

# ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΗΧ  
648

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ

## ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Πτυχιακή εργασία με θέμα :

«Μέθοδος πρόγνωσης βλαβών μέσω ανάλυσης  
συχνοτήτων κραδασμών»



Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ. Αντώνιος Τσολάκης

**ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Ι. ΤΡΙΑΝΤΗΣ**  
**A.M. 38171**

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2012

# ***Περιεχόμενα :***

---

<b><i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</i></b>	<b>2</b>
------------------------	----------

## ***Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>***

### **ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ**

1.1 Ορισμός Συντήρησης	3
1.2 Αρχές της συντήρησης	3
1.3 Στόχοι της συντήρησης	4
1.4 Προληπτική Συντήρηση (Preventive maintenance)	5
1.5 Προγνωστική Συντήρηση (Predictive maintenance)	5
1.5.1 Ορισμός της Προγνωστικής Συντήρησης	6

## ***Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>***

### **ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ**

2.1 Κατασκευή αισθητήρων	7
2.2 Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα	9

## ***Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>***

### **ΚΡΟΥΣΤΙΚΟΙ ΠΑΛΜΟΙ**

3.1 Μέτρηση κρουστικών παλμών (Shock Pulse Method)	12
3.2 Πώς παράγονται οι κρουστικοί παλμοί	13
3.3 Επεξεργασία σημάτων Κρουστικών Παλμών	14
3.4 Παράγοντες που επηρεάζουν τους κρουστικούς παλμούς	14
3.5 Μετρώντας τη Λειτουργική Κατάσταση	15

## *Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>*

### ΤΥΠΟΙ ΒΛΑΒΩΝ ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΦΑΣΜΑ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

4.1	Σύγχρονη απόκριση	16
4.2	Αζυγοσταθμία	17
4.2.1	Αιτίες αζυγοσταθμίας	19
4.2.2	Συνέπειες της αζυγοσταθμίας	19
4.2.3	Διάγνωση της αζυγοσταθμίας	20
4.2.3.1	Ανάλυση φάσματος FFT	20
4.2.4	Οδηγός διάγνωσης της αζυγοσταθμίας	22
4.3	Κακή ευθυγράμμιση	22
4.3.1	Αιτίες κακής ευθυγράμμισης	24
4.3.2	Συνέπειες της κακής ευθυγράμμισης	24
4.3.3	Διάγνωση της κακής ευθυγράμμισης	24
4.3.3.1	Ανάλυση φάσματος FFT	26
4.3.4	Οδηγός διάγνωσης της κακής ευθυγράμμισης	28
4.4	Εκκεντρότητα	28
4.5	Χαλαρότητα	29
4.5.1	Αιτίες χαλαρότητας	29
4.5.2	Συνέπειες της χαλαρότητας	30

## *Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>*

### ΒΛΑΒΕΣ ΚΑΙ ΦΘΟΡΕΣ ΡΟΥΛΕΜΑΝ

5.1	Διάρκεια ζωής των ρουλεμάν	30
5.2	Αιτίες αστοχίας των ρουλεμάν	32
5.3	Ενδείξεις βλαβών στα ρουλεμάν	34
5.3.1	Ακοή	36



5.3.2 Αφή	36
5.3.3 Όραση	37
5.3.4 Ανάλυση των κραδασμών	38
5.4 Οδηγός επίλυσης εμφανιζόμενων προβλημάτων βάσει των λαμβανομένων ενδείξεων	38

## **Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>**

### ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

6.1 Αιτίες βλαβών σε οδοντωτούς τροχούς	48
6.2 Φθορά σε οδόντα	48
6.3 Φορτίο οδόντος	48
6.4 Ραγισμένος ή σπασμένος οδόντα	49
6.5 Συχνότητα σύμπτωσης οδόντων	49
6.6 Υπολογισμός της συχνότητας εμπλοκής	50

## **Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>**

### ΦΘΑΡΜΕΝΟΙ Ή ΧΑΛΑΡΟΙ ΙΜΑΝΤΕΣ

7.1 Τροχαλίες με εκκεντρότητα	51
7.2 Συντονισμός του ιμάντα	51

## **Κεφάλαιο 8<sup>ο</sup>**

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ CONDMASTER PRO 2

8.1 Μεταφορά δεδομένων από το PC στο T-30 μέσω του Condmaster Pro	52
8.2 Μεταφορά δεδομένων από το T-30 στο PC	56
8.3 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα	57

## **Κεφάλαιο 9<sup>ο</sup>**

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ RIG

9.1 Εισαγωγή	60
9.2 Κατάλογος εξαρτημάτων του RIG	61
9.3 Παρουσίαση βλαβών στα εξαρτήματα	62



## **Κεφάλαιο 10<sup>ο</sup>**

### ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

10.1 Διαδικασία Μέτρησης	69
10.2 Τρόποι και θέσεις μετρήσεων	69
10.2.1 Γενικές παρατηρήσεις	69
10.2.2 Κατευθύνσεις μέτρησης	70
10.2.3 Σημεία Μέτρησης	71
10.3 Αποτελέσματα μετρήσεων	76
10.3.1 Έλεγχος αυξηστήρα	77
10.3.2 Έλεγχος του ρουλεμάν SKF YET 210	89
10.3.3 Έλεγχος του ρουλεμάν SKF 1211	93

## **Κεφάλαιο 11<sup>ο</sup>**

11.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΟΥ ΑΝΤΛΙΑΣ	99
----------------------------------	----

## **Κεφάλαιο 12<sup>ο</sup>**

Συμπεράσματα-Σχόλια	103
---------------------	-----

## **Βιβλιογραφία**

μέθοδος VIB μέτρησης της έντασης των δονήσεων-κραδασμών και η μέθοδος EVAM που αξιοποιώντας τις δυνατότητες H/Y και με τη χρήση κατάλληλου περιβάλλοντος ασχολείται με την ανάλυση των εκπεμπόμενων σημάτων.

Οι παραπάνω ενέργειες είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν με την βοήθεια μετρητικών οργάνων, κατάλληλων για την παρακολούθηση και την παρουσίαση της κατάστασης μιας μηχανής. Τέτοιου είδους όργανα μετράνε είτε τον θόρυβο, είτε τους παραγόμενους κραδασμούς από μία μηχανή, ενώ αυτή λειτουργεί και βρίσκεται στο πλήρες φορτίο της. Η συλλογή των μετρήσεων γίνεται με την χρήση κατάλληλου αισθητήρα που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ένα επιταχυνσιόμετρο. Οι μετρήσεις αυτές συλλέγονται από ένα φορητό όργανο και στην συνέχεια μεταφορτώνονται σε έναν H/Y, όπου με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού γίνεται η επεξεργασία του φάσματος.

Ένα τέτοιου είδους όργανο, είναι και το φορητό μηχάνημα T-30 της Σουηδικής εταιρείας SPM που υπάρχει στο εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών του Ε. Μ. Π. . Το όργανο, μπορεί να πάρει μετρήσεις κρουστικών παλμών και φάσματος κραδασμών μέσω των κατάλληλων αισθητηρίων του. Η ανάλυση και η επεξεργασία των μετρήσεων του οργάνου γίνεται σε H/Y με τη χρήση του προγράμματος Condmaster Pro της SPM που το συνοδεύει. Το όργανο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί πολλές φορές τόσο για την υποστήριξη βιβλιογραφικών συμπερασμάτων, στα πλαίσια του εργαστηρίου, όσο και σε καθαρά βιομηχανικό περιβάλλον.

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

### ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

#### 1.1 Ορισμός Συντήρησης

Σύμφωνα με τον L.R. Higgins: «*Η Συντήρηση είναι μία Επιστήμη, δεδομένου ότι η εκτέλεσή της βασίζεται σε πολλές ή και σε όλες τις Επιστήμες. Είναι μία τέχνη, διότι φαινομενικά όμοια προβλήματα απαιτούν και επιδέχονται διαφορετικές προσεγγίσεις και ενέργειες για την αντιμετώπισή τους αλλά και εξαιτίας του γεγονότος ότι ορισμένοι διοικητές, μηχανικοί ή τεχνικοί της συντήρησης, επιδεικνύουν μεγαλύτερη επιδεξιότητα και ευφυΐα από αυτή που φαίνεται να διαθέτουν κάποιοι άλλοι ή θα καταφέρουν κάποτε να αποκτήσουν. Είναι πάνω απ' όλα μία φιλοσοφία, διότι είναι μία γνώση που μπορεί να εφαρμοσθεί εντατικά, μέτρια ή και καθόλου, εξαρτώμενη από ένα πλήθος παραμέτρων, με συνέπεια η υλοποίησή της να υπερβαίνει κατά πολύ την ποθούμενη ταχύτατη λήψη προφανών αποφάσεων. Επιπρόσθετα, η συντήρηση είναι μια φιλοσοφία, διότι η εφαρμογή της πρέπει να γίνεται ταιριαστή σε τέτοιο βαθμό με τη λειτουργία ή τον οργανισμό που υπηρετεί, όσο ένα τέλειο κοστούμι εφαρμόζει άριστα σε αυτόν που το φοράει και για το λόγο ότι ανάλογα με το πόσο καλά αντιλαμβάνονται οι συντηρητές που την εφαρμόζουν τις απαιτήσεις, κρίνεται η αποτελεσματικότητα της συντήρησης στη λειτουργία των μηχανών και εγκαταστάσεων.*»

Η συντήρηση επομένως είναι η Επιστήμη που ασχολείται με τη φροντίδα του εξοπλισμού και τη διατήρηση της αξιοπιστίας του μέσα στα επιθυμητά όρια. Δεδομένης της ανάγκης που υπάρχει στη σημερινή εποχή οι εξοπλισμοί να έχουν ασφαλή και αποδοτική λειτουργία σε όλη τη διάρκεια ζωής τους και από την άλλη πλευρά, οι περιορισμοί κόστους των επισκευών και συντηρήσεων από τις Διοικήσεις των εταιριών (δημοσίων ή ιδιωτικών) που πιέζουν για την ελαχιστοποίησή τους, καθιστούν την επίτευξη αξιοπιστίας των συστημάτων ένα σύνθετο πρόβλημα.

#### 1.2 Αρχές της συντήρησης

Μερικές από τις σημαντικότερες αρχές που διέπουν τη συντήρηση και έχουν προκύψει από την πείρα είναι:

- Όταν ακόμα σχεδιάζεται ο εξοπλισμός, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η μέθοδος και το κόστος συντήρησης.





- Η συντήρηση δεν μπορεί να αντισταθμίσει την κακή σχεδίαση ή και τη χαμηλή ποιότητα υλικών.
- Η συντήρηση είναι ένας κρίκος στη σύνθετη αλυσίδα πολυάριθμων παραμέτρων όπως η καταπόνηση, η ηλικία, η ποιότητα, οι διαστάσεις, η σχεδίαση και η φιλοσοφία συγκρότησης του συστήματος στο οποίο ανήκει ο εξοπλισμός.
- Η συντήρηση πρέπει να προσαρμόζεται διαρκώς στις νέες τεχνολογίες.
- Οι οδηγίες συντήρησης που δίνει ο κατασκευαστής πρέπει να προσαρμόζονται από το χρήστη με βάση την πείρα του.
- Η συντήρηση πρέπει να είναι μέρος της γενικής στρατηγικής της κάθε επιχείρησης.
- Η συντήρηση είναι το σύνολο των δραστηριοτήτων που αναπτύσσονται στην καθημερινή πράξη.

### **1.3 Στόχοι της συντήρησης**

Σήμερα απαιτούμε από τον εξοπλισμό γενικά να ανταποκρίνεται σε υψηλότερες στάθμες αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας αλλά με εύλογο κόστος. Για το λόγο αυτό ο εξοπλισμός πρέπει να έχει υψηλής ποιότητας συντήρηση. Οι στόχοι λοιπόν της σύγχρονης πρακτικής της συντήρησης, συνοψίζονται στους ακόλουθους:

- Η συντήρηση πρέπει να διατηρεί τον εξοπλισμό στην απαιτούμενη στάθμη αξιοπιστίας και λειτουργίας.
- Η διάρκεια της συντήρησης να είναι ή συντομότερη δυνατή, ώστε η διαθεσιμότητα του εξοπλισμού να είναι η μέγιστη.
- Το κόστος της συντήρησης πρέπει να είναι το μικρότερο δυνατό. Γι' αυτό αποφεύγεται η αντικατάσταση εξαρτημάτων, αν αυτή δεν είναι αναγκαία.
- Η συντήρηση πρέπει να περιορίζει τη φθορά του εξοπλισμού και να συνεπάγεται όπου είναι δυνατό και μη δαπανηρό, την επέκταση της ζωής.

#### **1.4 Προληπτική Συντήρηση (Preventive maintenance)**

Η έννοια της προληπτικής συντήρησης έχει μια πληθώρα ερμηνειών. Κατά μία αρκετά ακριβή ερμηνεία της, ορίζεται ως ένα πρόγραμμα συντήρησης που ακολουθείται για την κατά το δυνατόν εξάλειψη ή αποφυγή της εφαρμογής των δύο μεθόδων συντήρησης: (i) Επιδιορθωτικής και (ii) αποκατάστασης βλάβης για επαναφορά σε λειτουργία. Ένα περιεκτικό και πλήρες πρόγραμμα προληπτικής συντήρησης πραγματοποιεί τακτικές αξιολογήσεις των σημαντικών εξοπλισμών, μηχανών και συστημάτων των εγκαταστάσεων, για τον εντοπισμό ενδεχόμενων προβλημάτων και την κατάρτιση αναλυτικών προγραμμάτων της συντήρησης, με σκοπό την αποφυγή οποιασδήποτε υποβάθμισης της κατάστασης λειτουργίας.

Στις περισσότερες βιομηχανίες, η προληπτική συντήρηση περιορίζεται σε περιοδικές λιπάνσεις, ρυθμίσεις και ορισμένες άλλες χρονικά εξαρτώμενες εργασίες συντήρησης. Αυτά τα προγράμματα δεν αντιπροσωπεύουν στην πραγματικότητα την προληπτική συντήρηση. Πράγματι, τα περισσότερα εξ αυτών βασίζονται στο μοντέλο της παύσης λειτουργίας λόγω βλάβης, με την τελευταία να αποτελεί έναυσμα για την έναρξη των εργασιών συντήρησης.

Ένα πλήρες πρόγραμμα προληπτικής συντήρησης θα περιλαμβάνει προγνωστική συντήρηση (predictive maintenance), χρονικά εξαρτώμενες εργασίες συντήρησης και επιδιορθωτική συντήρηση, ώστε να παρέχεται μια ευρύτερη φροντίδα όλων των βιομηχανικών συστημάτων και μηχανών και συνακόλουθα της παραγωγής στη βιομηχανία.

#### **1.5 Προγνωστική Συντήρηση (Predictive maintenance)**

Η Προγνωστική ή προβλεπτική συντήρηση είναι ίσως το πιο παρεννοημένο και λανθασμένα χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα συντήρησης από όλα τα προγράμματα που συμβάλλουν στη βελτίωση και φροντίδα των βιομηχανικών συστημάτων και εξοπλισμών. Οι περισσότεροι χρήστες του το ορίζουν σαν ένα μέσο αποφυγής καταστροφικών συνεπειών στις κρισιμότερες περιστρεφόμενες μηχανές. Άλλοι ορίζουν την προγνωστική συντήρηση σαν ένα προγραμματιστικό εργαλείο συντήρησης που χρησιμοποιεί τα δεδομένα των κραδασμών και της λειτουργίας της λίπανσης για να καθορίσει τις επόμενες βελτιωτικές ενέργειες της συντήρησης. Ορισμένοι άλλοι μοιράζονται την άποψη ότι η προγνωστική συντήρηση είναι



πανάκεια για τις εντονότερα και συχνότερα φθειρόμενες εγκαταστάσεις, επηρεασμένοι από τους πωλητές των συστημάτων προγνωστικής συντήρησης. Από όλες τις παραπάνω απόψεις, το μόνο σίγουρο συμπέρασμα που βγαίνει είναι ότι η προγνωστική συντήρηση είναι ένα εργαλείο στα χέρια της διοίκησης της συντήρησης.

Εξαιτίας αυτών των παρανοήσεων, η πλειοψηφία των εγκατεστημένων προγραμμάτων προγνωστικής συντήρησης δεν έχει καταφέρει ως τώρα να πετύχει σημαντική μείωση του κόστους συντήρησης ή κάποια έστω βελτίωση στην όλη της λειτουργία. Πράγματι, πολλές φορές σημειώνεται το ακριβώς αντίθετο. Δηλαδή το ετήσιο κόστος συντήρησης αυξάνεται δραματικά εξαιτίας της εφαρμογής αυτού του προγράμματος συντήρησης.

Η προγνωστική συντήρηση είναι πολλά περισσότερα από ένα απλό σύστημα προγραμματισμού της συντήρησης και δε θα έπρεπε να περιοριστεί η εφαρμογή της στη διοίκηση και μόνο της συντήρησης. Σαν ένα μέρος ενός ολοκληρωμένου προγράμματος λειτουργίας της συντήρησης, μπορεί να προσφέρει τα μέσα ώστε να αυξηθεί η παραγωγικότητα, η ποιότητα των προϊόντων που προκύπτουν και να επιδράσει αποτελεσματικά στη διαχείριση των βιομηχανικών και παραγωγικών εγκαταστάσεων.

### ***1.5.1 Ορισμός της Προγνωστικής Συντήρησης***

Η Προγνωστική ή Προβλεπτική Συντήρηση δεν είναι πανάκεια στην αντιμετώπιση κάθε προβλήματος που παρεμποδίζει την εύρυθμη λειτουργία των εγκαταστάσεων. Πράγματι, δεν μπορεί να επηρεάσει απευθείας τη λειτουργία μίας εγκατάστασης. Είναι όμως μία τεχνική της διαχείρισης της συντήρησης, η οποία χρησιμοποιεί τακτικά εκτιμήσεις της πραγματικής κατάστασης των εγκαταστάσεων, μηχανών και λειτουργιών της διοίκησης για να βελτιστοποιήσει συνολικά τη λειτουργία αυτών.

Η θεωρία αυτή αποτελεί νέα διεθνή τάση στην εφαρμοσμένη συντήρηση και αποτελεί μετάβαση από τη συντήρηση που βασίζεται σε χρονικά διαστήματα (time based) προς τη συντήρηση που βασίζεται στην λειτουργική κατάσταση των μηχανών (condition based). Κατά τη μέθοδο αυτή κάθε μηχανή, παρακολουθείται ξεχωριστά με μετρήσεις από κατάλληλα όργανα, ώστε να γνωρίζουμε τη λειτουργική της κατάσταση, ενώ βρίσκεται σε λειτουργία. Έτσι ορίζουμε το χρόνο συντήρησης μόνον



όταν αυτό είναι αναγκαίο. Η μέθοδος αυτή συμφωνεί με την κοινή πεποίθηση των μηχανικών ότι δεν είναι φρόνιμο να λύνουμε συχνά μια μηχανή, παρά μόνο όταν είναι ανάγκη. Η φιλοσοφία αυτή βοηθάει το προσωπικό των εργοστασίων να μειώσουν την πιθανότητα καταστροφικής ζημιάς, να παραγγέλνουν ανταλλακτικά στην ώρα τους, να προγραμματίζουν τις ανάγκες σε ανθρώπινο δυναμικό για την επισκευή. Υπάρχει ποικιλία στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κατάστασης των μηχανών, ο κυριότερες των οποίων είναι:

- Παρακολούθηση του επιπέδου των δονήσεων - κραδασμών (Vibration Monitoring)
- Μέτρηση κρουστικών παλμών (Shock Pulse Measurements)
- Ανίχνευση βλαβών με θερμογράφηση (Thermograph)
- Μελέτη και ανάλυση ιδιοτήτων λιπαντικού (Tribology)
- Μέτρηση παραμέτρων λειτουργικής διαδικασίας (Process Parameters)
- Οπτική επιθεώρηση (Visual Inspection)

Σημειώνεται ότι η παρακολούθηση δονήσεων και η μέθοδος των κρουστικών παλμών είναι αυτές που βρίσκουν την ευρύτερη εφαρμογή και δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Η εργασία αυτή εντάσσεται στο κομμάτι της παρακολούθησης δονήσεων για τη διάγνωση βλαβών.

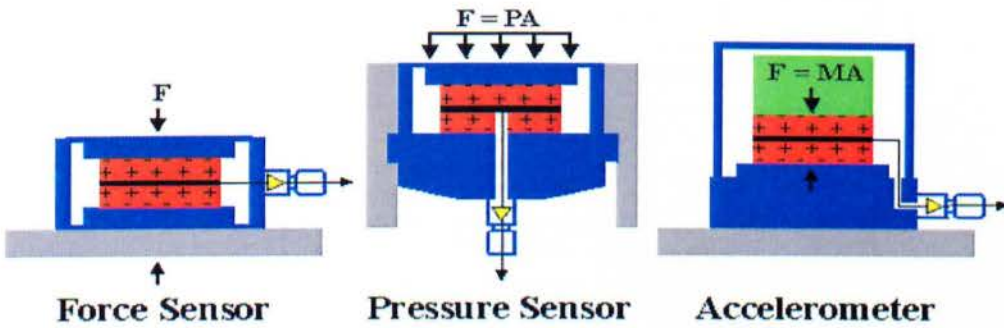
## **Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>**

### **ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ**

#### **2.1 Κατασκευή αισθητήρων**

Παλιότερα οι αισθητήρες επιτάχυνσης και κραδασμών ήταν πολύπλοκες μηχανικές κατασκευές και ήταν περισσότερες κατάλληλες για εργαστηριακή χρήση παρά για παραγωγική διαδικασία. Τα σύγχρονα, ωστόσο, επιταχυνσιόμετρα έχουν ευνοηθεί από την πρόοδο της τεχνολογίας: το κόστος, η ακρίβεια και η ευκολία στην χρήση έχουν ευνοηθεί με την πάροδο του χρόνου.

Μια παρουσίαση τυπικών αισθητήρων δύναμης, πίεσης και επιτάχυνσης γίνεται στο σχήμα 3.2.Σ1.

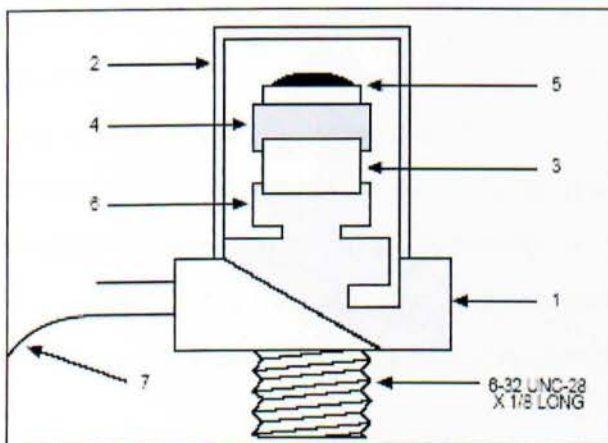


Παρουσίαση τυπικών αισθητήριων

Σχήμα 3.2.1

Σε επιταχυνσιόμετρα που μετρούν κίνηση, η σεισμική μάζα «M» αναγκάζεται από τους κρυστάλλους να ακολουθήσει την κίνηση της βάσης. Η δύναμη που ασκείται στο κρύσταλλο, δηλαδή στον αισθητήρα, υπολογίζεται κάνοντας χρήση του Δεύτερου Νόμου του Νεύτωνα, σύμφωνα με τον οποίο  $F = M \cdot A$ . Οι αισθητήρες πίεσης και δύναμης είναι παρόμοιοι και λειτουργούν βάσει μιας εξωτερικής δύναμης που επιμηκύνει τους κρυστάλλους. Λόγω της ομοιότητάς τους, οι αισθητήρες που κατασκευάζονται για τη μέτρηση μιας συγκεκριμένης παραμέτρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ορισμένα άλλα δεδομένα.

