.

Μετατροπέας ενέργειας ονομάζεται το όργανο το οποίο μετατρέπει μια μορφή ενέργειας σε μια άλλη.

Στην παραγωγή υπερήχων μετατρέπεται ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική, ενώ στην ανίχνευση των ανακλάσεων μετατρέπεται η μηχανική ενέργεια, που αυτές μεταφέρουν, σε ηλεκτρική, για να γίνει στη συνέχεια η ηλεκτρονική επεξεργασία που απαιτείται για την κατασκευή και καταγραφή της τελικής εικόνας.

(Πηγή: Ορφανουδάκης Σ. και Μαριάς Κ., *Βασικές αρχές υπέρηχων*)

## 4.3 Έλεγχος με υπέρηχους

Ο έλεγχος με υπέρηχους είναι μια μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου κατά την οποία υψηλής συχνότητας ηχητικά κύματα εισέρχονται σε διάφορα υλικά τα οποία εξετάζονται, για να ανιχνεύσουν επιφανειακές αλλά και υποεπιφανειακές ασυνέχειες. Τα ηχητικά κύματα διαδίδονται στην επιφάνεια με μερική εξασθένιση της ενέργειάς τους και ανακλώνται από τις επιφάνειες και τις εσωτερικές ασυνεχείες του. Η ανακλώμενη δέσμη ανιχνεύεται και

αναλύεται για να προσδιοριστεί η ύπαρξη και η θέση των ασυνεχειών. Έτσι, τα ρήγματα, οι διαστρωματώσεις, οι συρρικνώσεις, οι κοιλότητες, οι πόροι, τα εγκλείσματα όπως και άλλες ασυνέχειες μπορούν εύκολα να ανιχνευτούν.

Ο έλεγχος με υπέρηχους εφαρμόζεται για τον έλεγχο της ποιότητας σε δοκιμές υλικών σε όλο το φάσμα των βιομηχανικών δραστηριοτήτων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως ο έλεγχος με υπέρηχους περιλαμβάνει και τις παχυμετρήσεις διαφόρων υλικών αλλά και τον έλεγχο τους για τον εντοπισμό πιθανών διαστρωματώσεων.

(Πηγή: Welding & NDT Institute, Έλεγχος με υπέρηχους)

#### **4.4 Περιορισμοί κατά τη μέτρηση με υπέρηχους**

Όπως όλες οι μέθοδοι των μη καταστροφικών ελέγχων έτσι και η συγκριμένη μέθοδος παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς.

- Η χειροκίνητη μέθοδος για την ανίχνευση ασυνεχειών απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και έμπειρους τεχνικούς.
- Απαιτούνται εκτεταμένες τεχνικές γνώσεις για την ανάπτυξη διαδικασιών ελέγχου με τη χρήση υπερήχων.
- Δοκίμια ή τμήματα δοκιμών με τραχιά επιφάνεια ή ακανόνιστο σχήμα, είναι δύσκολο να ελεγχθούν.
- Τυχόν ασυνέχειες σε προκαθορισμένο υποεπιφανειακό στρώμα του δοκιμίου είναι δύσκολα ανιχνεύσιμες.
- Απαιτούνται υλικά σύζευξης μεταξύ μετατροπέα παραγωγής ηχητικών κυμάτων και δοκιμίου για την αποτελεσματική διάδοσή τους.

(Πηγή: Welding & NDT Institute, Έλεγχος με υπέρηχους)

#### **4.5 Συσσκευές και αισθητήρες ανίχνευσης σφαλμάτων υπερήχων**

Η αρχή λειτουργίας των ανιχνευτών σφαλμάτων υπερήχων είναι η εξής:

Μια συσκευή πομπού-δέκτη παράγει υπέρηχους οι οποίοι κυμαίνονται από 1 έως 12 MHz και οδεύουν, διαθλώνται, σκεδάζονται και ανακλώμενοι λαμβάνονται ξανά από την ίδια συσκευή. Από τη διαφορά χρόνου εκπομπής-

λήψης και τη συχνότητα των λαμβανόμενων ήχων, εντοπίζεται η θέση και η κίνηση των ανακλώντων επιφανειών. Με αυτόν τον τρόπο ανιχνεύονται τα σφάλματα στα διάφορα μηχανολογικά εξαρτήματα.

(Πηγή: Αρχείο Α.Ε. Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ, *Προβλεπτική συντήρηση*)



*Εικόνα 4.1: Ανιχνευτής σφαλμάτων υπερήχων*

Οι αισθητήρες των συσκευών μέτρησης αποτελούν τον πιο σημαντικό παράγοντα για μια σωστή μέτρηση και διαφέρουν ανάλογα με την εφαρμογή και τις απαιτήσεις των εφαρμογών.

Οι αισθητήρες είναι τυποποιημένοι και αφορούν συχνότητες από 20 έως 600 kHz και χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Γωνιακοί αισθητήρες
- Αισθητήρες υψηλών πιέσεων
- Αισθητήρες αντiekρηκτικού τύπου
- Υποβρύχιοι αισθητήρες
- Κυλιόμενοι αισθητήρες υψηλών ή χαμηλών θερμοκρασιών
- Αισθητήρες με προενισχυτή



*Εικόνα 4.2: Τύποι αισθητήρων υπερήχων*



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τρουλάκη Ν., *Μέθοδος ανάλυσης κραδασμών (vibration analysis) και αποτελέσματα εφαρμογής σε περιστροφικά μηχανήματα πλοίων.*
2. Αρχείο Α.Ε. Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ, *Προβλεπτική συντήρηση.*
3. Welding & NDT Institute, *Έλεγχος με υπέρηχους.*
4. Ορφανουδάκης Σ. και Μαριάς Κ., *Βασικές αρχές υπέρηχων.*
5. SKF, *Manual of Microlog GX.*