Ένα τυπικό επιταχυνσιόμετρο, αποτελείται από τα παρακάτω μέρη :



Επιταχυνσιόμετρο

Σχήμα 3.2.2

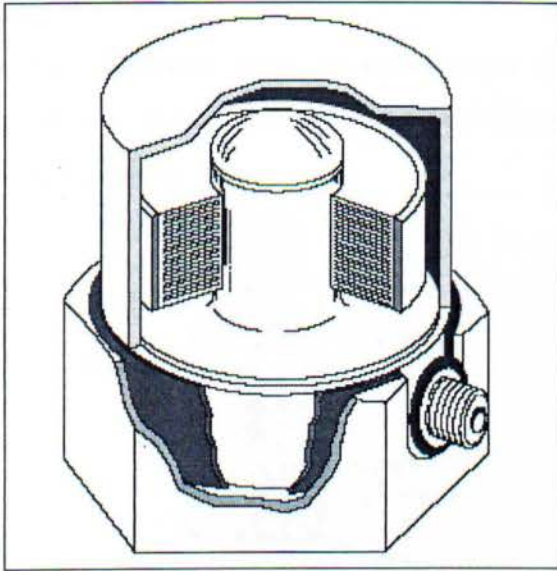
No	Εξάρτημα
1	Βάση επιταχυνσιομέτρου
2	Καπάκι επιταχυνσιομέτρου
3	Κρύσταλλος
4	Μάζα
5	Ηλεκτρικό κύκλωμα
6	Εσωτερική μόνωση βάσης
7	Καλώδιο

Πίνακας 3.2

## 2.2 Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα

Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα είναι τα πλέον πρακτικά όργανα για την μέτρηση των κραδασμών. Όμοια με έναν μηχανικό αισθητήρα, αυτά τα όργανα περικλείουν μία μάζα η οποία όταν επιταχυνθεί, εξασκεί μία αδρανειακή δύναμη σε έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο. Γενικότερα, τα επιταχυνσιόμετρα αποτελούν πιεζοηλεκτρικά επινοήματα κατασκευασμένα έτσι ώστε να παράγουν ηλεκτρικά σήματα. Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα κατασκευάζονται με χρήση κρυστάλλων (quartz), πολυκρυσταλλικών κεραμικών καθώς και του λεγόμενου PZT. Κάθε υλικό έχει διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, οι κρύσταλλοι μπορούν να εκτεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζοντας σταθερότητα ανεξάρτητα από την πάροδο του χρόνου. Οι αισθητήρες που λειτουργούν με κρυστάλλους έχουν μεγάλη ευαισθησία σε υψηλές τάσεις και απαιτούν πολλαπλασιαστή τάσης για την επεξεργασία του σήματος. Από την άλλη, οι αισθητήρες που βασίζονται στη χρήση PZT εξασφαλίζουν μεγάλη ενεργειακή απόδοση και μεγάλη χωρητικότητα. Τέλος, στην επιλογή του υλικού πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν η επιλογή συνδέσμου και η μέθοδος σφραγισμού του.



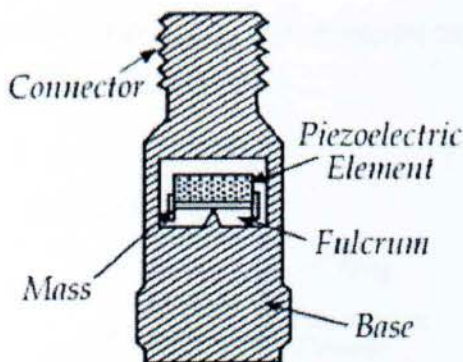


*Τυπική μορφή επιταχυνσιομέτρου*

Σχήμα 3.4.1

Τρία βασικά κατασκευαστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για τη βιομηχανική παραγωγή των επιταχυνσιόμετρων. Υπάρχει το καμπτικό, το συμπιεστικό και το διατμητικό μοντέλο. Και τα τρία αυτά περιλαμβάνουν τα βασικά στοιχεία της πιεζοηλεκτρικής θεωρίας, δηλαδή της σεισμικής μάζας, της βάσης και του εδράνου.

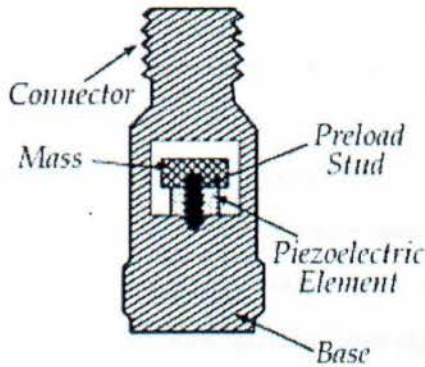
Το **καμπτικό** μοντέλο ( σχήμα), είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να λειτουργεί με αισθητήρες κρυστάλλων με μορφή υποστηρίγματος τύπου δοκού. Ο κρύσταλλος τοποθετείται στη δοκό, ούτως ώστε ο μηχανισμός να έχει μικρό βάρος και όγκο, ενώ προσφέρει και μεγαλύτερη σταθερότητα και οικονομικότερη τιμή αγοράς. Λειτουργεί γενικώς με μικρότερη συχνότητα, όμως δεν ενδείκνυται η χρήση του για εφαρμογές μηχανικών παρατηρήσεων.



*Καμπτικό μοντέλο*

Σχήμα 3.4.2

Το **συμπιεστικό** μοντέλο ( σχήμα) είναι το απλούστερο και ευκολότερο στην κατανόηση. Ο κρύσταλλος, quartz ή κεραμικός, τοποθετείται ενδιάμεσα της σεισμικής μάζας και μιας άκαμπτης βάσης.

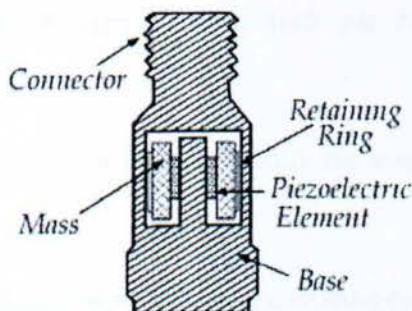


**Συμπιεστικό μοντέλο**

Σχήμα 3.4.3

Όταν ο αισθητήρας κινείται ( δονείται ), ασκείται μια δύναμη στον κρύσταλλο δίνοντας ως έξοδο ένα ηλεκτρικό σήμα. Λόγω του ανθεκτικού σχεδιασμού του, είναι καταλληλότερο από το αντίστοιχο καμπτικό για τη χρήση του σε βιομηχανικές εφαρμογές παρακολούθησης μηχανών. Γενικότερα, οι συμπιεστικοί μηχανισμοί έχουν χοντρή βάση και πρέπει να χρησιμοποιούνται σε συμπαγείς μεταλλικές κατασκευές ή σε χαμηλές συχνότητες όπου το περιβάλλον είναι θερμικά ασταθές.

Τέλος, στο **διατμητικό** μοντέλο ( σχήμα) το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο είναι τοποθετημένο ανάμεσα στην κεντρική δοκό στήριξης και στη σεισμική μάζα. , μέσω ενός μεταλλικού δακτυλίου προφόρτισης. Η προφόρτιση αυτή, δημιουργεί μια δύσκαμπτη κατασκευή με καλή συχνότητα αντίδρασης και καλύτερη μηχανική ακεραιότητα. Αξίζει να ειπωθεί πως το αισθητήριο σε αυτού του τύπου το μηχανισμό δεν επηρεάζεται από περιοδική θέρμανση και από κάμψη της βάσης, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα κατασκευαστικά μοντέλα.



**Διατμητικό μοντέλο**

Σχήμα 3.4.4



## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### ΚΡΟΥΣΤΙΚΟΙ ΠΑΛΜΟΙ

#### 3.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΡΟΥΣΤΙΚΩΝ ΠΑΛΜΩΝ (Shock Pulse Method)

Η μέθοδος των κρουστικών παλμών είναι ιδιαίτερα σημαντική στον τομέα της διάγνωσης των βλαβών. Βασικό πλεονέκτημα είναι η ταχύτητα των μετρήσεων και η ευκολία στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων της. Ερευνά την ύπαρξη ή μη λιπάντικού στρώματος και την κατάσταση των επιφανειών των σωμάτων κύλισης και των διαδρόμων κίνησης των ρουλεμάν, καθώς και άλλες αιτίες δημιουργίας προβλημάτων και πρόκλησης κρουστικών φορτίων στα ρουλεμάν. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές όπως εντοπισμός σπηλαιώσης αντλιών, κατάσταση συμπιεστών, κατάσταση συνεργαζόμενων οδοντωτών τροχών κ.ά., όπου η επαφή μετάλλου με μέταλλο είναι η αιτία της φθοράς. Η κυριότερή της εφαρμογή όμως είναι στα έδρανα.

Αποτελεί μία εφεύρεση της σουηδικής εταιρίας SPM (αρχικά του Shock Pulse Method) του έτους 1969 και εκμεταλλεύεται τα σήματα που εκπέμπουν τα έδρανα κύλισης κατά τη λειτουργία τους για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την κατάσταση και την αποδοτικότητά τους. Από την εποχή εκείνη μέχρι τις μέρες μας έχει εξελιχθεί περαιτέρω και διευρυνθεί ως προς το πεδίο εφαρμογής της για να αποτελέσει μία διεθνώς αποδεκτή μέθοδο ελέγχου της κατάστασης των εδράνων και της προγνωστικής συντήρησης γενικότερα.

Στα πλαίσια αυτής της μεθόδου δεν ενδιαφερόμαστε για τη δόνηση που προκαλείται από κάποιον κρουστικό παλμό αλλά για τον κρουστικό παλμό αυτόν καθαυτόν. Αρκούν μόνο δυο τιμές για την αξιολόγηση της κατάστασης ενός ρουλεμάν:

- $db_m$ : Η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή για ένα μικρό αριθμό ισχυρών κρουστικών παλμών.
- $db_c$ : Η οποία αντιστοιχεί στον βασικό παλμό για έναν μεγάλο αριθμό ασθενών κρουστικών παλμών.

Οι τιμές των  $db_m$  και  $db_c$  έχουν εύρος 60db σε κανονικοποιημένη κλίμακα. Η τιμή  $db_i$  είναι ο αρχικός θόρυβος που προκαλεί η περιστροφή του άξονα της μηχανής και του



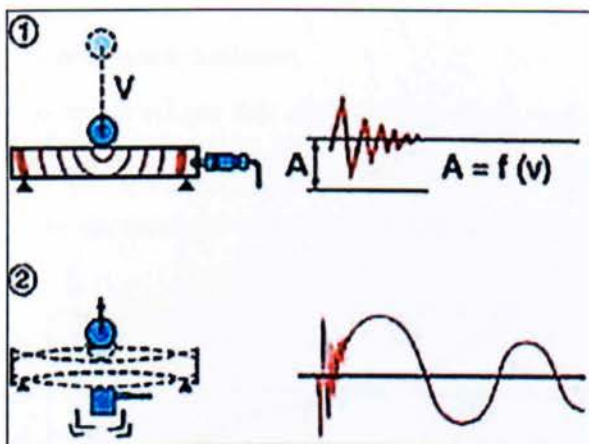
ρουλεμάν ταυτόχρονα. Για να μη λάβουμε υπ' όψη μας το θόρυβο αυτό εισάγουμε την έννοια του αρχικού θορύβου  $db_i$  ο οποίος θα αποτελέσει αφετηρία για τον έλεγχο του ρουλεμάν. Γίνεται η μέτρηση με το κατάλληλο όργανο και ανάλογα με τις τιμές των  $db_m$   $db_c$  αξιολογείται η κατάσταση του ρουλεμάν:

- **Πράσινη** περιοχή για  $db_m$  μέχρι 20 φορές  $db_c$ , που αντιστοιχεί σε άριστο ρουλεμάν.
- **Κίτρινη** περιοχή για  $db_m$  από 21 μέχρι 34 φορές  $db_c$ , αμφίβολη κατάσταση.
- **Κόκκινη** περιοχή για  $db_m$  μεγαλύτερο από 34 φορές  $db_c$ , κακή κατάσταση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαφορά  $db_m$   $db_c$  παρέχει πληροφορία για τη λίπανση των ρουλεμάν. Μεγάλες τιμές  $db_m$  και μικρή διαφορά  $db_m$   $db_c$  είναι ένδειξη φτωχής λίπανσης.

### 3.2 Πώς παράγονται οι κρουστικοί παλμοί

Ο κρουστικός παλμός γεννάται τη στιγμή που λαμβάνει χώρα κάποια κρούση μεταξύ δύο σωμάτων. Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα τη μεταλλική σφαίρα του διπλανού σχήματος που χτυπά τη μεταλλική επιφάνεια. Τη στιγμή της σύγκρουσης ακριβώς, ένα κύμα πίεσης διαδίδεται μέσα από τη μάζα των δύο σωμάτων (βλ. σχ. 1).



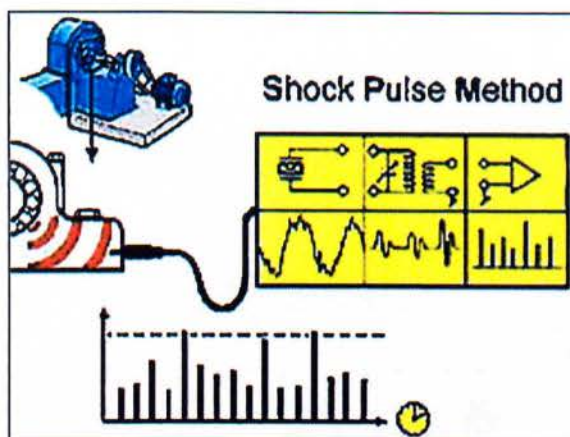
Το κύμα αυτό είναι στιγμιαίο και αποσβεννύεται γρήγορα. Όταν το κύμα αυτό φτάσει στο αισθητήριο όργανο μετατροπής του κύματος σε σήμα, θα προκαλέσει μία αποσβαίνουσα ταλάντωση στη μάζα που φέρει εσωτερικά. Το εύρος της πρώτης κορυφής της ταλάντωσης της μάζας είναι συνάρτηση της ταχύτητας σύγκρουσης των δύο σωμάτων.

Κατά την επόμενη φάση, αμέσως μετά δηλαδή την αρχική σύγκρουσή τους, τα δύο σώματα αρχίζουν να δονούνται και να υπόκεινται σε κραδασμό (βλ. σχ. 2). Η συχνότητα του κραδασμού είναι συνάρτηση της μάζας και του σχήματος των δύο

συγκρουσμένων σωμάτων. Κατά συνέπεια οι κραδασμοί είναι επακόλουθα των κρουστικών παλμών.

### 3.3 Επεξεργασία σημάτων Κρουστικών Παλμών

Ένας μετατροπέας κρουστικών παλμών αντιδρά έντονα τη στιγμή που πραγματοποιείται κάποια κρούση, αφού η μάζα του ταλαντώνεται σε μεγάλο εύρος, δεδομένου ότι διεγείρεται στη συχνότητα συντονισμού του που είναι 32 kHz. Ο κραδασμός της μηχανής που έχει συχνότητες χαμηλότερες, αποκόβεται στο φιλτράρισμα.



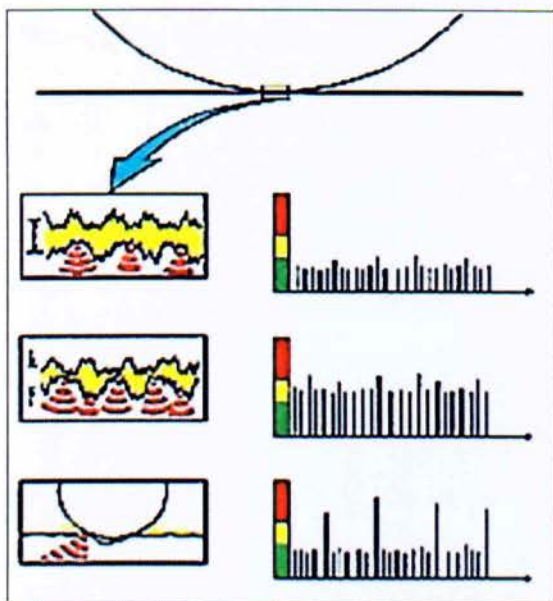
Στη διπλανή εικόνα βλέπουμε το συμβολισμό ενός μετατροπέα και κάτω από αυτόν, το χρονικό σήμα του παραγόμενου κραδασμού στη μηχανή, και τις αιχμές των στιγμιαίων κρούσεων στη συχνότητα συντονισμού.

### 3.4 Παράγοντες που επηρεάζουν τους κρουστικούς παλμούς

Στο ακόλουθο σχήμα βλέπουμε ένα ηλεκτρικό φίλτρο που επιτρέπει να περάσει μία σειρά σημάτων στιγμιαίων κρουστικών παλμών, συχνότητας 32 kHz. Τα πλάτη των αιχμών εξαρτώνται από την ενέργεια των κρουστικών παλμών. Τα στιγμιαία αυτά κύματα λόγω κρούσης μετατρέπονται σε αναλογικά ηλεκτρικά σήματα. Το τελευταίο διάγραμμα απεικονίζει ένα τροποποιημένο σήμα κρουστικού παλμού ενός εδράνου, το οποίο αποτελείται πλέον από μία αλληλουχία ψηλότερων και κοντύτερων αιχμών ηλεκτρικού σήματος.

Το φιλτραρισμένο σήμα που προκύπτει από το αισθητήριο όργανο των κρουστικών παλμών, αντικατοπτρίζει τη διακύμανση των

πίεσεων εντός των επιφανειών κύλισης του εδράνου. Όταν το λιπαντικό φιλμ του εδράνου είναι παχύ, το εύρος του κρουστικού παλμού είναι χαμηλό, χωρίς να





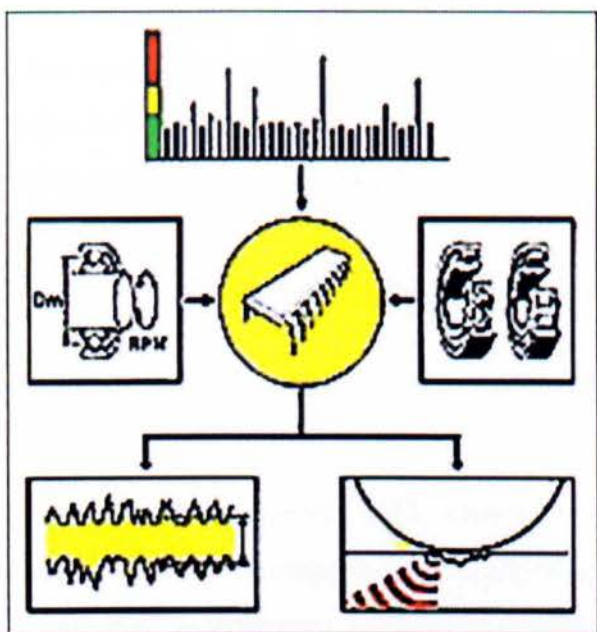
διακρίνονται αιχμές για το ιδιαίτερο πλάτος τους. Τα επίπεδα αυξάνουν καθώς το λιπαντικό φιλμ μειώνεται, αλλά και πάλι δε διακρίνονται ευκρινώς αιχμές. Μόνο η καταστροφή της επιφάνειας του εδράνου μπορεί να προκαλέσει ισχυρούς παλμούς σε ακανόνιστα χρονικά διαστήματα.

### 3.5 Μετρώντας τη Λειτουργική Κατάσταση

Τα σήματα των κρουστικών παλμών μετρώνται σε μία κλίμακα dB, σε δύο επίπεδα. Ένας μικροεπεξεργαστής εκτιμά το σήμα. Για δεδομένα εισόδου χρειάζεται το είδος του εδράνου (αριθμό ISO) και την ταχύτητα περιστροφής του (στροφές ανά λεπτό-rpm και διάμετρο εδράνου).

Οι επιφανειακές φθορές των εδράνων προκαλούν ραγδαία αύξηση του εύρους των κρουστικών παλμών, με μία αξιοσημείωτη αλλαγή στα

χαρακτηριστικά μεταξύ των ισχυρών και ασθενών παλμών. Με αυτόν τον τρόπο τα μεγέθη των κρούσεων μετατρέπονται αμέσως σε μετρήσεις του πάχους του στρώματος λιπαντικού ή του βαθμού καταστροφής της επιφάνειας.





## **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>**

### **ΤΥΠΟΙ ΒΛΑΒΩΝ ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΦΑΣΜΑ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ**

Οι περιστρεφόμενες μηχανές υπόκεινται σε πληθώρα δυσλειτουργιών. Μερικές από αυτές είναι κοινές σε όλες τις περιστρεφόμενες μηχανές, ενώ κάποιες άλλες αποτελούν μοναδικά χαρακτηριστικά κάποιων μηχανών συγκεκριμένου τύπου. Η ύπαρξη των βλαβών συνοδεύεται και από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά στα φάσμα των συχνοτήτων, ανάλογα με την περίπτωση.

Στο κεφάλαιο αυτό λοιπόν θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι βλάβες αυτές και η επίδρασή τους στο φάσμα συχνοτήτων.

#### **4.1 Σύγχρονη απόκριση**

Η σύγχρονη ή με την ταχύτητα περιστροφής ή θεμελιώδης ή 1X κίνηση ενός περιστρεφόμενου στοιχείου μηχανής αποτελεί δομικό χαρακτηριστικό κάθε μηχανής. Θα πρέπει να γνωρίζουμε ότι όλες οι μηχανές λειτουργούν με κάποιο επίπεδο «έμφυτης» αζυγοσταθμίας. Γι αυτό το λόγο θα πρέπει όλες οι μηχανές να έχουν κάποιο πεπερασμένο διάκενο μεταξύ των σταθερών και των περιστρεφόμενων μερών τους. Επειδή δεν είναι δυνατό να έχουμε πλήρως ευθείς και ομόκεντρους ρότορες, εμφανίζεται ένα ακόμα είδος σύγχρονης κίνησης. Επιπλέον, όλες οι μηχανές υποστηρίζονται από ποικίλα είδη δομών και εδράσεων τα οποία «ενδίδουν» στις δονήσεις των μηχανών.

Οι μετρήσεις της απόκρισης των κραδασμών σε οποιαδήποτε μηχανή με οποιοδήποτε αισθητήριο όργανο, θα αποδώσει με βεβαιότητα μία συνιστώσα η οποία θα αντιστοιχεί στη συχνότητα περιστροφής της μηχανής. Αυτή ακριβώς η διέγερση, η οποία είναι κοινός τόπος για όλες τις περιστρεφόμενες μηχανές, είναι υπεύθυνη για την πλειονότητα των μηχανικών δυσλειτουργιών. Δυστυχώς, η ανάλυση των κραδασμών αυτού του είδους είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, γιατί στη συχνότητα που αντιστοιχεί σε αυτές, εμφανίζονται και άλλες πολλές βλάβες. Οπότε προκύπτει ένα δίλημμα, όσον αφορά την παρατήρηση μίας και μόνο συχνότητας αφού είναι

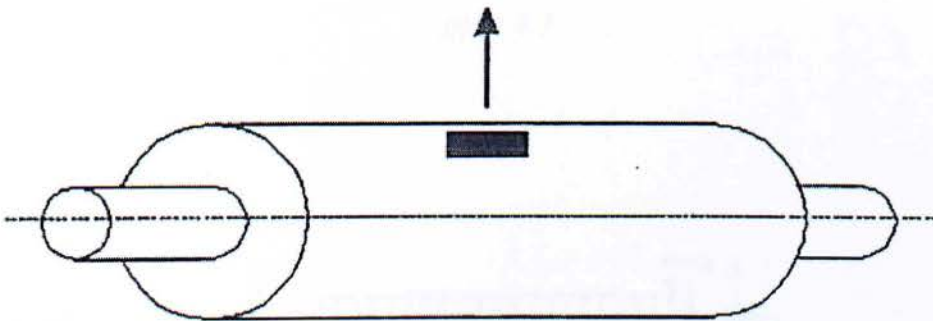
δύσκολο να εξάγουμε σίγουρα συμπεράσματα, παρατηρώντας την αύξηση του πλάτους των κραδασμών στη συχνότητα αυτή.

## 4.2 Αζυγοσταθμία

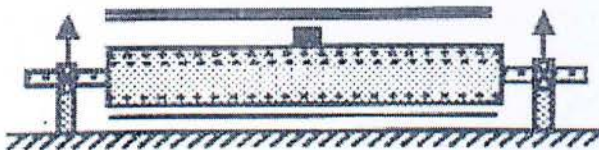
Η αζυγοσταθμία είναι κοινώς αποδεκτό ότι αποτελεί την αιτία για τουλάχιστον τις μισές από τις μηχανικές βλάβες. Θα λέμε ότι έχουμε αζυγοσταθμία, όταν ο κεντροβαρικός άξονας ενός άξονα δε συμπίπτει με το γεωμετρικό άξονα συμμετρίας αυτού. Υπάρχουν 3 είδη αζυγοσταθμίας: η στατική, η αζυγοσταθμία βάσης και η δυναμική αζυγοσταθμία, η οποία είναι ο συνδυασμός των άλλων δύο.

### Στατική αζυγοσταθμία

Σε αυτού του είδους την αζυγοσταθμία, εμπλέκεται μόνο μία δύναμη. Ονομάζεται στατική, γιατί είναι εμφανής ακόμα και όταν ο ρότορας βρίσκεται σε ακινησία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της περίπτωσης, εμφανίζονται στα σχήματα 4.1 και 4.2.



Σχήμα 4.1

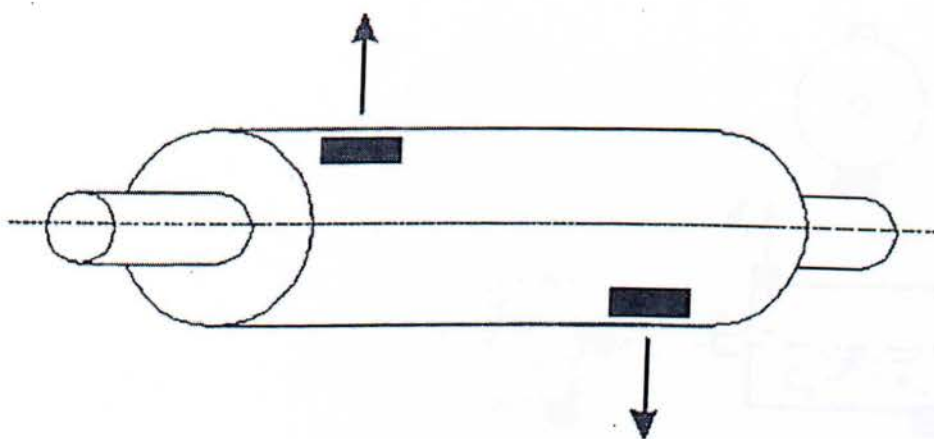


Σχήμα 4.2

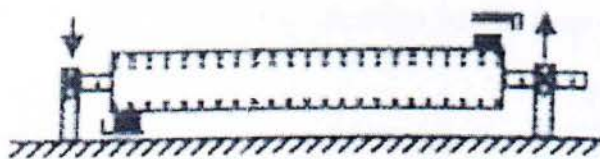
### Αζυγοσταθμία βάσης

Αντίθετα με τη στατική αζυγοσταθμία, η αζυγοσταθμία βάσης δεν είναι αντιληπτή όταν ο ρότορας είναι ακίνητος. Σε αυτήν την περίπτωση, δύο ίσες και αντίθετες

δυνάμεις (βάρη), όπως στα σχήματα 4.3 και 4.4, εφαρμόζονται στον άξονα σε σημεία όπως φαίνεται και στα σχήματα, δίνοντάς μας την εντύπωση ότι ο άξονας είναι πλήρως ζυγοσταθμισμένος, όταν είναι ακίνητος. Όταν όμως αυτός περιστρέφεται, οι δυνάμεις αυτές τείνουν να τον μετακινήσουν σε αντίθετες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα ο άξονας να κινείται ασταθώς (ταλαντώνεται) και τελικά να έχουμε ενδείξεις με διαφορά φάσης  $180^\circ$  από τις δύο άκρες του.



Σχήμα 4.3



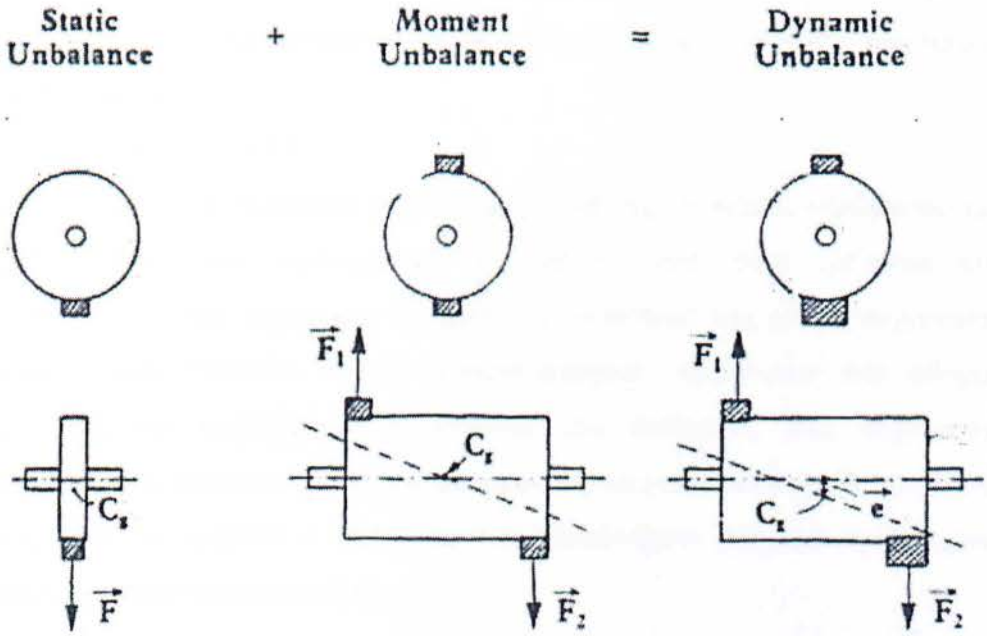
Σχήμα 4.4

#### Δυναμική αζυγοσταθμία

Στην πράξη η αζυγοσταθμία που εμφανίζεται στις περισσότερες περιστρεφόμενες μηχανές, είναι δυναμικού τύπου, δηλαδή ένας συνδυασμός στατικής αζυγοσταθμίας και αζυγοσταθμίας βάσης. Στις απλούστερες μηχανές, συνήθως εμφανίζεται



περισσότερη στατικού τύπου αζυγοσταθμία, ενώ στις πιο σύνθετες μηχανές, η αζυγοσταθμία βάσης είναι πιο συχνή. Στο σχήμα 4.5, εμφανίζεται γραφικά ένα παράδειγμα δυναμικής αζυγοσταθμίας και πώς αυτή προκύπτει από το συνδυασμό των δύο άλλων τύπων της ζυγοστάθμισης.



Σχήμα 4.5

Κατά τη ζυγοστάθμιση των μηχανών, ασχολούμαστε πρώτα με τη στατική αζυγοσταθμία και εν συνεχεία με την αζυγοσταθμία βάσης, στην οποία εργαζόμαστε σε πολλαπλά επίπεδα.

#### 4.2.1 Αιτίες αζυγοσταθμίας

Η αζυγοσταθμία μπορεί να προκληθεί από πολυάριθμους παράγοντες, όπως για παράδειγμα η ακατάλληλη κατασκευή της μηχανής, ή η προσθήκη εξαρτημάτων στη μηχανή χωρίς πρόνοια για τη διαδικασία ζυγοστάθμισης που πρέπει να ακολουθήσει την τοποθέτηση των εξαρτημάτων.

#### 4.2.2 Συνέπειες της αζυγοσταθμίας

Η αζυγοσταθμία συνήθως έχει ως αποτέλεσμα τη δυναμική φόρτιση των ρουλεμάν, πέραν των λειτουργικών τους ορίων, με συνέπεια την αστοχία τους λόγω κόπωσης. Η κόπωση αυτή είναι το αποτέλεσμα της άμεσης επιβολής φορτίων κάτω από τις

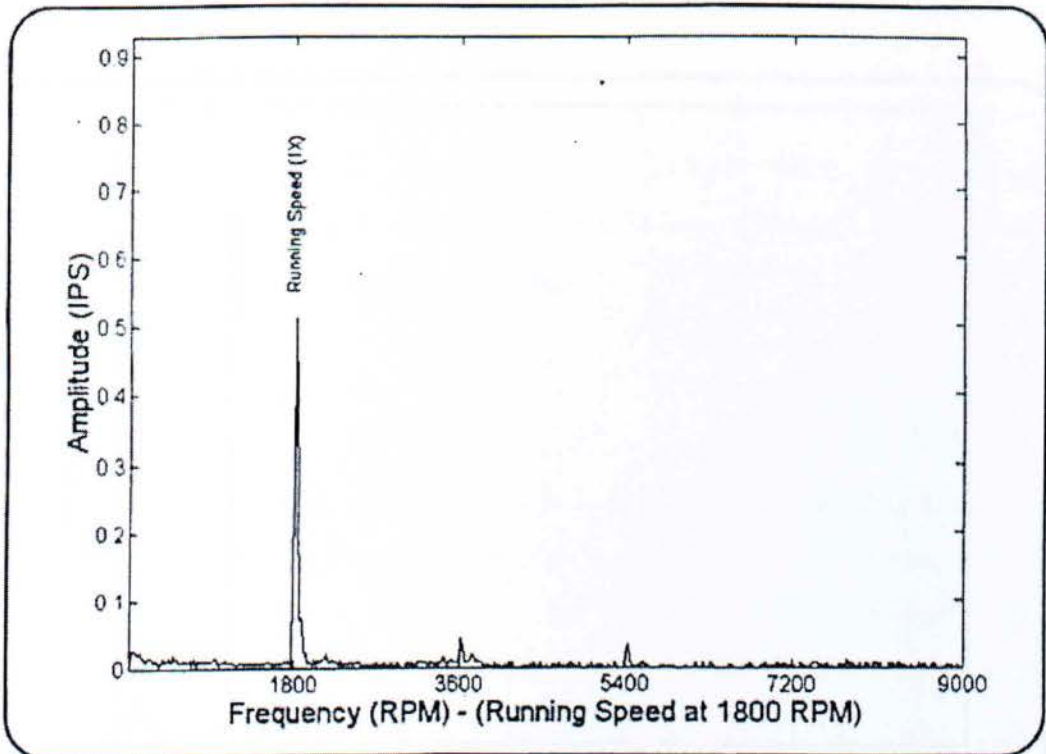
επιφάνειες οι οποίες φέρουν τα φορτία και διαπιστώνεται όταν σχηματίζονται θρύψαλα στις μεταλλικές επιφάνειες.

### 4.2.3 Διάγνωση της αζυγοσταθμίας

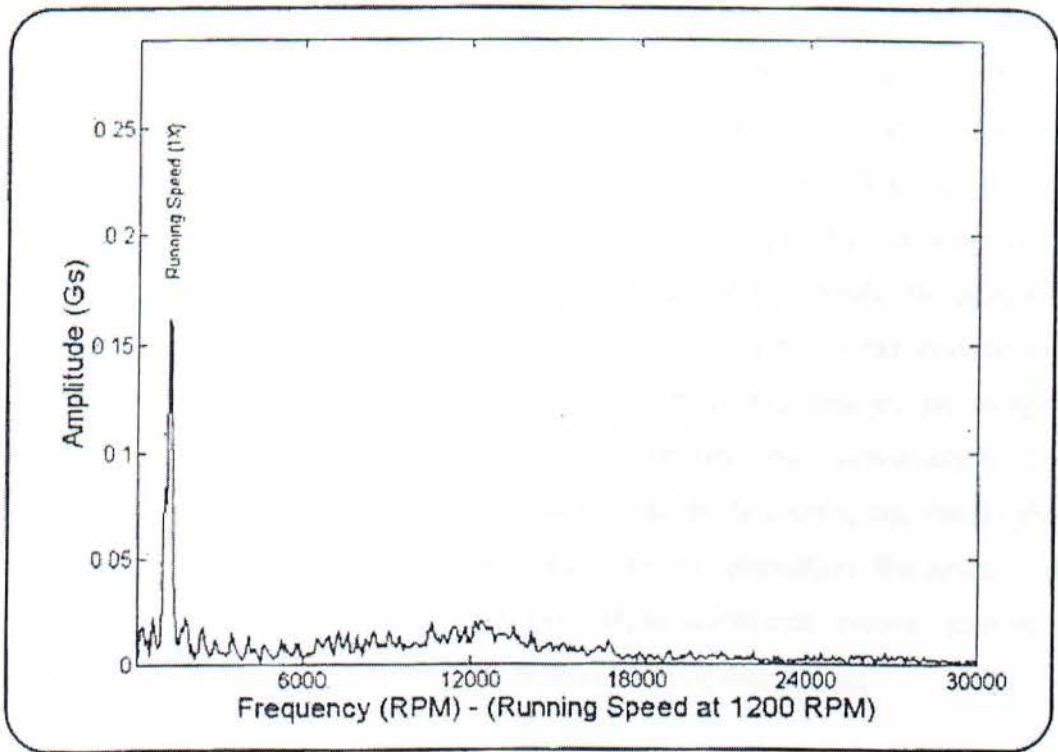
Για τη διάγνωση αυτού του τύπου βλάβης των περιστρεφόμενων μηχανών, χρησιμοποιούμε κάποιες από τις μεθόδους που έχουμε ήδη αναφέρει. Συγκεκριμένα: παρακολούθηση του ολικού επιπέδου κραδασμών, το φάσμα κατά FFT και τέλος, μετρήσεις της φάσης.

#### 4.2.3.1 Ανάλυση φάσματος FFT

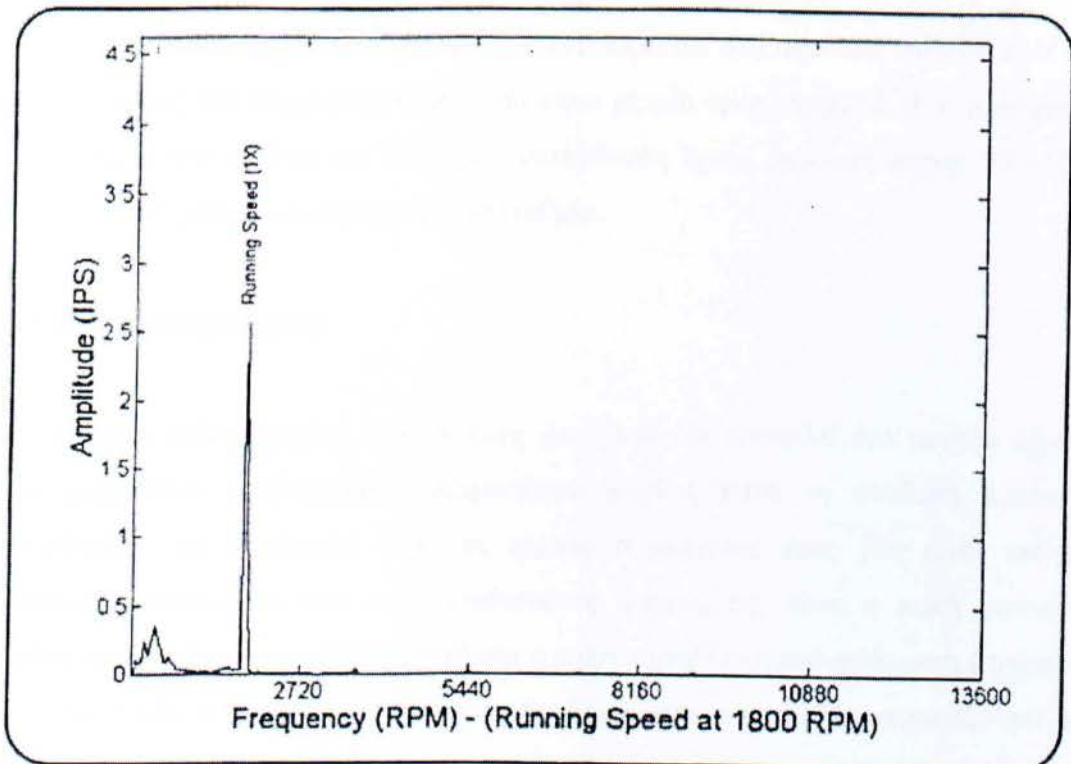
Τυπικά η αζυγοσταθμία, προκαλεί φυγόκεντρες δυνάμεις, οι οποίες στρέφονται με την ταχύτητα του άξονα περιστροφής. Οι προβολές τους στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα είναι αρμονικές δυνάμεις, με συχνότητα ίση με τη συχνότητα περιστροφής. Κατά συνέπεια, τυπικά η αζυγοσταθμία εκδηλώνεται στο φάσμα κραδασμών με την αύξηση της συνιστώσας του φάσματος, στη συχνότητα περιστροφής στον οριζόντιο και στον κατακόρυφο άξονα (ακτινική κατεύθυνση στην περίπτωση μας). Τα σχήματα 4.6, 4.7 και 4.8, απεικονίζουν φάσματα κραδασμών στην τυπική περίπτωση αζυγοσταθμίας.



Σχήμα 4.6



Σχήμα 4.7



Σχήμα 4.8



Οι κραδασμοί λοιπόν που δημιουργούνται στη μηχανή λόγω της ύπαρξης «καθαρής» αζυγοσταθμίας, εντοπίζονται στη συχνότητα που αντιστοιχεί στην ταχύτητα περιστροφής και είναι ημιτονοειδείς κυματομορφές. Στο φάσμα FFT, εμφανίζονται όπως προείπαμε στη συχνότητα αυτή, ως κορυφές με μεγαλύτερο πλάτος από το φυσιολογικό. Οι άλλοι τύποι βλαβών δημιουργούν συνήθως κορυφές στο φάσμα και σε αρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας περιστροφής, οπότε όταν παρατηρούμε στο φάσμα FFT κορυφή μόνο στη θεμελιώδη συχνότητα κορυφής και με αυξημένο πλάτος, έχουμε μία ισχυρότατη ένδειξη ότι πρόκειται για αζυγοσταθμία. Στην περίπτωση όμως που παρατηρήσουμε κορυφές και σε αρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας, μπορούμε γενικά να αποκλείσουμε την αζυγοσταθμία. Θα πρέπει όμως να έχουμε υπόψη μας ότι όταν η αζυγοσταθμία αυξάνεται έντονα, μπορεί να εμφανιστούν κορυφές και σε αρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας.

#### 4.2.4 Οδηγός διάγνωσης της αζυγοσταθμίας

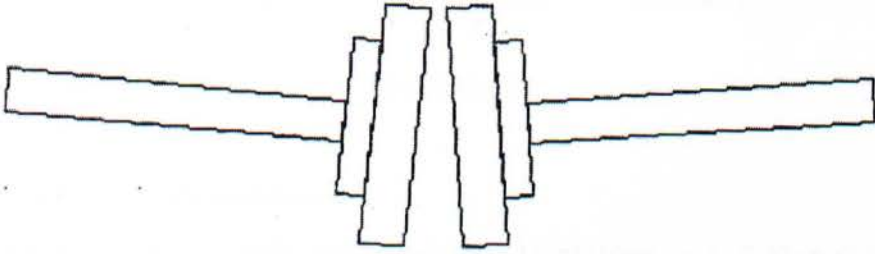
- Ύπαρξη αυξημένου πλάτους κατά την κατακόρυφη (δηλαδή την ακτινική) μέτρηση στη συχνότητα που αντιστοιχεί στην ταχύτητα περιστροφής της μηχανής *KAI* ύπαρξη αρμονικών μικρότερων του 15% της θεμελιώδους, *TOTE* πιθανότατα υπάρχει αζυγοσταθμία.
- Αν η πλειοψηφία των κραδασμών εντοπίζονται στο ακτινικό επίπεδο *KAI* το πλάτος στη θεμελιώδη συχνότητα είναι μέτριο προς υψηλό *KAI* οι μετρήσεις κατά την κάθετη και οριζόντια κατεύθυνση έχουν διαφορά φάσης  $90^{\circ} \pm 30^{\circ}$ , *TOTE* μπορεί να υπάρχει αζυγοσταθμία.

### 4.3 Κακή ευθυγράμμιση

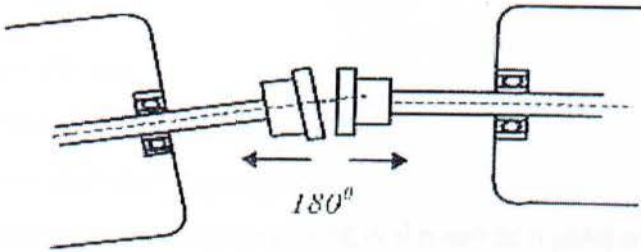
Η κακή ευθυγράμμιση, είναι κοινώς αποδεκτό ότι προκαλεί ένα μεγάλο μέρος των μηχανικών προβλημάτων. Εμφανίζεται κυρίως κατά τη σύνδεση αξόνων, συνδέσμων, και ρουλεμάν, όταν οι άξονες συμμετρίας τους δεν είναι καλώς ευθυγραμμισμένοι. Οι δύο πιο συνηθισμένες μορφές της είναι η κακή γωνιακή ευθυγράμμιση (σχήματα 4.9 και 4.10) και η κακή παράλληλη ευθυγράμμιση (σχήματα 4.11 και 4.12), οι οποίες στις περισσότερες περιπτώσεις της πράξης, εμφανίζονται σε συνδυασμό.

### Κακή γωνιακή ευθυγράμμιση

Κακή γωνιακή ευθυγράμμιση συμβαίνει όταν 2 άξονες ενώνονται σε έναν σύνδεσμο με τέτοιο τρόπο, ώστε να ασκούνται καμπτικές δυνάμεις σε αυτούς.



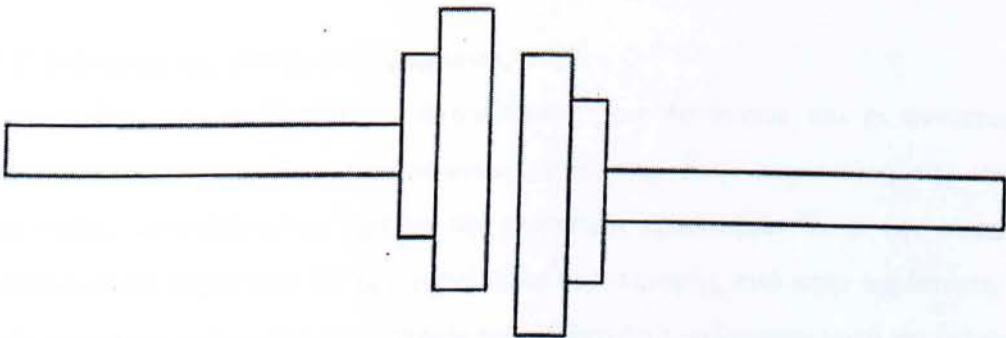
Σχήμα 5.9



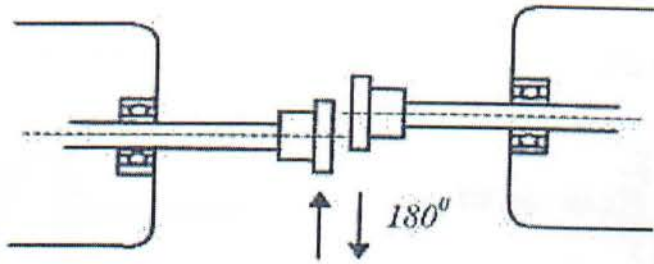
Σχήμα 4.10

### Κακή παράλληλη ευθυγράμμιση

Η κακή παράλληλη ευθυγράμμιση συμβαίνει όταν οι άξονες συμμετρίας των αξόνων είναι παράλληλοι μεν, αλλά σε απόσταση μεταξύ τους.



Σχήμα 4.11



Σχήμα 4.12

#### 4.3.1 Αιτίες κακής ευθυγράμμισης

Οι συνηθισμένες αιτίες οι οποίες προκαλούν κακή ευθυγράμμιση, είναι οι κάτωθι:

- Θερμική διαστολή του άξονα σε περιπτώσεις που η μηχανή αναπτύσσει υψηλές θερμοκρασίες
- Εσφαλμένη τοποθέτηση
- Επιβολή εξωτερικής φόρτισης στον άξονα
- Υποχώρηση των εδράσεων της μηχανής
- Δυνάμεις μεταφερόμενες στη μηχανή από σωληνώσεις ή μέλη στήριξης αυτής

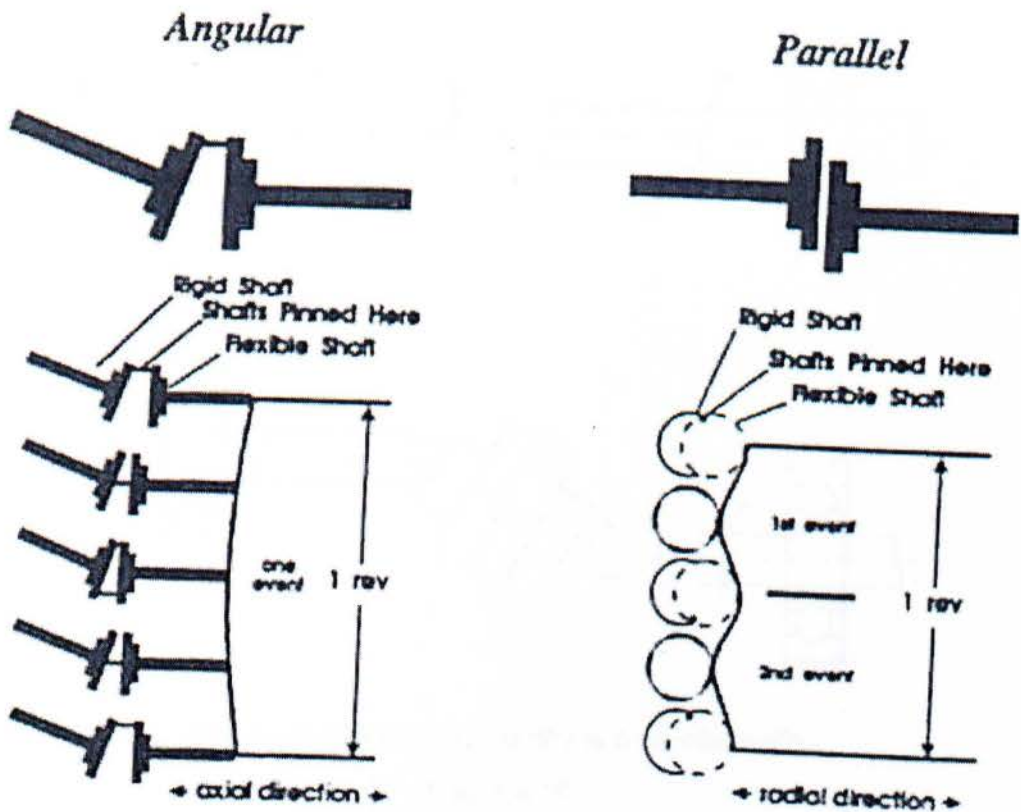
#### 4.3.2 Συνέπειες της κακής ευθυγράμμισης

Η κακή ευθυγράμμιση έχει ως συνέπεια συνήθως, το να δέχονται τα ρουλεμάν μεγαλύτερες φορτίσεις από αυτές που είναι σχεδιασμένα να δέχονται χωρίς πρόβλημα και τελικά να αστοχούν λόγω κόπωσης. Αν η κακή ευθυγράμμιση λοιπόν παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα, οι μεταβολές του φάσματος πέρα από τις ενδείξεις της κακής ευθυγράμμισης, συνοδεύονται και από ανάλογες ενδείξεις βλάβης των ρουλεμάν.

#### 4.3.3 Διάγνωση της κακής ευθυγράμμισης

Στο σχήμα 4.13, φαίνονται οι κατευθύνσεις των δυνάμεων και οι αντίστοιχες συχνότητες με τις οποίες καταπονούνται οι άξονες. Στην περίπτωση της κακής παράλληλης ευθυγράμμισης έχουμε την ανάπτυξη κραδασμών κατά την ακτινική κατεύθυνση σε συχνότητα  $2X$  της συχνότητας περιστροφής, ενώ στην περίπτωση της κακής γωνιακής ευθυγράμμισης έχουμε την ανάπτυξη κραδασμών κατά την αξονική κατεύθυνση σε συχνότητα  $1X$  της συχνότητας περιστροφής.

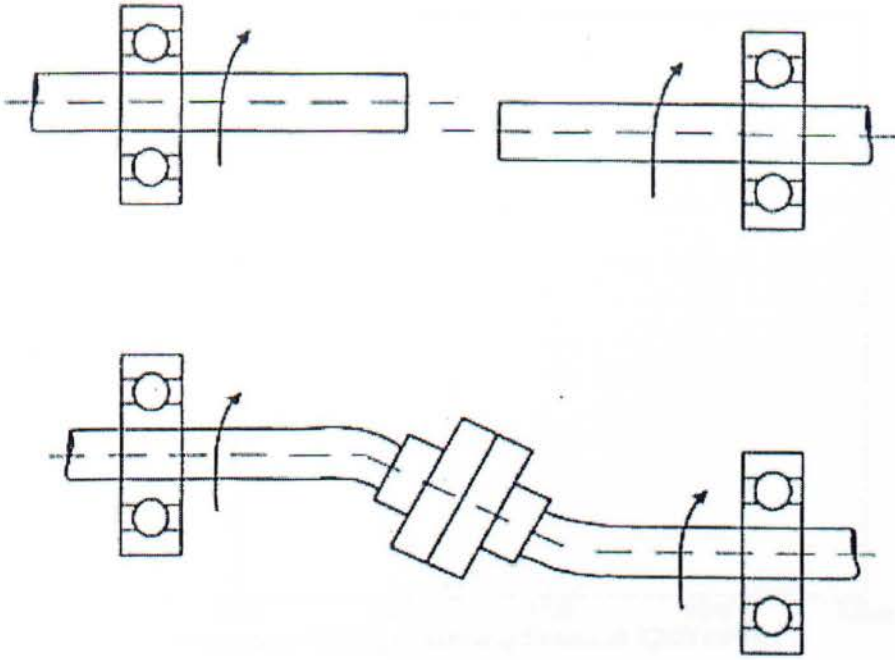




Σχήμα 4.13

Αφού οι περισσότερες περιπτώσεις κακής ευθυγράμμισης είναι συνδυασμός των 2 προαναφερθέντων τύπων αυτής, αναλύουμε τις μετρήσεις τόσο της ακτινικής, όσο και της αξονικής κατεύθυνσης σε συχνότητες 1X και 2X της θεμελιώδους.

Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να παρατηρήσουμε, ότι ενώ στην περίπτωση της αζυγοσταθμίας οι δυνάμεις ήταν ίδιες τόσο κατά την κατακόρυφη όσο και κατά την οριζόντια κατεύθυνση, στην περίπτωση της κακής ευθυγράμμισης, οι δυνάμεις είναι σπανίως οι ίδιες και κατά τις 2 κατευθύνσεις. Ο μηχανισμός δημιουργίας τους στην περίπτωση αυτή, φαίνεται στο σχήμα 4.14.



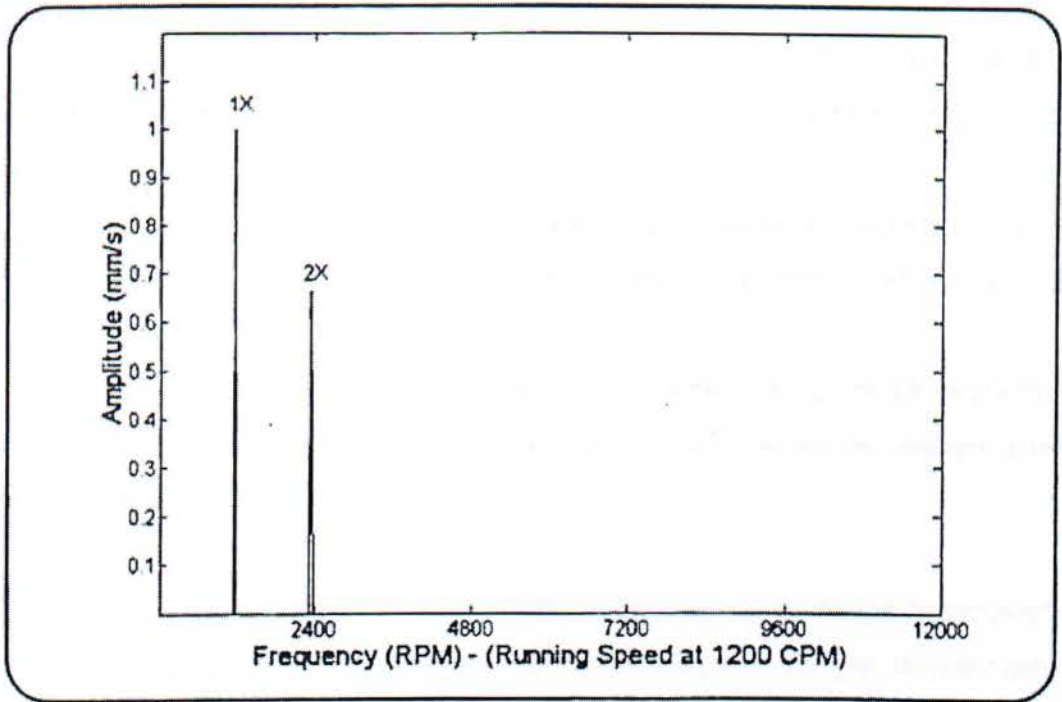
*Άξονες σε περιστροφή ελεύθεροι ή με σύμπλεξη*

*Σχήμα 4.14*

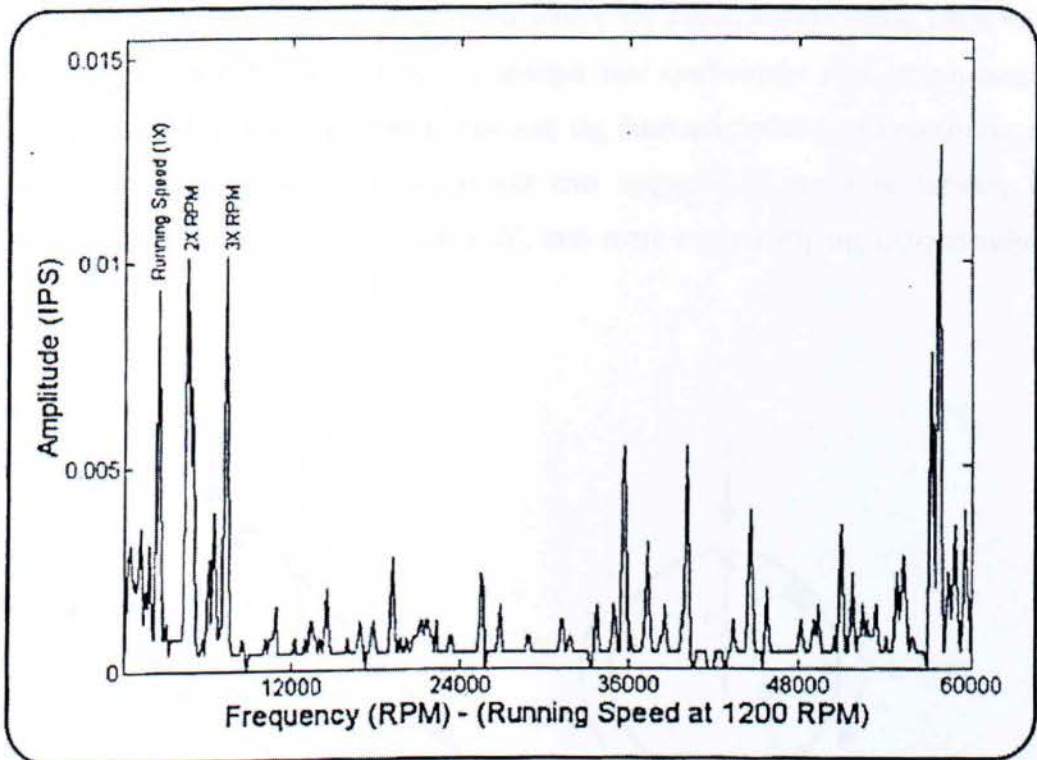
Και στην περίπτωση της κακής ευθυγράμμισης, χρησιμοποιούμε τις ίδιες μεθόδους με αυτές στην περίπτωση της αζυγοσταθμίας για να διαγνώσουμε την ύπαρξή της.

#### *4.3.3.1 Ανάλυση φάσματος FFT*

Χαρακτηριστικό των φασμάτων κραδασμών που προέρχονται από τυπικές περιπτώσεις κακής ευθυγράμμισης, είναι η εμφάνιση ομάδας αρμονικών συνιστωσών βασικά στην πρώτη και στη δεύτερη αρμονική της συχνότητας περιστροφής στην ακτινική κατεύθυνση, συνοδευόμενες επίσης από ισχυρές αξονικές συνιστώσες. Τυπικά φάσματα κραδασμών προερχόμενα από κακή ευθυγράμμιση, φαίνονται στα σχήματα 4.15 και 4.16.



Σχήμα 4.15



Σχήμα 4.16



#### 4.3.4 Οδηγός διάγνωσης της κακής ευθυγράμμισης

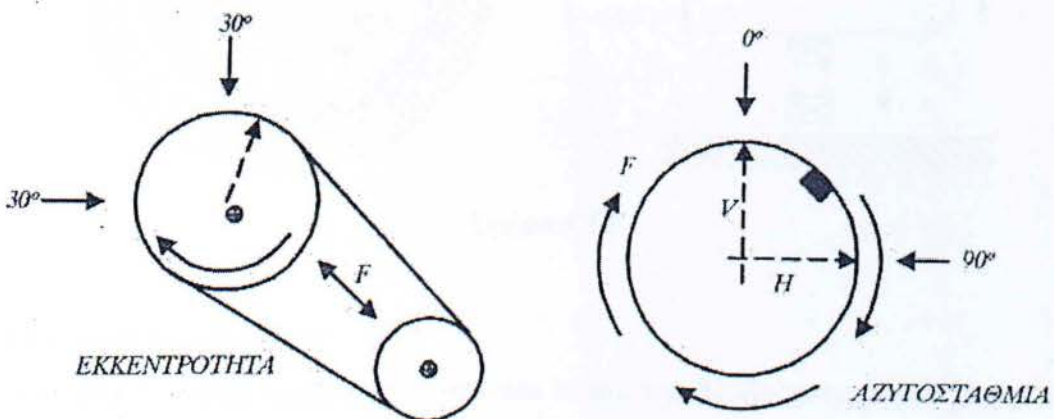
- Ύπαρξη έντονης αύξησης του πλάτους στις συχνότητες 1X και 2X ΚΑΙ ύπαρξη συνδέσμου ή μιάνας στη μηχανή ΣΥΝΕΠΙΑΓΕΤΑΙ την πιθανότητα ύπαρξης κακής ευθυγράμμισης.
- Αν το πλάτος έχει αυξηθεί έντονα κατά την ακτινική κατεύθυνση στη 2X συχνότητα ΚΑΙ υπάρχει σύνδεσμος ή μιάνας στη μηχανή, ΤΟΤΕ μπορεί να υπάρχει κακή ευθυγράμμιση.

Αν το πλάτος έχει αυξηθεί έντονα κατά την αξονική κατεύθυνση στη 1X συχνότητα ΚΑΙ υπάρχει σύνδεσμος ή μιάνας στη μηχανή, ΤΟΤΕ μπορεί να υπάρχει κακή ευθυγράμμιση.

#### 4.4 Εκκεντρότητα

Η εκκεντρότητα παρατηρείται όταν το κέντρο βάρους και το κέντρο περιστροφής ενός στοιχείου μηχανής δεν ταυτίζονται, αλλά απέχουν. Αν το συγκεκριμένο περιστρεφόμενο στοιχείο είναι μικρό σε μέγεθος, τότε η προκαλούμενη δύναμη θα έχει ανεπαίσθητα αποτελέσματα. Αν όμως το προς εξέταση στοιχείο είναι μεγάλο σε μέγεθος ή είναι πολύ βασικό για τη εύρυθμη λειτουργία της μηχανής, τότε η ύπαρξη εκκεντρότητας σε αυτό μπορεί να αποτελέσει σημαντικό πρόβλημα.

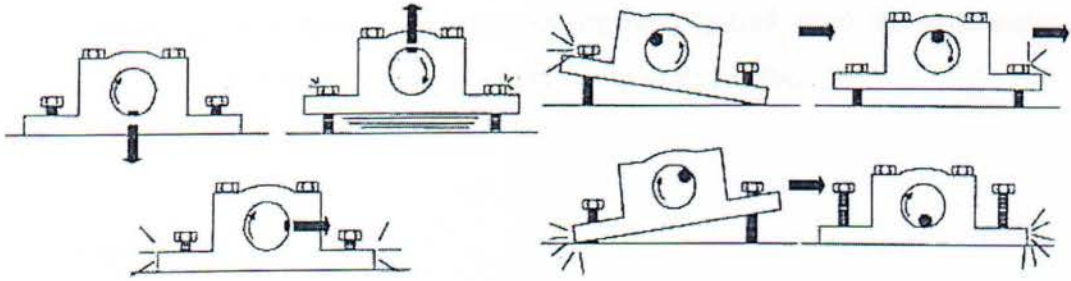
Επειδή και η εκκεντρότητα προκαλεί μετατόπιση του άξονα περιστροφής, όπως και η αζυγοσταθμία, οι εκδηλώσεις τους στο φάσμα των κραδασμών είναι παρόμοιες. Η διάκρισή τους γίνεται με πρόσθετη ανάλυση της διαφοράς φάσης στο οριζόντια και κατακόρυφο επίπεδο. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.27, στην περίπτωση της εκκεντρότητας, η διαφορά φάσης είναι  $0^\circ$ , ενώ στην περίπτωση της αζυγοσταθμίας είναι  $90^\circ$ .



Σχήμα 4.27

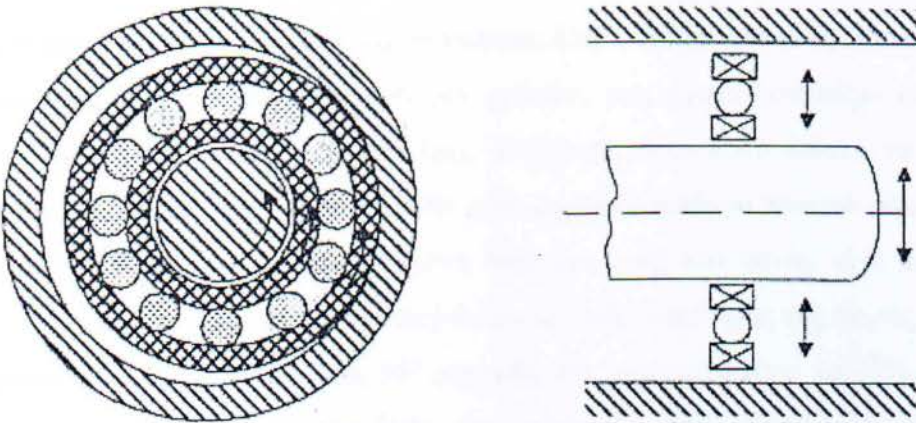
## 4.5 Χαλαρότητα

Η χαλαρότητα είναι στην ουσία το εσφαλμένο «συνταίριασμα» μεταξύ των διαφόρων στοιχείων της μηχανής. Παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία στις μορφές εμφάνισής της. Για παράδειγμα, στο *σχήμα 4.18*, φαίνεται η χαλαρότητα στη σύνδεση μιας μηχανής με τη βάση της, με αποτέλεσμα την ύπαρξη τριβών και κρούσεων.



*Σχήμα 4.18*

Αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο *σχήμα 4.19*, η εσφαλμένη τοποθέτηση ή η φθορά ενός ρουλεμάν, προκαλεί κρούσεις και τριβές, τόσο στην κατεύθυνση περιστροφής του άξονα, όσο και στην ακτινική κατεύθυνση.



*Σχήμα 4.19*

### 4.5.1 Αιτίες χαλαρότητας

Οι πιθανές αιτίες εμφάνισης αυτού του τύπου της βλάβης στις περιστρεφόμενες μηχανές, είναι οι κάτωθι:



- Χαλαρότητα στη σύνδεση της μηχανής με τη βάση της.
- Κάποιο στοιχείο της μηχανής να παρουσιάζει χαλαρότητα.
- Κάποιο σφάλμα σε ρουλεμάν το οποίο φθείρει τα στοιχεία κύλισης αυτού, ή τη «φωλιά» του.

#### 4.5.2 Συνέπειες της χαλαρότητας

- Αν η χαλαρότητα σχετίζεται με τα ρουλεμάν, έχουμε τις ίδιες συνέπειες με αυτές που έχουν ήδη αναφερθεί στην περίπτωση της αζυγοσταθμίας, μόνο που σε αυτήν την περίπτωση είναι πολύ πιο έντονες.
- Αν οφείλεται σε κάποιο άλλο στοιχείο μηχανής, τελικά αυτό θα αποσπαστεί, προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο και δευτερεύουσες βλάβες.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### ΒΛΑΒΕΣ ΚΑΙ ΦΘΟΡΕΣ ΡΟΥΛΕΜΑΝ

#### 5.1 Διάρκεια ζωής των ρουλεμάν

Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής των ένσφαιρων τριβέων ορίζεται ως ο αριθμός των περιστροφών (ή ο αριθμός των ωρών λειτουργίας τους υπό σταθερή ταχύτητα) που μπορούν να κάνουν, μέχρι να εμφανιστούν τα πρώτα σημάδια κόπωσης (θρυμματισμός ή απολέπιση) σε στοιχεία κύλισης ή σε κάποιον από τους δακτυλίους.

Εργαστηριακά πειράματα και η εμπειρία χρόνων, μας έχουν αποδείξει ότι ίδια ρουλεμάν τα οποία λειτουργούν στις ίδιες συνθήκες, είναι πολύ πιθανό να έχουν διαφορετική διάρκεια ζωής. Όταν το 10% ενός μεγάλου αριθμού τέτοιων ρουλεμάν, εμφανίσει σημεία κόπωσης από ορισμένη διάρκεια ζωής και πάνω, τότε αυτός ο αριθμός στροφών ονομάζεται *ονομαστική διάρκεια ζωής* ολόκληρης της σειράς αυτών των ομοίων ρουλεμάν, δηλαδή  $L_{10} \cdot 10^6$  στροφές, στις οποίες αντέχει το 90% αυτών των ρουλεμάν. Η μέση διάρκεια ζωής των ρουλεμάν είναι συνήθως 5 φορές η ονομαστική διάρκεια ζωής τους. Ένα έδρανο με ονομαστική διάρκεια ζωής  $L_{10} \cdot 10^6$

στροφές, έχει διάρκεια ζωή σε ώρες λειτουργίας  $L_n = \frac{L_{10} \cdot 10^6}{60 \cdot n}$ , όπου:

$L_{10}$  = η ονομαστική διάρκεια ζωής σε  $10^6$  περιστροφές

$n$  = ο αριθμός στροφών ανά πρώτο λεπτό (RPM)



Το σταθερό φορτίο  $C$  ενός εδράνου, για το οποίο η ονομαστική διάρκεια ζωής είναι  $10^6$  στροφές (δηλαδή  $L_{10} = 1$ ) ή  $L_h = 500$  ώρες λειτουργίας σε  $n = 100/3$  RPM, λέγεται *αριθμός δυναμικής αντοχής ή δυναμική ικανότητα φόρτισης*.

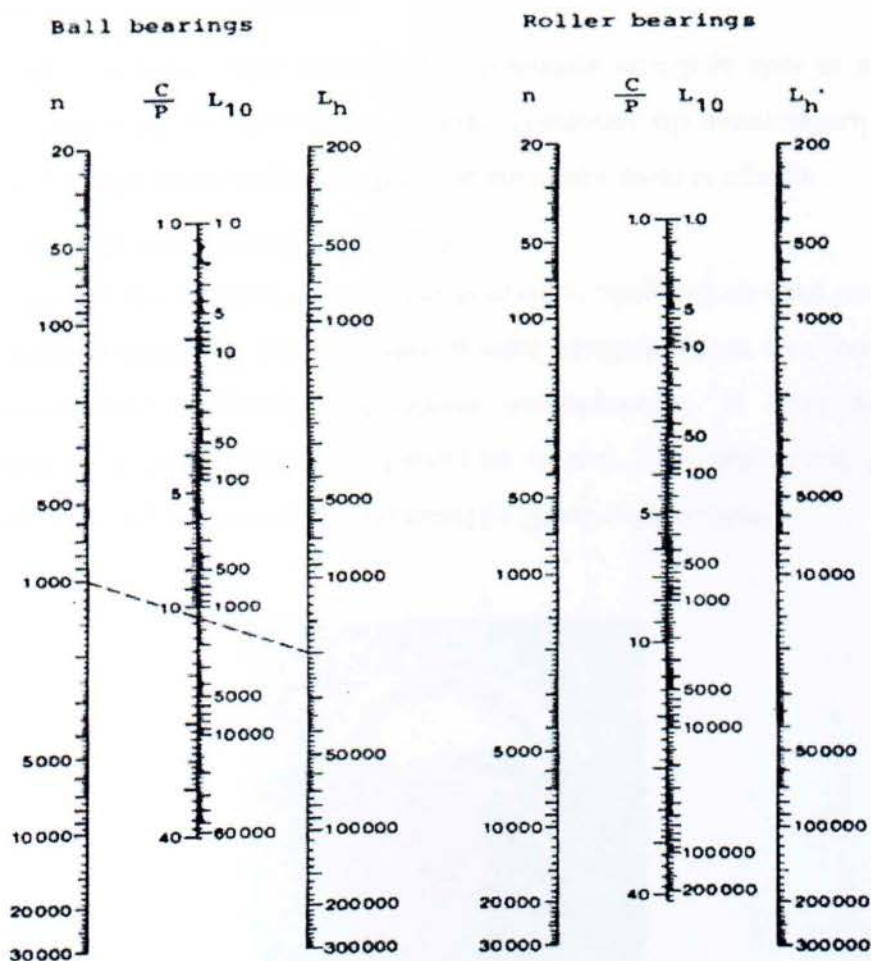
Εάν  $P$  είναι το ισοδύναμο φορτίο του εδράνου, όπως αυτό προκύπτει από τον συνδυασμό του εγκάρσιου και αξονικού φορτίου, ισχύει ότι  $L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^k$ , όπου:

$k = 3$  για ρουλεμάν με σφαιρικά στοιχεία κύλισης

$k = 10/3$  για όλα τα άλλα ρουλεμάν

Στο σχήμα 6.1, δίνονται τα  $n$ ,  $C/P$ ,  $L_{10}$  και  $L_h$  για διάφορα ρουλεμάν.

Διάρκεια ζωής εδράνων



$n$  (rpm)  
 $L_{10}$  (σε  $10^6$  περιστροφών)  
 $L_h$  (σε ώρες λειτουργίας)

Σχήμα 6.1

Αν ληφθούν υπόψη οι διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την πραγματική διάρκεια ζωής  $L$  του ρουλεμάν (φθορά, υλικό, συνθήκες λειτουργίας) τότε με βάση την νέα θεωρία διάρκειας ζωής θα είναι  $L = a_1 a_2 a_3 L_{10}$ , όπου:

$a_1$  = συντελεστής εμπιστοσύνης

$a_2$  = συντελεστής υλικού

$a_3$  = συντελεστής συνθηκών λειτουργίας

Για την ανωτέρω ορισθείσα ονομαστική διάρκεια ζωής και για κανονικές συνθήκες λειτουργίας, ισχύει:  $a_1 = a_2 = a_3 = 1$

Τιμές των συντελεστών αυτών για οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, δίδονται κατά ISO.

## 5.2 Αιτίες αστοχίας των ρουλεμάν

Στην πράξη, ένα πολύ μικρό ποσοστό των ρουλεμάν αστοχούν πριν το πέρας της διάρκειας ζωής τους. Τα περισσότερα μάλιστα, ξεπερνούν την αναμενόμενη διάρκεια ζωής τους. Οι κυριότερες αιτίες αστοχίας των ρουλεμάν, είναι οι κάτωθι:

### Κακό μοντάρισμα – μεταχείριση (σχήμα 6.2)

Το 16% περίπου της πρόωρης φθοράς των ρουλεμάν, οφείλεται σε κακό μοντάρισμα (χρήση σφυριού απευθείας στο ρουλεμάν) ή κακή μεταχείριση και είναι επακόλουθο της έλλειψης των κατάλληλων εργαλείων μονταρίσματος. Η ορθή διαδικασία μονταρίσματος ή ξεμονταρίσματος, μπορεί να απαιτεί κατά περίπτωση, μεθόδους μηχανικής ή υδραυλικής άρμωσης ή άρμωσης με χρήση θερμαντήρων.



Σχήμα 6.2

### Ελλιπής λίπανση (σχήμα 6.3)

Παρόλο που τα ρουλεμάν κλειστού τύπου δεν χρειάζονται λίπανση μετά την αρχική τοποθέτηση, περίπου ένα 36% της πρόωρης φθοράς των ρουλεμάν, οφείλεται στην κακή επιλογή λιπαντικού και στην λανθασμένη ποσότητα λίπανσης. Αναπόφευκτα, οποιοδήποτε ρουλεμάν δεν λιπαίνεται σωστά, καταστρέφεται πολύ γρηγορότερα από την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του. Επειδή τα ρουλεμάν είναι συνήθως μέρη της εφαρμογής με δύσκολη πρόσβαση, η αμέλεια στη λίπανση, συνήθως, επιτείνει το πρόβλημα. Στις περιπτώσεις που η λίπανση δεν είναι δυνατή χειρωνακτικά, υπάρχουν πλήρως αυτοματοποιημένα συστήματα λίπανσης, που εξασφαλίζουν αποτελεσματική λίπανση της εφαρμογής.



**Σχήμα 6.3**

### Ξένα σώματα (σχήμα 6.4)

Το ρουλεμάν είναι ένα προϊόν υψηλής ακρίβειας, που λειτουργεί αποτελεσματικά μόνο όταν το ίδιο και το συνεργαζόμενο λιπαντικό προστατεύονται από ξένα σώματα. Επειδή η ποικιλία των ρουλεμάν κλειστού τύπου καλύπτει μόνο ένα μικρό εύρος των μηχανολογικών εφαρμογών, τουλάχιστον ένα 14% της πρόωρης φθοράς των ρουλεμάν οφείλεται στην είσοδο ξένων σωμάτων στο χώρο λειτουργίας.



**Σχήμα 6.4**



### Υπερφόρτιση (σχήμα 6.5)

Όταν υπερφορτίζουμε, παραμελούμε ή συντηρούμε πλημμελώς τα μηχανήματα παραγωγής, τα ρουλεμάν καταπονούνται. Ένα 34% περίπου της πρόωρης φθοράς των ρουλεμάν, οφείλεται στους παραπάνω λόγους. Οι ξαφνικές ή απρόβλεπτες βλάβες θα μπορούσαν να αποφευχθούν, αφού τα ρουλεμάν που λειτουργούν κάτω από τέτοιες συνθήκες, εκπέμπουν από νωρίς «σήμα κινδύνου», το οποίο μπορεί να ανιχνευθεί και να ερμηνευθεί με τη χρήση ειδικών οργάνων μέτρησης και τεχνικών, εν ώρα λειτουργίας.



**Σχήμα 6.5**

### Κακή μεταχείριση

Θα πρέπει να προσέχουμε ιδιαίτερα τον τρόπο με τον οποίο μεταχειριζόμαστε και αποθηκεύουμε τα ρουλεμάν, γιατί διαφορετικά, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να προκαλέσουμε φθορές σε αυτά, πριν καν τοποθετηθούν στις όποιες εφαρμογές.

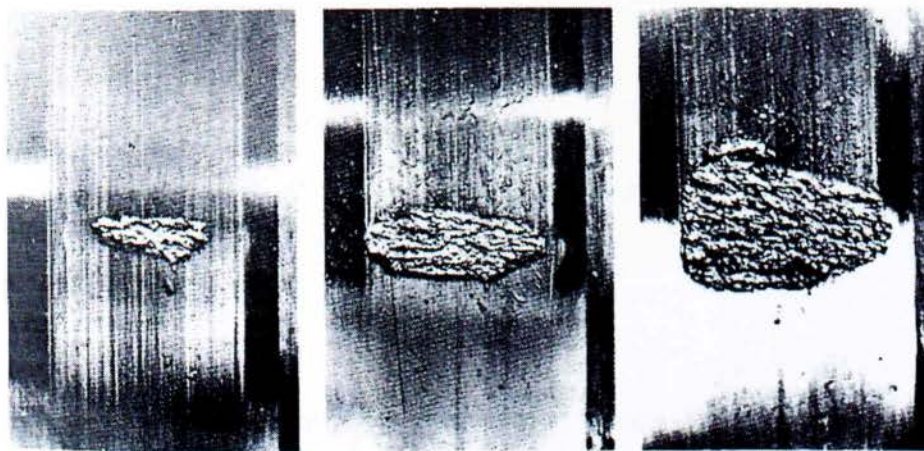
Η κάθε μία από αυτές τις αιτίες, προκαλεί την δικού της τύπου φθορά στο ρουλεμάν και τα «σημαδεύει» με μοναδικό τρόπο. Για τους λόγους αυτούς, κάθε φορά που ένα ρουλεμάν αστοχεί, θα πρέπει να εξετάζεται πολύ προσεκτικά για να εντοπίσουμε την αιτία της αστοχίας του και να προβούμε στις κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες με στόχο την αποφυγή επανάληψης αυτού του είδους της αστοχίας.

### **5.3 Ενδείξεις βλαβών στα ρουλεμάν**

Η χρονική περίοδος μέχρι την εμφάνιση της πρώτης ένδειξης ύπαρξης σφάλματος στο ρουλεμάν, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (ταχύτητα περιστροφής του ρουλεμάν, μέγεθος φόρτισης αυτού, λίπανση και την καθαρότητα αυτής). Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η κόπωση είναι το αποτέλεσμα διατμητικών τάσεων οι οποίες ασκούνται κυκλικά κάτω από την επιφάνεια φόρτισης των ρουλεμάν. Με την πάροδο

του χρόνου, οι τάσεις αυτές προκαλούν ρωγμές οι οποίες αναδύονται σταδιακά μέχρι την επιφάνεια. Καθώς τα στοιχεία κύλισης έρχονται σε επαφή με αυτές τις ρωγμές, προκαλούν το θρυμματισμό του μετάλλου, φαινόμενο που ονομάζεται θρυμματισμός ή απολέπιση. Η απολέπιση αυτή επιδεινώνεται με την πάροδο του χρόνου, καταλήγοντας κάποια στιγμή στην καταστροφή του ρουλεμάν.

Στα αρχικά στάδια, η απολέπιση είναι ελαφριάς μορφής. Στη συνέχεια όμως, λόγω της αύξησης των τάσεων στις άκρες και των θραυσμάτων που μεταφέρονται με το λιπαντικό, έχουμε επιδείνωση της απολέπισης. Η διαδικασία αυτή είναι χρονοβόρα και κάνει αισθητή την παρουσία της τόσο στα αυξημένα επίπεδα των κραδασμών, όσο και του θορύβου, οπότε μας παρέχει αρκετό χρόνο ώστε να αντικαταστήσουμε το ρουλεμάν, πριν την τελική του αστοχία. Στο σχήμα 6.6, εμφανίζονται τα στάδια εξέλιξης της απολέπισης.



Σχήμα 6.6

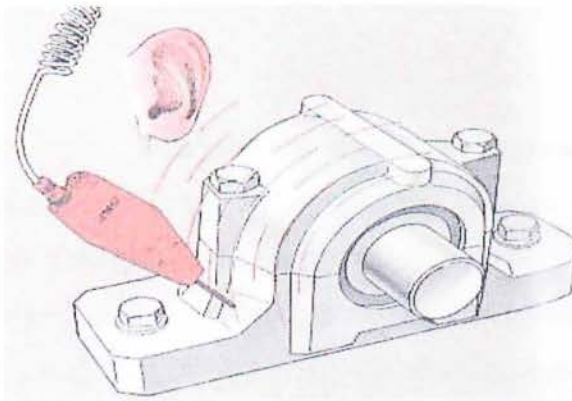
Βάσει των προαναφερθέντων, αντιλαμβανόμαστε τη σημασία της ολοκληρωμένης παρακολούθησης της λειτουργικής κατάστασης των μηχανών και κυρίως της λειτουργικής κατάστασης των ρουλεμάν, αφού αυτά αποτελούν ένα από τα βασικότερα στοιχεία όλων των περιστρεφόμενων μηχανών. Η πρακτική αυτή άλλωστε αποτελεί και τη θεμελιώδη λίθο της προβλεπτικής συντήρησης.

Υπάρχουν πολλών ειδών όργανα για την πραγματοποίηση αυτής της παρακολούθησης. Κάποια είναι ιδιαίτερος πολύπλοκα και εξελιγμένα, και κάποια άλλα όχι. Ο σωστός τρόπος παρακολούθησης της λειτουργικής κατάστασης των μηχανών, απαιτεί συνδυασμό και των δύο. Συγκεκριμένα, αναφερόμαστε στα κάτωθι:



### 5.3.1 Ακοή

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για τον εντοπισμό της ύπαρξης ενός μηχανικού προβλήματος ήταν και παραμένει να είναι, το να ακούμε τους θορύβους της μηχανής με ιδιαίτερη προσοχή. Με τη βοήθεια ειδικών οργάνων, «ακούμε» τους θορύβους της μηχανής και είμαστε σε θέση με αυτόν τον τρόπο να ανιχνεύσουμε σφάλματα εντός αυτής, όταν ακούσουμε ήχους οι οποίοι δεν ανταποκρίνονται στη φυσιολογική λειτουργική κατάσταση της μηχανής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι το «στρίγκλισμα» που ακούγεται όταν υπάρχει πρόβλημα με τα ρουλεμάν ή με τη λίπανση.



Σχήμα 5.7

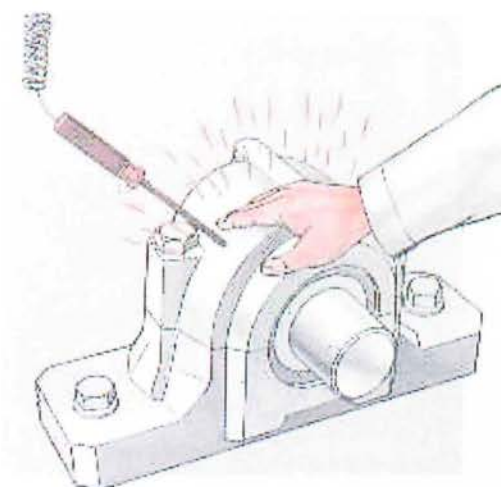
### 5.3.2 Αφή

Οι υψηλές θερμοκρασίες αποτελούν συχνά την ένδειξη για ύπαρξη βλάβης στα ρουλεμάν (ανεπαρκής ή υπερβολική λίπανση, ακαθαρσίες στο λιπαντικό, υπερφόρτιση κλπ). Επίσης η ύπαρξη υψηλών θερμοκρασιών από άλλες αιτίες, μπορεί να αποβεί μοιραία για τα ρουλεμάν, αφού επηρεάζουν πολύ έντονα τα λιπαντικά αλλοιώνοντας τις ιδιότητές τους.

Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν την σπουδαιότητα του τακτικού ελέγχου του επιπέδου των θερμοκρασιών σε ζωτικά σημεία της μηχανής, όπως είναι τα ρουλεμάν, αφού η μεταβολή αυτών αποτελεί ένδειξη για την ύπαρξη κάποιας δυσλειτουργίας. Δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ποτέ, ότι μετά από ενέργειες λίπανσης ή επαναλίπανσης, είναι φυσιολογικό να παρατηρήσουμε μία σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας, μέχρι αυτή να σταθεροποιηθεί στα φυσιολογικά επίπεδα.

Οι μετρήσεις μπορούν να γίνονται είτε με εξωτερικά όργανα, είτε με ενσωματωμένους στη μηχανή αισθητήρες.



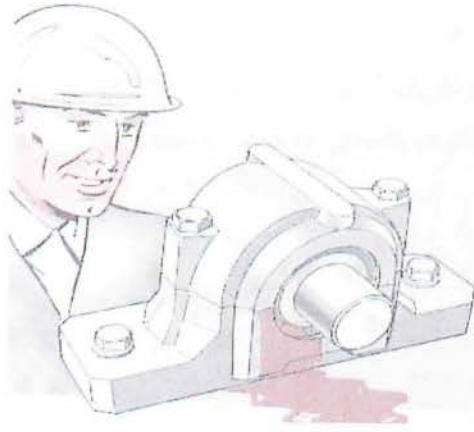


**Σχήμα 5.8**

### **5.3.3 Όραση**

Ρουλεμάν τα οποία έχουν λιπανθεί σωστά και προστατεύονται επαρκώς από ακαθαρσίες και υγρασία δεν θα πρέπει να φθαρούν. Παρόλα αυτά, είναι καλό να ελέγχουμε οπτικά τα ρουλεμάν όταν είναι ακάλυπτα καθώς και τα στεγανωτικά αυτών. Τα στεγανωτικά δεν θα πρέπει σε καμία περίπτωση να επιτρέπουν τη διείσδυση θερμών ή διαβρωτικών υγρών. Αν διαπιστώσουμε ότι κάτι τέτοιο δεν ισχύει, θα πρέπει να τα αντικαθιστούμε άμεσα. Τα στεγανωτικά θα πρέπει ακόμα να εξασφαλίζουν την παραμονή του λιπαντικού στο ρουλεμάν. Αν λοιπόν παρατηρήσουμε διαρροή λιπαντικού στις θέσεις αυτές, θα πρέπει να δράσουμε άμεσα. Η διαρροή αυτή αποτελεί συχνά την ένδειξη σφάλματος του λιπαντικού ή υπερβολικής λίπανσης του ρουλεμάν.

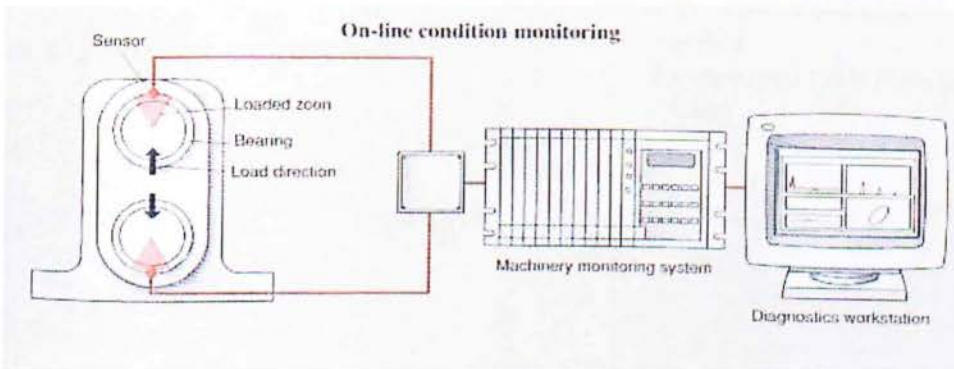
Θα πρέπει λοιπόν να ελέγχουμε τακτικά τα συστήματα λίπανσης των μηχανών για να διαπιστώνουμε ότι αυτά εφοδιάζουν τη μηχανή με την απαιτούμενη ποσότητα λιπαντικού και επίσης θα πρέπει να ελέγχουμε το χρώμα του λιπαντικού, γιατί αποχρωματισμός ή «μαύρισμα» αυτού, αποτελεί σήμα κινδύνου.



**Σχήμα 5.9**

### 5.3.4 Ανάλυση των κραδασμών

Έχουμε ήδη αναφερθεί εκτενέστατα στον τομέα αυτό της προβλεπτικής συντήρησης σε προηγούμενα κεφάλαια. Αξίζει όμως να τονίσουμε σε αυτό το σημείο, ότι η ανάλυση αυτή μπορεί να πραγματοποιείται είτε αποκομμένα σε κάθε μηχανή, είτε ως μέρος του συνολικού κυκλώματος παρακολούθησης των μηχανών της μονάδας, η οποία πραγματοποιείται σε «πραγματικό» χρόνο (σχήμα 5.10).



**Σχήμα 5.10**

### 5.4 Οδηγός επίλυσης εμφανιζόμενων προβλημάτων βάσει των λαμβανομένων ενδείξεων

Παρακολουθώντας λοιπόν τη λειτουργική κατάσταση των μηχανών με κάποιον από τους τρόπους, ή και με συνδυασμό αυτών, που έχουμε ήδη αναφέρει, λαμβάνουμε ποικίλες ενδείξεις οι οποίες υποδεικνύουν την ύπαρξη δυσλειτουργιών εντός των μηχανών. Ειδικά τα ρουλεμάν, όταν δυσλειτουργούν, συνήθως παρουσιάζουν παρόμοιες ενδείξεις χαρακτηριστικές για το είδος της βλάβης που έχουν υποστεί.

Όλοι οι κραδασμοί εμφανίζονται σε κάποια συγκεκριμένη συχνότητα, η γνώση της οποίας είναι χρήσιμη για την αντιμετώπιση του προβλήματος, κυρίως για τις βλάβες των ρουλεμάν. Οι συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται οι βλάβες σε ένα ρουλεμάν είναι :

$$BPFO = f_{outer} = \frac{n}{2} f_r \left( 1 - \frac{BD}{PD} \cos \phi \right) (\alpha)$$

$$BPFI = f_{inner} = \frac{n}{2} f_r \left( 1 + \frac{BD}{PD} \cos \phi \right) (\beta)$$

$$BSF = f_{ball} = f_r \frac{PD}{BD} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{BD}{PD} \cos \phi \right)^2 \right] (\gamma)$$

$$FTF = f_{cage} = \frac{1}{2} f_r \left( 1 - \frac{BD}{PD} \cos \phi \right) (\delta)$$

Συχνότητα διέλευσης σφαιρών στον εξωτερικό δακτύλιο (Ball Pass Frequency Outer race)

Συχνότητα διέλευσης σφαιρών στον εσωτερικό δακτύλιο (Ball Pass Frequency Inner)

Συχνότητα περιστροφής σφαιρών (Ball Spin Frequency)

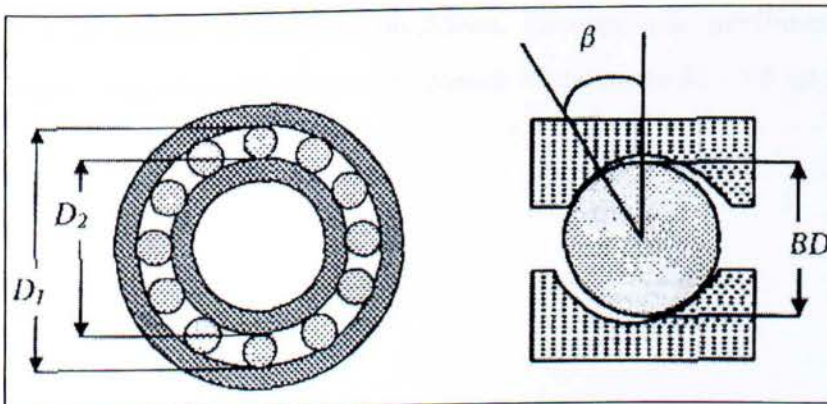
Συχνότητα περιστροφής κλωβού (Fundamental Train Frequency - Cage)

Σχέσεις 5.4 α,β,γ,δ

όπου :

n : αριθμός σφαιρών του ρουλεμάν

f<sub>r</sub> : συχνότητα περιστροφής άξονα του ρουλεμάν



$$PD = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

Σχήμα 5.4.Σ1



Στο σχήμα 5.4.Σ2 εικονίζεται ένα φάσμα αποδιαμορφωμένου σήματος χρονικού παραθύρου 200Hz ενός ρουλεμάν NSK 6911, το οποίο περιστρέφεται με 1715 RPM ( $f_r = 28,58\text{Hz}$ ). Το ρουλεμάν, το μοντάρισμά του, και η μηχανή κίνησης απεικονίζονται στο σχήμα 5.4.Σ3. Το επιταχυνσιόμετρο είναι τοποθετημένο σε κατακόρυφη διεύθυνση. Οι φέρουσες συχνότητες υπολογίζονται με χρήση των παραπάνω τύπων όπως αυτές ακολουθούν στον πίνακα 5.4.Π1.

<i>Κωδικός Ρουλεμάν</i>	<i>BPFO (Hz)</i>	<i>BPFI (Hz)</i>	<i>BSF (Hz)</i>	<i>FTF (Hz)</i>
NSK 6311	87,37	141,27	57,25	10,92

Πίνακας 5.4.Π1

Παρατηρούμε κυρίως τρεις πιο υψηλές αιχμές στις συχνότητες των 87,5Hz, 57Hz και 27Hz. Η συχνότητα  $f_{\text{cage}}$  (κλωβού) στα 10,92 Hz δεν εμφανίζεται πουθενά. Από αυτό, μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα με τον κλωβό του ρουλεμάν.

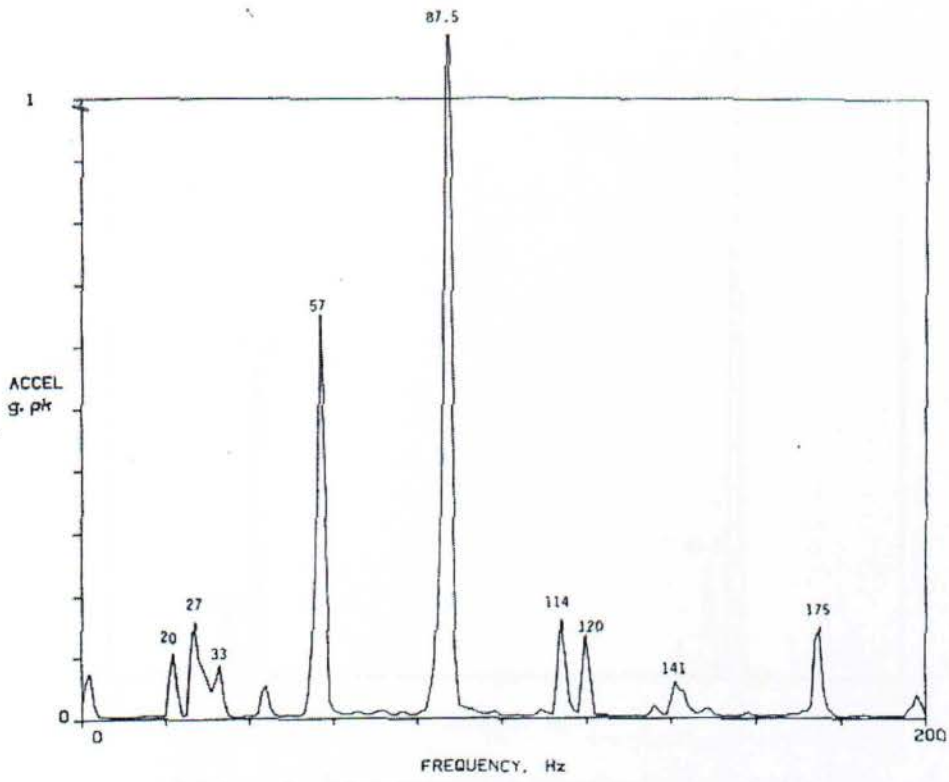
Οι συχνότητες στα 57 και 87,5 Hz, είναι πιθανώς οι συχνότητες BPFO και BSF, αλλά μπορούν να θεωρηθούν και αρμονικές της ταχύτητας :

$$f_r = 28,58 \text{ Hz}$$

$$2 * f_r = 57,16 \text{ Hz}$$

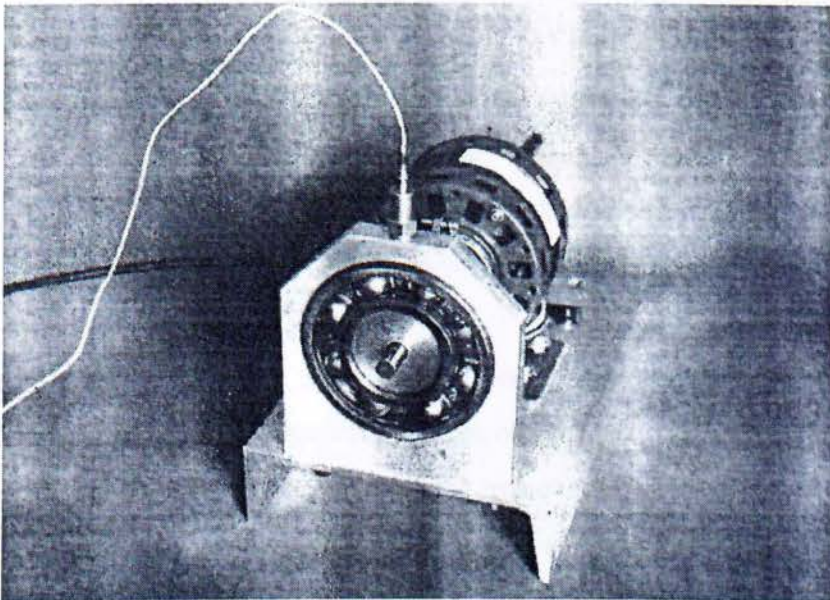
$$3 * f_r = 85,74 \text{ Hz} .$$

Για να δούμε τι ακριβώς συμβαίνει, κάνουμε μία μεγέθυνση στην εικόνα μας παίρνοντας τώρα ένα φάσμα σε χρονικό «παράθυρο» 48 – 98 Hz (σχήμα 5.4.Σ4).



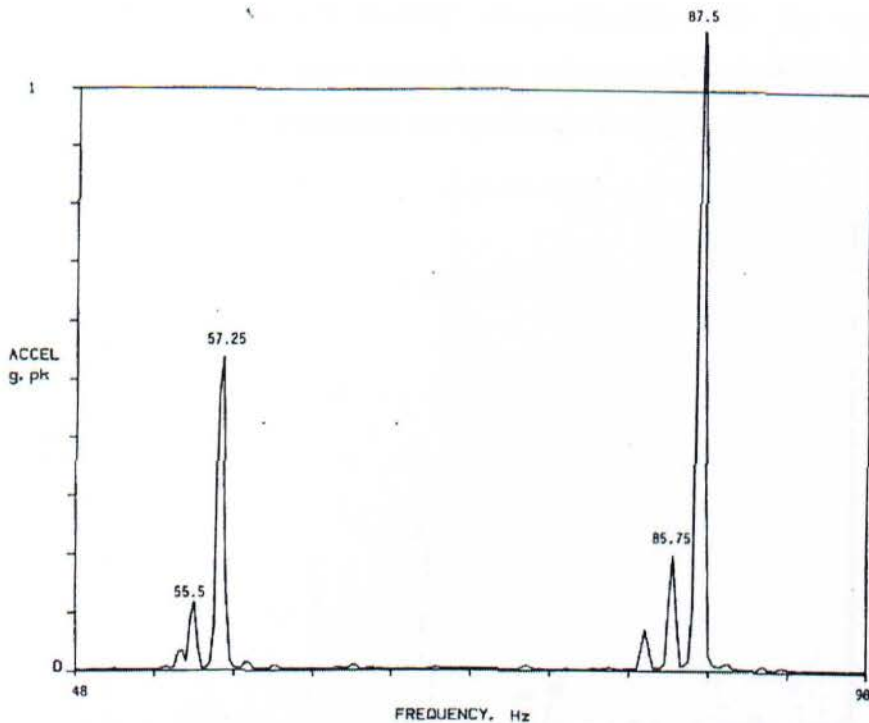
*Φάσμα αποδιαμορφωμένου σήματος εύρους 200Hz*

*Σχήμα 5.4.Σ2*



*Κατακόρυφη μέτρηση σε ρουλεμάν*

*Σχήμα 5.4.Σ3*



**Φάσμα αποδιαμορφωμένου σήματος εύρους 50Hz**

Σχήμα 5.4.Σ4

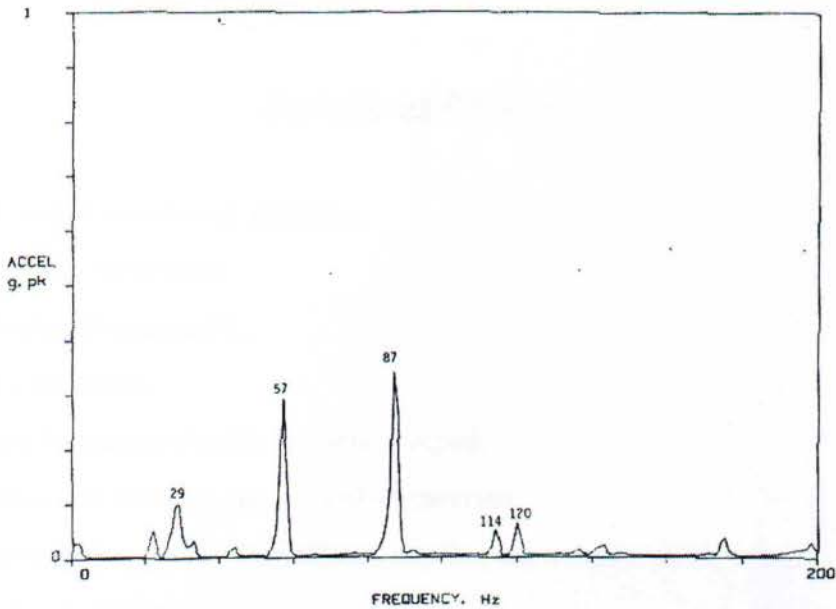
Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι η αιχμή στα 57 Hz του σχ. 5.4.Σ2 εμφανίζεται σε δύο διαφορετικές συχνότητες στα 55,5 και 57,25 Hz. Η συχνότητα των 57,25 Hz φαίνεται τώρα ότι είναι η BSF με αποτέλεσμα να πρέπει να διερευνήσουμε ακόμα καλύτερα την κατάσταση των σφαιρών των ρουλεμάν και με κάποιες άλλες μετρήσεις. Φυσικά, δεν αποκλείουμε και την περίπτωση η συχνότητα αυτή να είναι η δεύτερη ( 2x ) αρμονική της συχνότητας περιστροφής.

Για τη συχνότητα των 87,5 Hz, παρατηρούμε, ότι έχει παραμείνει η αιχμή ακριβώς στην ίδια συχνότητα, αλλά, έχουμε και μία εμφανή αιχμή στα 85,75 Hz. Η τελευταία, είναι η τρίτη ( 3x ) αρμονική της συχνότητας περιστροφής ενώ, αυτή στα 87,5 Hz είναι η BPFO. Τα παραπάνω, οδηγούν σε ανησυχία για την ευθυγράμμιση του συστήματος και την κατάσταση του εξωτερικού δακτυλίου του ρουλεμάν.

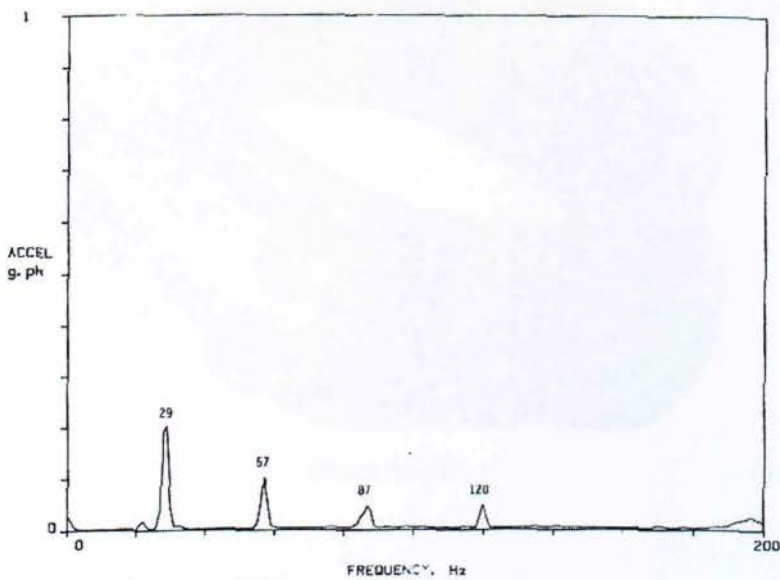
Τα σχήματα 5.4.Σ5(α) και 5.4.Σ5(β) είναι παρόμοια γραφικά με το σχήμα 5.4.Σ2. Στο πρώτο εκ των δυο που ακολουθούν, το επιταχυνσιόμετρο είναι τοποθετημένο με γωνία 45°, ενώ στο δεύτερο το επιταχυνσιόμετρο τοποθετήθηκε οριζόντια. Είναι αξιοπρόσεκτο πως οι συχνότητες των ρουλεμάν στα 57 και 87 Hz μειώνονται



δραματικά όταν το επιταχυνσιόμετρο απομακρύνεται από την κατακόρυφη διεύθυνση, παράδειγμα που κάνει εμφανή την ανάγκη ορθού προσανατολισμού του μορφομετατροπέα για την απεικόνιση των κραδασμών του ρουλεμάν.



( α )



( β )

**Φάσμα μέτρησης ρουλεμάν με το αισθητήριο υπό γωνία  $45^\circ$  (α)  
και σε οριζόντια θέση (β)**

Σχήμα 5.4.Σ5 (α, β)

Στις φωτογραφίες που ακολουθούν, μπορούμε να δούμε τα αποτελέσματα διαφόρων βλαβών των ρουλεμάν, αναφέροντας τις πιθανές αιτίες οι οποίες προξένησαν τη ζημιά καθώς και τις ενέργειες που πρέπει να κάνουμε για την αντιμετώπισής της.

### **Ξεφλούδισμα Ρουλεμάν :**

#### **Πιθανές αιτίες εμφάνισης βλάβης**

- Υπερβολικό φορτίο.
- Κακή ευθυγράμμιση.
- Φορτίο ροπής.
- Είσοδος ξένων υλικών, διείσδυση νερού.
- Μειωμένη λίπανση, ακατάλληλο λιπαντικό.
- Λανθασμένη προσέγγιση άξονα, μεγάλες και ανομοιογενείς καμπές
- Σκουριά, διάβρωση



Φώτο 4.4.Φ1

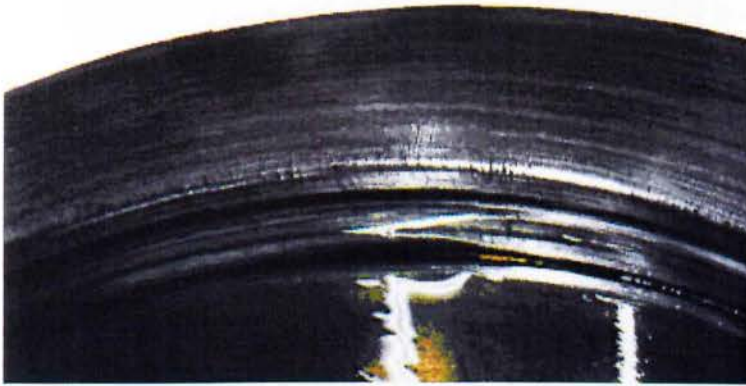
#### **Ενέργειες που πρέπει να γίνουν:**

1. Επανεξέταση της εφαρμογής των ρουλεμάν και έλεγχος των συνθηκών φορτίου.
2. Βελτίωση των μεθόδων εφαρμογής.
3. Πρόληψη διάβρωσης από σκουριά.
4. Χρήση λιπαντικού και βελτίωση των μεθόδων λίπανσης.
5. Έλεγχος της εσωτερικής καθαρότητας του ρουλεμάν.

### Ραγισμένα ρουλεμάν :

#### **Πιθανές αιτίες εμφάνισης βλάβης**

- Υπερβολικό φορτίο, απότομο φορτίο.
- Ξεφλούδισμα.
- Ελλιπής κωνική γωνία ή κωνικός άξονας.
- Ελλιπής κυλινδρικότητα του άξονα.
- Υψηλή θερμοκρασία.



#### **Ενέργειες που πρέπει να γίνουν:**

1. Διόρθωση παρέμβασης.
2. Έλεγχος των συνθηκών φορτίου.
3. Βελτίωση της μεθόδου μονταρίσματος.
4. Χρήση κατάλληλου σχήματος άξονα.
5. Λίπανση.



### Άναμμα ρουλεμάν :

#### **Πιθανές αιτίες εμφάνισης βλάβης**

- Κακή λίπανση.
- Υπερβολικό φορτίο.
- Υπερβολική περιστροφική ταχύτητα.
- Υπερβολική μικρή εσωτερική καθαρότητα.
- Εισροή νερού και ξένων σωματιδίων.
- Κακή προσέγγιση του άξονα.
- Υπερβολική κάμψη του άξονα.



Φώτο 4.4.Φ9

#### **Ενέργειες που πρέπει να γίνουν:**

1. Μελέτη του λιπαντικού και της μεθόδου λίπανσης.
2. Επανεξέταση της καταλληλότητας του επιλεγμένου τύπου ρουλεμάν.
3. Μελέτη της καθαρότητας ρουλεμάν και της εφαρμογής.
4. Βελτίωση του μηχανισμού σφραγίσματος.
5. Έλεγχος της προσέγγισης του άξονα.
6. Βελτίωση της μεθόδου μονταρίσματος.

### Προβλήματα στον κλωβό :

#### **Πιθανές αιτίες εμφάνισης βλάβης**

- Κακή ευθυγράμμιση των ρουλεμάν.
- Κακός χειρισμός.
- Μεγάλο στιγμιαίο φορτίο.
- Ξαφνικοί και έντονοι κραδασμοί.
- Υπερβολική περιστροφική ταχύτητα, απότομη επιτάχυνση και επιβράδυνση.
- Κακή λίπανση.
- Αύξηση θερμοκρασίας.



Φώτο 4.4.Φ14

#### **Ενέργειες που πρέπει να γίνουν:**

1. Έλεγχος της μεθόδου μονταρίσματος.
2. Έλεγχος θερμοκρασίας, περιστροφής, και συνθηκών φορτίου.
3. Περιορισμός δονήσεων.
4. Επιλογή τύπου κλωβού.
5. Επιλογή μεθόδου λίπανσης και λιπαντικού.

## **Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>**

### **Οδοντωτοί τροχοί**

#### **6.1 Αιτίες βλαβών σε οδοντωτούς τροχούς.**

Σε συνεργαζόμενους οδοντωτούς τροχούς οι κραδασμοί που παράγονται πολλές φορές οφείλονται στην ύπαρξη επιφανειακών γεωμετρικών ανωμαλιών στην επιφάνεια των συνεργαζόμενων δοντιών που δημιουργεί τοπικές υπερφορτίσεις και κρούσεις. Στην πρόκληση φθορών στους οδοντωτούς τροχούς συχνά επιδρά η κάμψη των συνεργαζόμενων δοντιών εν ώρα λειτουργίας λόγω της ελαστικότητας τους σε αιχμές φορτίου ή σε κανονικό φορτίο και η έλλειψη κατάλληλης ευθυγράμμισης των κέντρων περιστροφής των τροχών γενικά. Αυτό συμβαίνει και κατά την κάμψη της ατράκτου λόγω της φορτίσεώς της στη θέση του οδοντωτού τροχού. Άλλες αιτίες μπορεί να είναι η χαλαρότητα, η χάρη των κατατομών, οι εκκεντρότητες των τροχών και άλλα σφάλματα των οδοντωτών τροχών. Η πρόκληση μίας βλάβης στη γεωμετρία ενός δοντιού προκαλεί κραδασμούς που επαναλαμβάνονται όποτε ένα δόντι συνεργάζεται με το ελαττωματικό δηλαδή μία φορά κάθε περιστροφή. Σε γενικότερες φθορές όλων των δοντιών επίσης, οι κραδασμοί παράγονται κατά τη συχνότητα της εμπλοκής των δοντιών που είναι το γινόμενο της συχνότητας περιστροφής επί τον αριθμό των δοντιών του εκάστοτε τροχού. Τέλος να αναφέρουμε ότι υπάρχει και η περίπτωση της ελαττωματικής κοπής των δοντιών από προβληματικά κοπτικά εργαλεία.

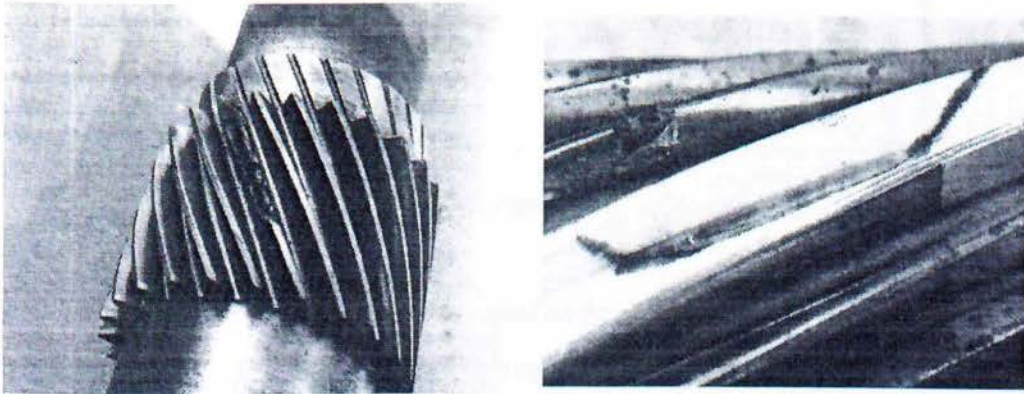
**6.2 Φθορά σε οδόντα.** Η φθορά μπορεί να είναι: i) καταστροφή της επιφάνειας του δοντιού λόγω ύπαρξης ξένων σωματιδίων στο λιπαντικό ii) καταστροφή της κατατομής λόγω χημικών αντιδράσεων, εξαιτίας της αποσύνθεσης του λιπαντικού ή από πρόσθετα χημικά αντιδραστήρια που προκαλούν τη φθορά αυτή, iii) αποτυχημένη λίπανση στη θέση επαφής των κατατομών και δημιουργία φθοράς scoring.

**6.3 Φορτίο οδόντος.** Το μέγεθος του φορτίου είναι καθοριστικό για την κατάσταση του δοντιού διότι υψηλό φορτίο συνεπάγεται πλαστική παραμόρφωση των οδόντων, η οποία συμβαίνει συνήθως σε μαλακά ή μεσαίας σκληρότητας υλικά. Αρχίζει



συνήθως ως scoring αλλά εξαιτίας της καταστροφής της κατατομής και των αναπτυσσόμενων δυναμικών φορτίων εμφανίζεται παραμόρφωση στα δόντια.

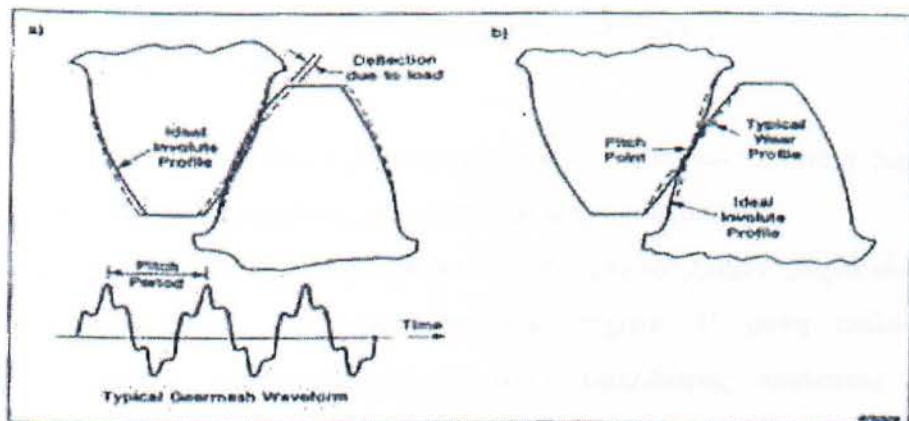
**6.4 Ραγισμένος ή σπασμένος οδόντας.** Ανιχνεύεται εύκολα διότι ο ραγισμένος οδόντας προκαλεί κατά τη συνεργασία του με άλλον εντονότερο κραδασμό μία φορά σε κάθε περιστροφή. Η θραύση του δοντιού ή ενός σημαντικού τμήματος αυτού μπορεί να οφείλεται σε στιγμιαία υπερφόρτιση του δοντιού ή σε κρουστικό φορτίο ή το πιθανότερο σε φαινόμενα κόπωσης λόγω επαναλαμβανόμενων φορτίων άνω των ορίων δυναμικής αντοχής ή χρονικής αντοχής του υλικού. Εκτός αυτών, οι αιτίες του φαινομένου μπορεί να είναι σχισμές στο fillet, ραγίσματα λόγω θερμικής κατεργασίας κ.λπ.



Η θραύση του δοντιού ξεκινά με ένα ελαφρό ράγισμα στην επιφάνεια, ακολουθούμενο από πότισμα του υλικού με λιπαντικό. Αυτό, εξαιτίας της σχετικής κίνησης των επιφανειών του ραγίσματος, δημιουργεί φθορά επί των τριβόμενων επιφανειών, η οποία μετά τη θραύση είναι εμφανής και ενδεικτική του χρόνου που απαιτήθηκε για την επελθούσα θραύση. Η επιφάνεια θραύσης είναι λεία, πράγμα που σημαίνει ότι απαιτείται σημαντικό έργο των τριβόμενων επιφανειών πριν συμβεί τελικά η θραύση. Η στιγμιαία υπερφόρτιση δημιουργεί σπάσιμο (θραύση) ινώδους μορφής, που είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα της βίαιας απομακρύνσεως (αφαιρέσεως) υλικού.

**6.5 Συχνότητα σύμπτωσης οδόντων.** Αν η σχέση μετάδοσης της βαθμίδας οδοντωτών τροχών είναι ακέραιος αριθμός, τότε σε περίπτωση βλάβης ενός δοντιού του μεγάλου για παράδειγμα τροχού, σε κάθε πλήρη περιστροφή του θα πραγματοποιείται η συνεργασία του ελαττωματικού δοντιού με το ίδιο υγιές δόντι του

συνεργαζόμενου τροχού. Κατά συνέπεια το δόντι αυτό θα υποστεί γρήγορα φθορά και θα αχρηστευθεί το μικρό γρανάζι. Για το λόγο αυτό φροντίζουμε να μην είναι ακέραια η σχέση μετάδοσης, αλλά οι αριθμοί δοντιών να είναι πρώτοι προς αλλήλους ώστε να εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη φθορά όλων των δοντιών και όχι η απότομη υποβάθμιση συγκεκριμένων δοντιών.



Σχήμα 4.23

**6.6 Υπολογισμός της συχνότητας εμπλοκής.** Η συχνότητα εμπλοκής, είναι η συχνότητα στην οποία εμφανίζεται το τυχόν πρόβλημα στο ζεύγος των τροχών στο φάσμα του επεξεργαζόμενου σήματος. Υπολογίζεται με βάση τον αριθμό των δοντιών και της ταχύτητας περιστροφής του αντίστοιχου γραναζιού σε ένα ζεύγος γραναζιών. Ισχύει δηλαδή :

$$GF = N_i \cdot S_i \quad (4.5.2.a)$$

Όπου, GF : συχνότητα εμπλοκής (Hz)

$N_i$  : αριθμός δοντιών γραναζιού  $i$

$S_i$  : ταχύτητα περιστροφής γραναζιού  $i$  (Hz)

Ο έλεγχος μπορεί να επεκταθεί και για τις πλευρικές συχνότητες της συχνότητας εμπλοκής  $GF (\pm f_r, \pm 2f_r)$  με την  $f_r$  τη συχνότητα περιστροφής του άξονα του μειωτήρα.



Η διάρκεια αντοχής των γραναζιών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως:

- Ταχύτητα
- Συνολικό ποσό εκκεντρότητας
- Αριθμός έκκεντρων οδόντων
- Σκληρότητα γραναζιών
- Λίπανση
- Συντήρηση π.χ. δειγματοληπτικός έλεγχος λαδιών, αλλαγές
- Φορτίο

Είναι προφανές πως όσο περισσότεροι παράγοντες ισχύουν, τόσο σοβαρότερο είναι το πρόβλημα που προκύπτει, οδηγώντας σε μηχανική βλάβη.

Η διόρθωση αυτών των προβλημάτων δεν είναι απλό ζήτημα. Συχνά είναι άσκοπη η επανασχεδίαση του γραναζιού στο ίδιο σημείο. Η μόνη επιλογή είναι η αντικατάσταση των γραναζιών με άλλα υψηλότερης ποιότητας AGMA σε συστηματική βάση. Εντούτοις, κάθε επιλογή έχει διαφορετική οικονομική και λειτουργική επίδραση, γι' αυτό και πρέπει να προσαρμόζεται σε κάθε περίπτωση.

## **Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>**

### **Φθαρμένοι ή χαλαροί μιάντες.**

**7.1 Τροχαλίες με εκκεντρότητα.** Οι τροχαλίες με εκκεντρότητα προκαλούν χρονικά μεταβαλλόμενη τάνυση των μιάντων, αφού η απόσταση του κέντρου περιστροφής από την περιφέρεια (π.χ. αυλάκι τροχαλίας) διαρκώς μεταβάλλεται και άρα έχουμε εντονότερη καταπόνηση του μιάντα. Αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση κραδασμών κατά την ακτινική διεύθυνση. Η κακή ευθυγράμμιση των τροχαλιών προκαλεί υψηλή δόνηση κυρίως κατά την αξονική κατεύθυνση.

**7.2 Συντονισμός του μιάντα.** Όταν η ιδιοσυχνότητα συντονισμού του μιάντα συμπίπτει με μία από τις συχνότητες των δύο τροχαλιών (κινητήρια ή οδηγούμενη) τότε έχουμε συντονισμό του μιάντα. Προκαλεί κραδασμό με υψηλή ένταση. Η ιδιοσυχνότητα συντονισμού του μιάντα αλλάζει είτε με μεταβολή της τάνυσής του (τροποποιώντας την απόσταση των κέντρων των τροχαλιών) είτε με τοποθέτηση νέου μιάντα.



## Κεφάλαιο 8<sup>ο</sup>

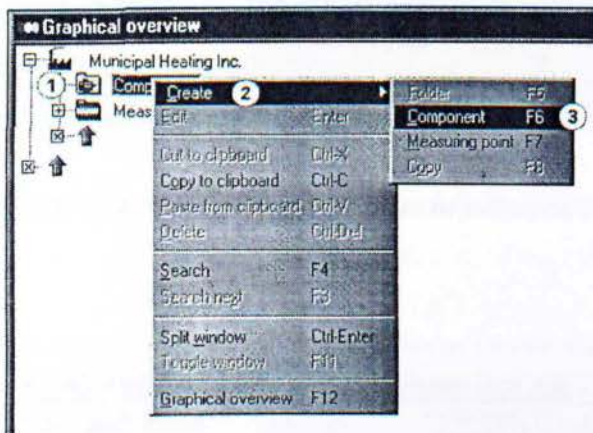
### ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ CONDMASTER PRO 2

Το πρόγραμμα Condmaster Pro 2, είναι κατασκευασμένο από την Σουηδική εταιρεία SPM Instrument και αποτελεί το software του μηχανήματος T-30 το οποίο και περιγράφεται στο κεφάλαιο 6. Η χρήση του έγκειται στην ανάλυση και επεξεργασία των μετρήσεων του οργάνου T-30

#### 8.1 Μεταφορά δεδομένων από το PC στο T-30 μέσω του Condmaster Pro

Το πρόγραμμα της SPM έχει τη δυνατότητα της αμφίπλευρης επικοινωνίας με το όργανο T-30. Για να γίνει μία μέτρηση σε ένα σημείο, θα πρέπει πρώτα να ακολουθήσουμε στο πρόγραμμα τα βήματα που περιγράφονται παρακάτω :

1. Αρχικά, εισάγουμε στο «δέντρο» μετρήσεων και επεξεργασίας του προγράμματος το νέο εξάρτημα που θέλουμε να μετρήσουμε ( σχήμα 8.2.Σ1 ).



Δημιουργία στο δέντρο του προγράμματος

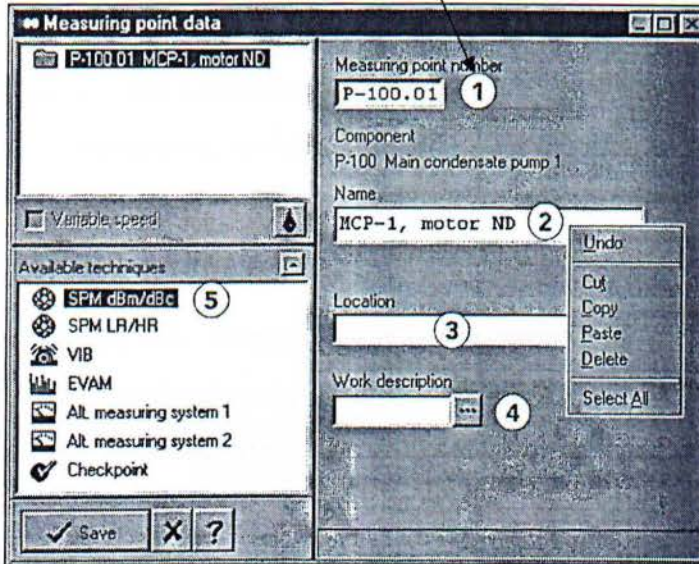
Σχήμα 8.2.Σ1

Δίνουμε την ονομασία του εξαρτήματος καθώς και κάποια άλλα στοιχεία σχετικά με αυτό, όπως για παράδειγμα τη μηχανή στην οποία βρίσκεται.

2. Στη συνέχεια, δημιουργούμε ένα νέο σημείο μέτρησης για το παραπάνω εξάρτημα. Ορίζουμε την ακριβή του θέση καθώς και τα πλήρη στοιχεία των διαστάσεων του, των στροφών περιστροφής του ανά λεπτό, το πλήθος των γραναζιών του - αν πρόκειται για κάποιο μειωτήρα - και τέλος, επιλέγουμε το είδος των μετρήσεων που θέλουμε να κάνουμε στο παραπάνω σημείο ( σχήμα 8.2.Σ2 , 8.2.Σ3 ) και τα όργανα με τα οποία θα γίνει η μέτρηση. Θα πρέπει να τονίσουμε, πως το πρόγραμμα έχει μια ενημερωμένη λίστα με ρουλεμάν, με πλήρη στοιχεία για το κάθε ένα. Στην περίπτωση που το ρουλεμάν που θέλουμε να μετρήσουμε βρίσκεται μέσα στη λίστα αυτή, το

επιλέγουμε και πλέον δεν χρειάζεται καμία εισαγωγή άλλων στοιχείων γι' αυτό στο πρόγραμμα.

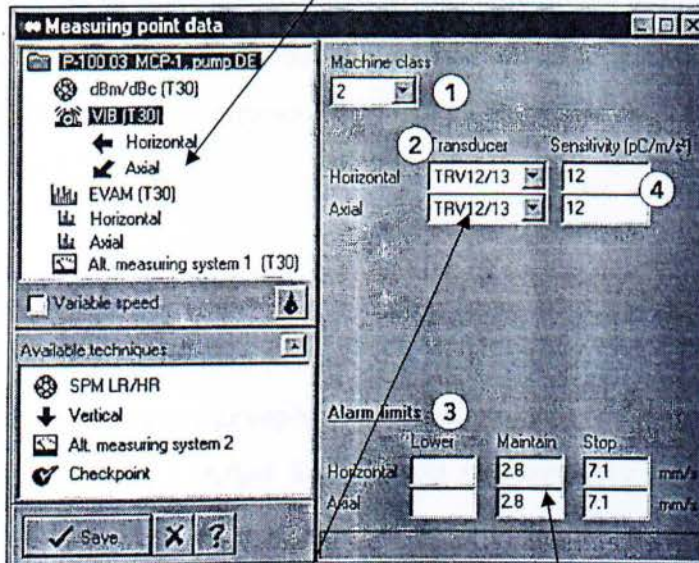
Τόσο στο εξάρτημα όσο και στο σημείο μέτρησης, δίνουμε μία «κωδική ονομασία» καρτέλας που αποτελείται συνήθως από ένα ή δύο γράμματα και τρεις ή πέντε αριθμούς.



*Εισαγωγή στοιχείων για το σημείο μέτρησης*

Σχήμα 8.2.Σ2

Σημείο μέτρησης και είδη μετρήσεων που θέλουμε να κάνουμε σε αυτό



*Εισαγωγή οργάνου με το οποίο θα κάνουμε τη μέτρηση*

*Εισαγωγή μεγεθών πάνω από τα οποία ορίζουμε ότι υπάρχει πρόβλημα( Alarm Limits )*

*Θέσεις εισαγωγής δεδομένων στο πρόγραμμα* Σχήμα 8.2.Σ3



Τα είδη των μετρήσεων που μπορούμε να κάνουμε είναι :

- Μέτρηση κρουστικών παλμών σε ένα ρουλεμάν με τη μέθοδο  $dB_m/dB_c$
- Μέτρηση κραδασμών σε τρεις διευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη, αξονική ) με τη μέθοδο VIB ( vibration severity )
- Ανάλυση των μετρήσεων VIB και απεικόνιση του αποδιαμορφωμένου φάσματος των μετρήσεων με τη μέθοδο EVAM (evaluated vibration analysis ).

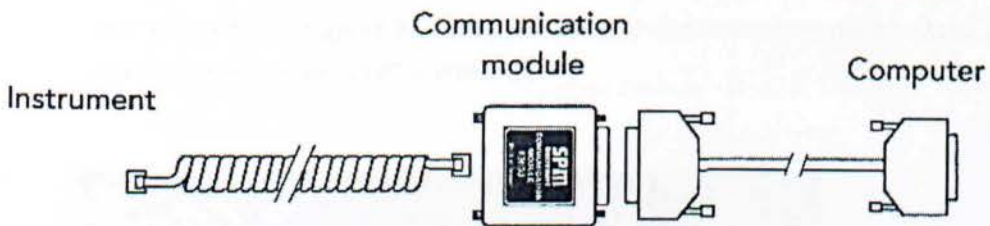
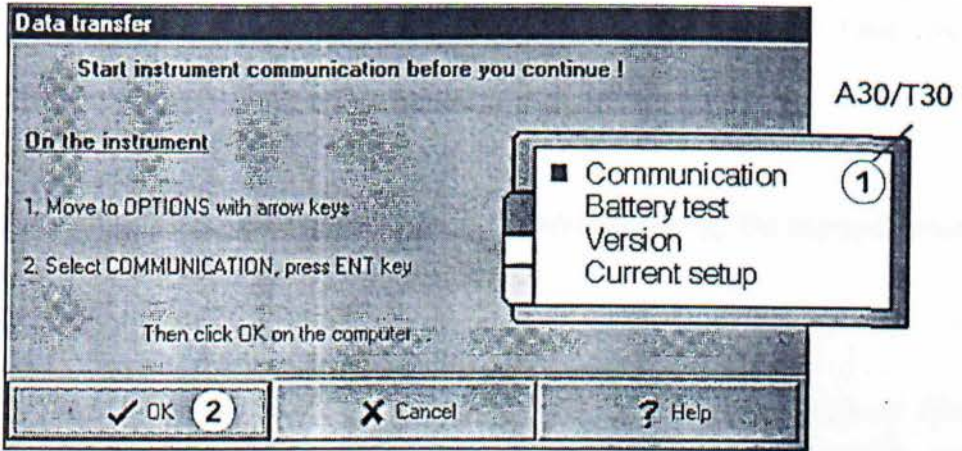
Στην εισαγωγή του EVAM στον πίνακα μετρήσεων, θα πρέπει να ορίσουμε στοιχεία για την ακρίβεια του φάσματος του αποδιαμορφωμένου σήματος που θα πάρουμε στη οθόνη μας. Έτσι, ορίζουμε το εύρος της συχνότητας του παραθύρου, το βήμα και το πλήθος των γραμμών.

Στην περίπτωση που θέλουμε να κάνουμε συγκεκριμένους ελέγχους σε ένα εξάρτημα, για ένα ρουλεμάν π.χ. έλεγχο εξωτερικού δακτυλίου, σε μία άτρακτο π.χ. έλεγχο αζυγοσταθμίας κ.α. , μπορούμε να εισάγουμε μέσα στο EVAM τους ελέγχους αυτούς δίνοντας, κάποιες φορές, ορισμένα περαιτέρω στοιχεία για τα σημεία μέτρησης και τα εξαρτήματά μας.

3. Πριν μεταφέρουμε τα δεδομένα από το PC στο μηχάνημα T-30, πρέπει να δημιουργήσουμε μια ρουτίνα χρόνου - μέτρησης του σημείου. Κατ' αυτό τον τρόπο, ορίζουμε το σημείο και την ημέρα που θέλουμε να μετρήσουμε, ως διαφορά μετά τη σημερινή. Φυσικά, αν θέλουμε άμεση μέτρηση ορίζουμε ως διαφορά το 0. Τέλος, αν έχουμε μόνιμο αισθητήριο σε μία μηχανή, μπορούμε να έχουμε έλεγχο του σημείου αυτού σε περιοδικό αριθμό ημερών, με τη χρήση του T-30.

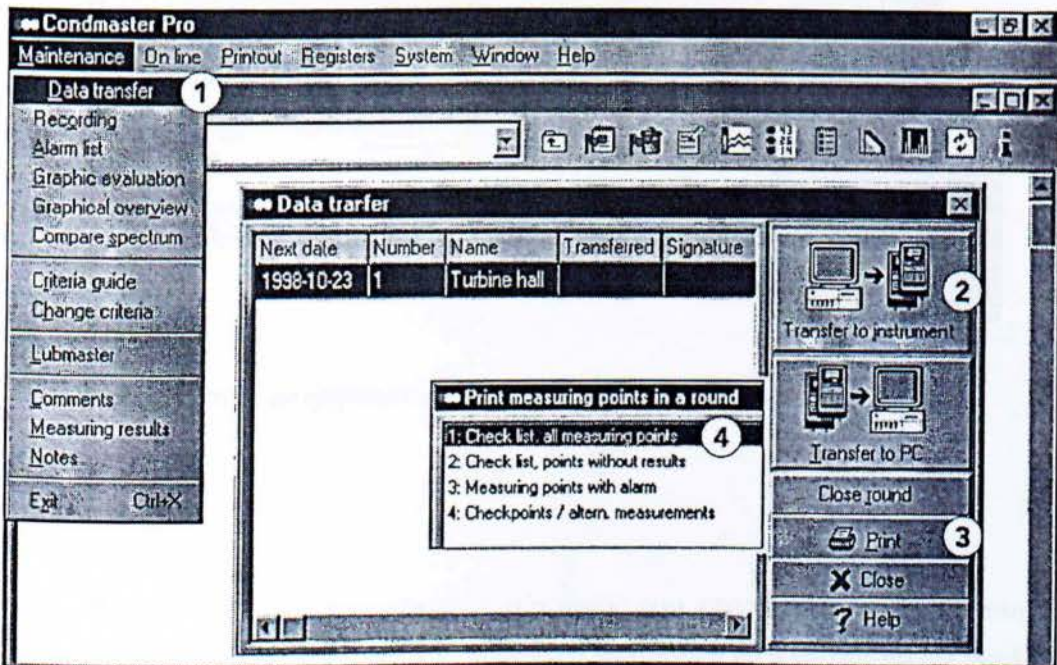
4. Όλα είναι έτοιμα για τη μεταφόρτωση των δεδομένων από το PC στο T-30. Συνδέουμε τον υπολογιστή ( θύρα COM ) με το όργανο T-30, το οποίο έχουμε ήδη ενεργοποιήσει για μεταφορά δεδομένων, μέσω της κάρτας επικοινωνίας και των καλωδίων ( σχήμα 8.2.Σ4 ) και στη συνέχεια από το menu *Data Transfer* μεταφέρουμε τα δεδομένα στο όργανο (σχήμα 8.2.Σ5).





Σύνδεση του PC με το T-30

Σχήμα 8.2.Σ4



Επιλογή μεταφοράς δεδομένων από το PC στο T-30

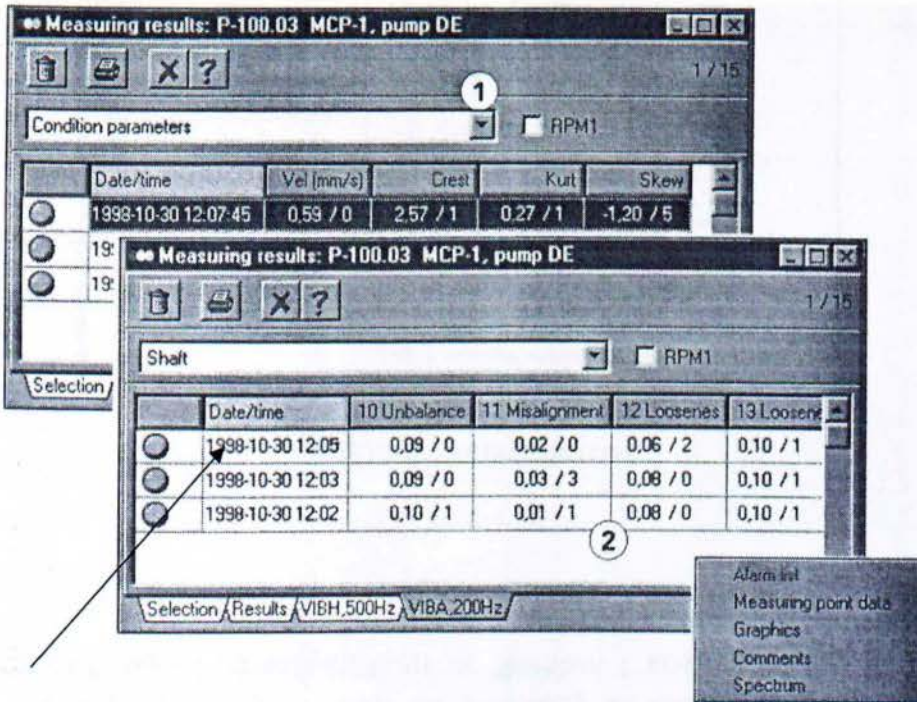
Σχήμα 8.2.Σ5

Μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας, τα σημεία μέτρησης των στοιχείων μηχανών έχουν μεταφερθεί στη μνήμη του οργάνου T-30. Όλα είναι έτοιμα για να γίνουν μετρήσεις.

## 8.2 Μεταφορά δεδομένων από το T-30 στο PC

Η διαδικασία αυτή, είναι περίπου η αντίστροφη της προηγούμενης. Θα περιγράψουμε και πάλι τα βήματα που πρέπει να κάνουμε :

1. Συνδέουμε και πάλι το PC με το όργανο T-30, το οποίο έχουμε ήδη ενεργοποιήσει για μεταφορά δεδομένων, μέσω της κάρτας επικοινωνίας και των καλωδίων ( σχήμα 8.2.Σ4 ) και στη συνέχεια από το menu *Data Transfer* μεταφέρουμε τα δεδομένα στο PC.



### Επιλογή των μετρήσεων σε στοιχείο μηχανής με χρονολογική σειρά

Σχήμα 8.3.Σ1

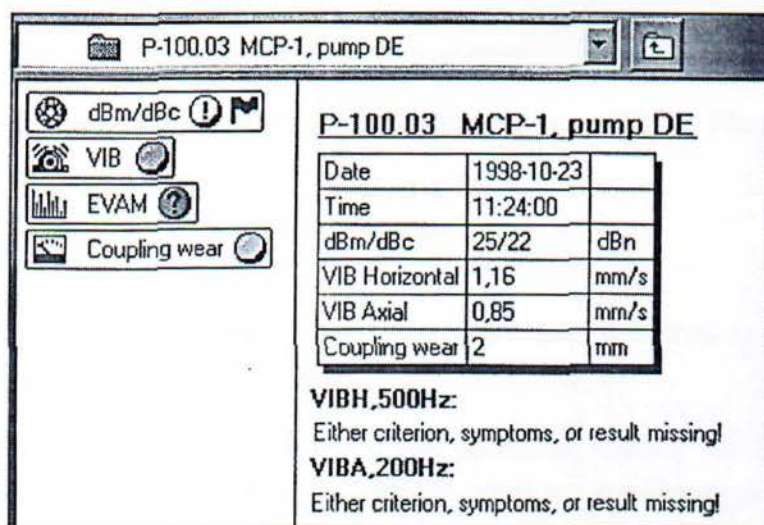
2. Από το «δέντρο» των σημείων μέτρησης του προγράμματος, επιλέγουμε το στοιχείο μηχανής και το ή τα σημείο/α μέτρησης. Στη συνέχεια, θα πρέπει να επιλέξουμε την τελευταία χρονικά μέτρηση ( σχήμα 8.3.Σ1 ). Φυσικά, εάν θέλουμε να εξετάσουμε κάποια παλαιότερη μέτρηση μπορούμε να την επιλέξουμε.



Όλα τα μετρούμενα στοιχεία είναι πλέον στην οθόνη μας. Συνήθως, μεγαλύτερο ενδιαφέρον αποτελεί η ανάλυση του αποδιαμορφωμένου σήματος μέσω της ανάλυσης EVAM.

### 8.3 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα

Επιλέγοντας ένα σημείο για προβολή και επεξεργασία των αποτελεσμάτων, παίρνουμε αρχικά την παρακάτω εικόνα ( σχήμα 8.4.Σ1 ) :

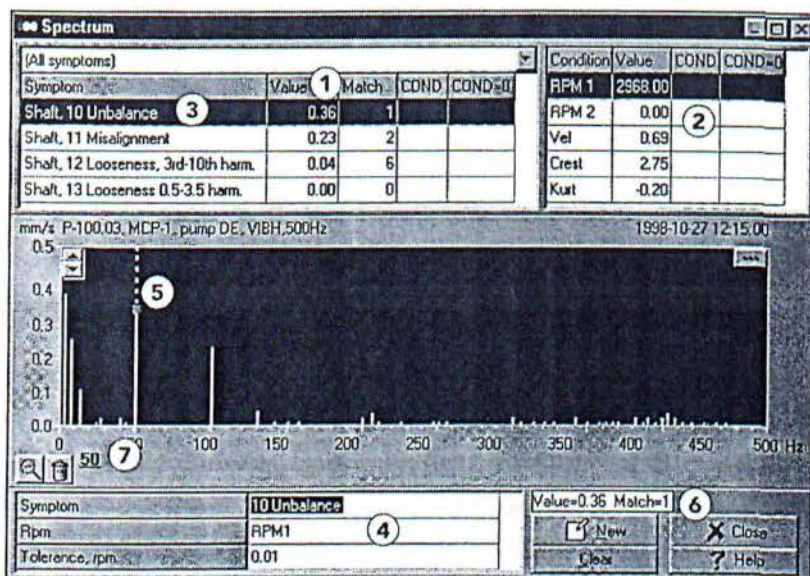


Εμφάνιση αποτελεσμάτων

Σχήμα 8.4.Σ1

Αριστερά στην οθόνη, παρουσιάζονται με χρώματα ( πράσινο καλή κατάσταση, κίτρινο αμφίβολη, κόκκινο κακή κατάσταση ) οι πρώτες εκτιμήσεις για την κατάσταση κάποιου ρουλεμάν, κάποιου γραναζιού ή κάποιας σύζευξης ενώ, στη δεξιά πλευρά του «παραθύρου» εμφανίζονται αριθμητικές τιμές των αντιστοίχων μεγεθών . Για την σωστή πρόγνωση και ανάλυση των αποτελεσμάτων, συνεχίζουμε με την προβολή του αποδιαμορφωμένου φάσματος του σήματος μέσω της ανάλυσης EVAM ( σχήμα 8.4.Σ2) του προγράμματος, στις τρεις διαφορετικές διευθύνσεις των μετρήσεων ( οριζόντια, κατακόρυφη, αξονική).





### Φασματική ανάλυση του σήματος από μέτρηση σε οριζόντια θέση ( VIB H )

Σχήμα 8.4.Σ2

Το παραπάνω φάσμα, προκύπτει ύστερα από αποδιαμόρφωση του αρχικού σήματος με χρήση του μετασχηματισμού Fourier.

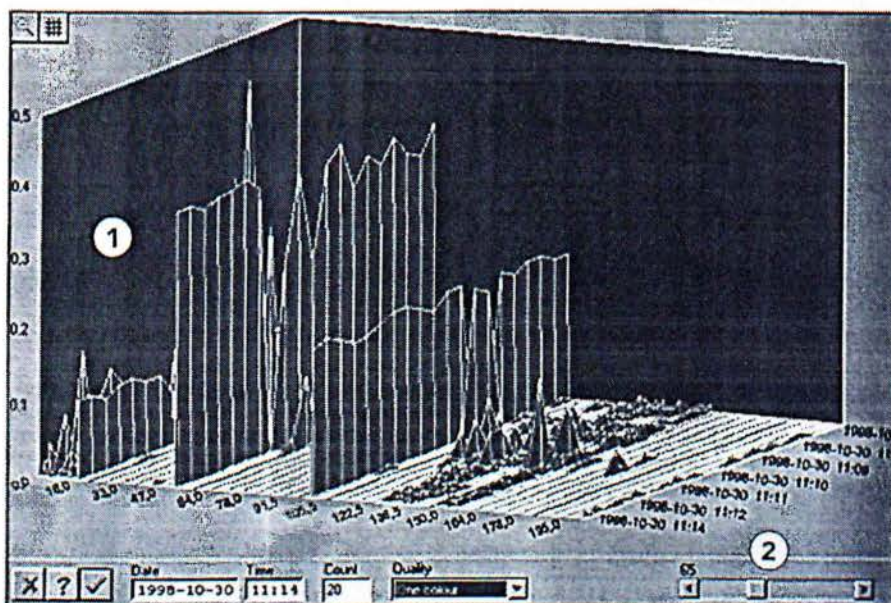
Στο παραπάνω σχήμα, έχουμε παράθυρο του φάσματος εύρους 500 Hz. Το πλάτος των αιχμών ( κατακόρυφος άξονας ) μετριέται, μετά την αποδιαμόρφωση, σε mm/s. Αριστερά στην οθόνη, έχουμε τις βλάβες των στοιχείων μηχανών που μελετάμε, οι οποίες έχουν ήδη εισαχθεί στο πρόγραμμα. Δίπλα τους, αναφέρονται οι τιμές σε mm/s του ύψους των αιχμών του διαγράμματος που αντιστοιχούν στο πρόβλημα ( Value ), το πλήθος των αιχμών που ταυτίζονται με τη θεωρητικά αναμενόμενη συχνότητα του προβλήματος ( Match ) και το πλήθος των αιχμών που είναι στην περιοχή που έχουμε θέσει ως περιοχή κινδύνου ( Cond ).

Δεξιά αναφέρονται πληροφορίες σχετικά με τις στροφές ανά λεπτό του στοιχείου μηχανής, καθώς επίσης και αριθμητικές τιμές που δείχνουν την ταχύτητα της ταλάντωσης RMS ( Vel ), την επιτάχυνση της ταλάντωσης RMS ( ACC ), τη διαφορά μεταξύ των RMS και μέγιστων τιμών των παλμών ( Crest ) και την παρουσία - παροδικών - υψηλών συχνοτήτων ( Kurt ). Η τελευταία, παίζει σημαντικό ρόλο στη διάγνωση μιας βλάβης, αφού ο δείκτης κύρτωσης δείχνει την κατανομή των μεγίστων και ελαχίστων τιμών σε ένα σήμα.

Στην κάτω πλευρά της οθόνης, έχουμε απομονώσει το σφάλμα που μελετάμε τη δεδομένη στιγμή. Κατ' αυτόν τον τρόπο στο διάγραμμα εμφανίζεται με διακεκομμένη γραμμή η θεωρητική τιμή της συχνότητας του αναμενόμενου προβλήματος.

Στην περίπτωση που έχουν ενδιαφέρον και οι αρμονικές της συχνότητας της βλάβης, π.χ. σε ένα ρουλεμάν, τότε εμφανίζονται και αυτές στην οθόνη. Κατ' αυτόν τον τρόπο ελέγχουμε μία μία τις βλάβες που έχουμε εισάγει στο πρόγραμμα. Η περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία του προγράμματος παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 8, όπου γίνεται επεξεργασία των μετρήσεων από το Rig του εργαστηρίου.

Τέλος, για την πρόληψη και καλύτερη αντίληψη της πορείας λειτουργίας ενός στοιχείου μηχανής, το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να μας προβάλλει γραφικά τα αποτελέσματα του αποδιαμορφωμένου φάσματος σε συνάρτηση του χρόνου. Έτσι, έχουμε τη δυνατότητα της παρακολούθησης κάποιου προβλήματος μέσω των αυξομειώσεων του ύψους των αιχμών του στο φάσμα του χρόνου ( σχήμα 8.4.Σ3) .



*Φάσμα του αποδιαμορφωμένου σήματος συναρτήσει του χρόνου*

Σχήμα 8.4.Σ3



## Κεφάλαιο 9<sup>ο</sup>

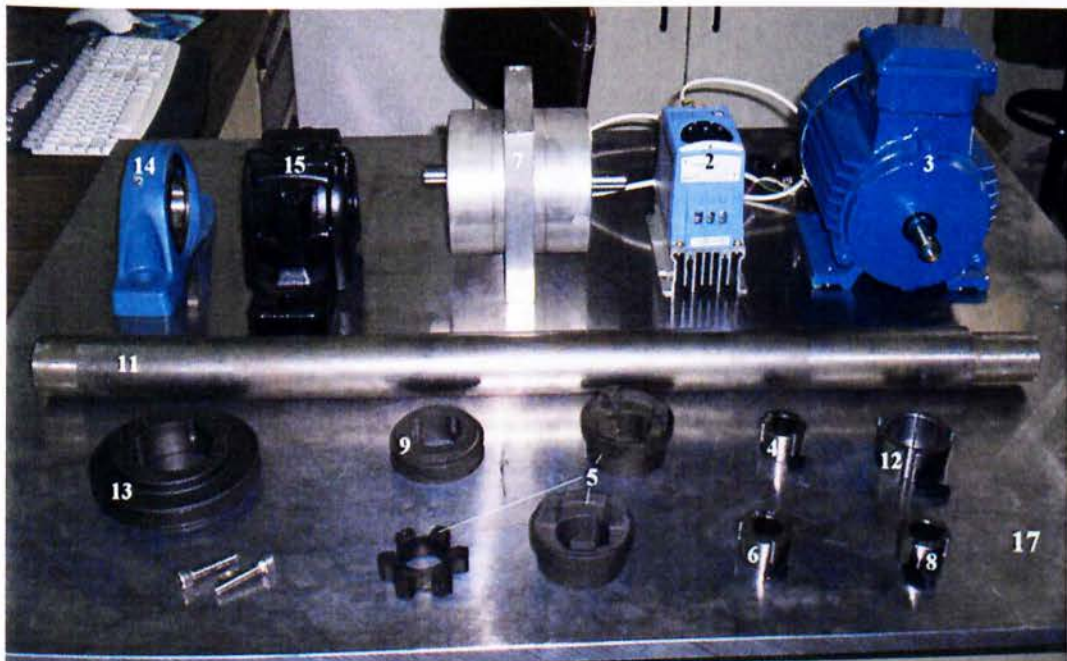
### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ RIG

#### 9.1 Εισαγωγή

Στο Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών του Ε.Μ.Π. υπάρχει ένα πρότυπο Rig για την κατασκευή του οποίου απαιτήθηκε μελέτη, κυρίως, των διαστάσεων των εξαρτημάτων.

Η κατασκευή έχει σαν στόχο τον έλεγχο των ρουλεμάν κινητήρα, αυξητήρα και της τρίτης ατράκτου, των γραναζιών του αυξητήρα καθώς και τυχόν αζυγοσταθμίες ή κακές ευθυγραμμίσεις που πιθανόν να υπάρξουν σε μία μηχανολογική κατασκευή. Στο όλο σύστημα, προξενήσαμε κάποιες βλάβες με σκοπό να πετύχουμε την όσο το δυνατό καλύτερη προσομοίωση των βλαβών και των συνθηκών μετρήσεων με δεδομένα εξαρτήματα.

Τα βασικά εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται η κατασκευή είναι ένας ηλεκτροκινητήρας για την κίνηση των υπολοίπων μερών, ένας μειωτήρας για τον έλεγχο των γραναζιών και ένας άξονας με δύο έδρανα για τον έλεγχο των ρουλεμάν. Επίσης, απαραίτητα εξαρτήματα της κατασκευής του Rig είναι δύο τροχαλίες και ιμάντας για την κίνηση του άξονα.



Εξαρτήματα του Rig



## 9.2 Κατάλογος εξαρτημάτων του RIG:

Κατάλογος Εξαρτημάτων του RIG					
α/α	Περιγραφή Εξαρτήματος	Τύπος	Κωδ. Κατ/στη	Διαστάσεις	Κατασκευαστής
1	Κουτί ηλεκτρολογικό			100 <sub>mm</sub> x 150 <sub>mm</sub>	Viokar
2	Inverter μονοφασικό	0,75 KW			Invertek
3	Ηλεκτροκινητήρας μονοφασικός	0,75 KW 1500RPM		Διάμετρος άξονα 19 <sub>mm</sub>	Stamfam
4	Taper Bush		1008	19 <sub>mm</sub>	Sati
5	Κόπλερ		1008		Sati
6	Taper Bush		1008	20 <sub>mm</sub>	Sati
7	Αυξηνητήρας	Z1 = 40 Z2 = 20 i = 2		Διάμετρος άξονα 20 <sub>mm</sub>	Ειδική παραγγελία σε μηχανουργείο
8	Taper Bush		1108	20 <sub>mm</sub>	Sati
9	Τροχαλία	SPZ (1 αύλακος)	67/1	67 <sub>mm</sub>	Sati
10	Ιμάντας	SPZ	SPZ 962	962 <sub>mm</sub>	Femer Power
11	Άξονας			800 <sub>mm</sub> μήκος 50 <sub>mm</sub> διάμετρος	Τυποποιημένος
12	Taper Bush		1610	40 <sub>mm</sub>	Sati
13	Τροχαλία	SPZ	118/1	118 <sub>mm</sub>	Sati
14	Έδρανο με Y- type ρουλεμάν	Ελεύθερης/Βαθείας Αύλακος	8Y510M / YET 210	50 <sub>mm</sub> (εσωτ.)	SKF
15	Έδρανο	Σταθερό	SNL511		SKF
16	Ρουλεμάν	Αυτορύθμιστο	1211	55mm (εσωτ. )	SKF
17	Βάση Αλουμινίου			1200x800mm <sup>2</sup>	

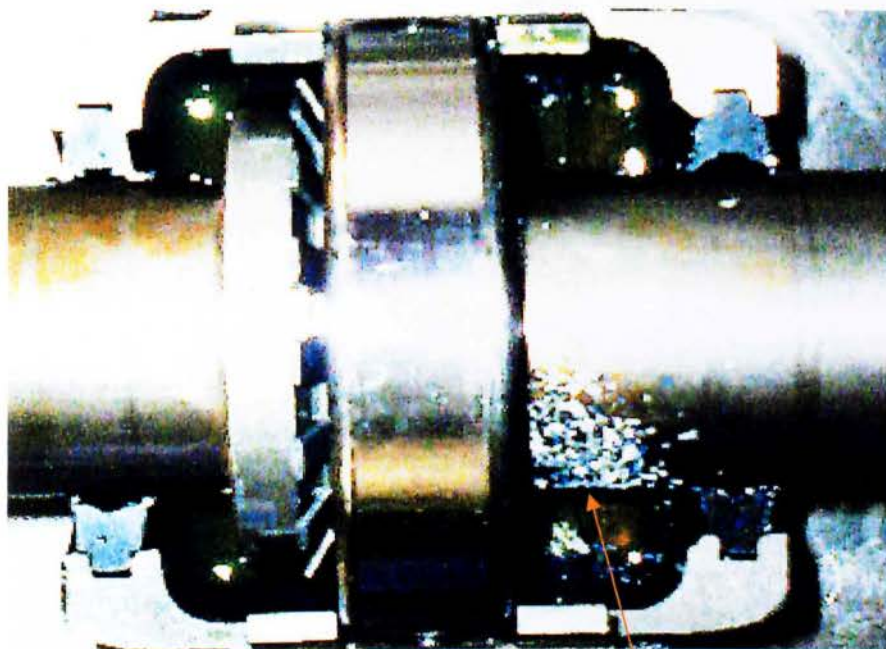
### 9.3 Παρουσίαση βλαβών στα εξαρτήματα

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τις βλάβες τις οποίες έχουμε προξενήσει στα εξαρτήματά μας για να μπορέσουμε να πάρουμε όσο το δυνατό πιο ρεαλιστικές μετρήσεις, όπως έχουμε ήδη αναφέρει.

#### Βλάβη στο ρουλεμάν SKF 1211

Σε αυτό το ρουλεμάν το οποίο είναι αυτορύθμιστο σφαιρικό, οι βλάβες που προξενήσαμε είναι η πρόσθεση ρινισμάτων αλουμινίου στο έδρανο του, το σπάσιμο ενός μικρού τμήματος του κλωβού του και η αφαίρεση τεσσάρων σφαιρών του (εικ.9.3.E1(α, β, γ) ). Τα αποτελέσματα τα οποία αναμένουμε είναι βλάβη στον κλωβό λόγω της απώλειας των σφαιρών , της θραύσης τμήματός του και λόγω της ύπαρξης ρινισμάτων όπως επίσης τυχόν βλάβες στον εσωτερικό ή/και εξωτερικό δακτύλιό του ρουλεμάν, λόγω της παρουσίας ρινισμάτων του αλουμινίου.

Οι διάμετροι του ρουλεμάν είναι εσωτερική  $d=55\text{mm}$ , ενώ η εξωτερική του  $D= 100\text{mm}$ . Στην κατασκευή, το ρουλεμάν είναι σταθερό και η λίπανσή του γίνεται με λάδι SAE 30.

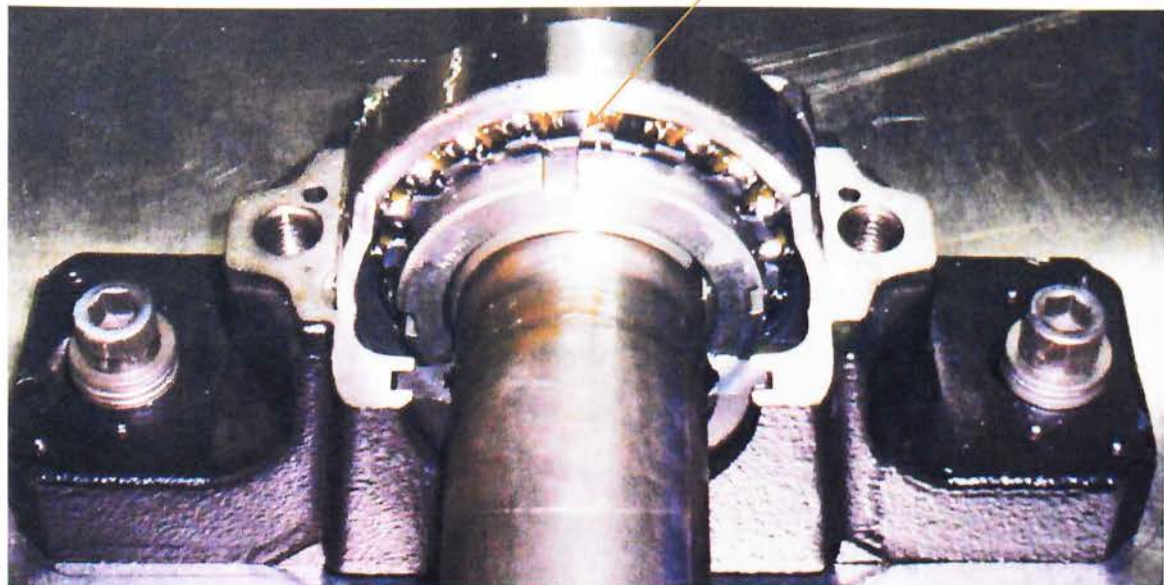


( α )

Ρινίσματα αλουμινίου

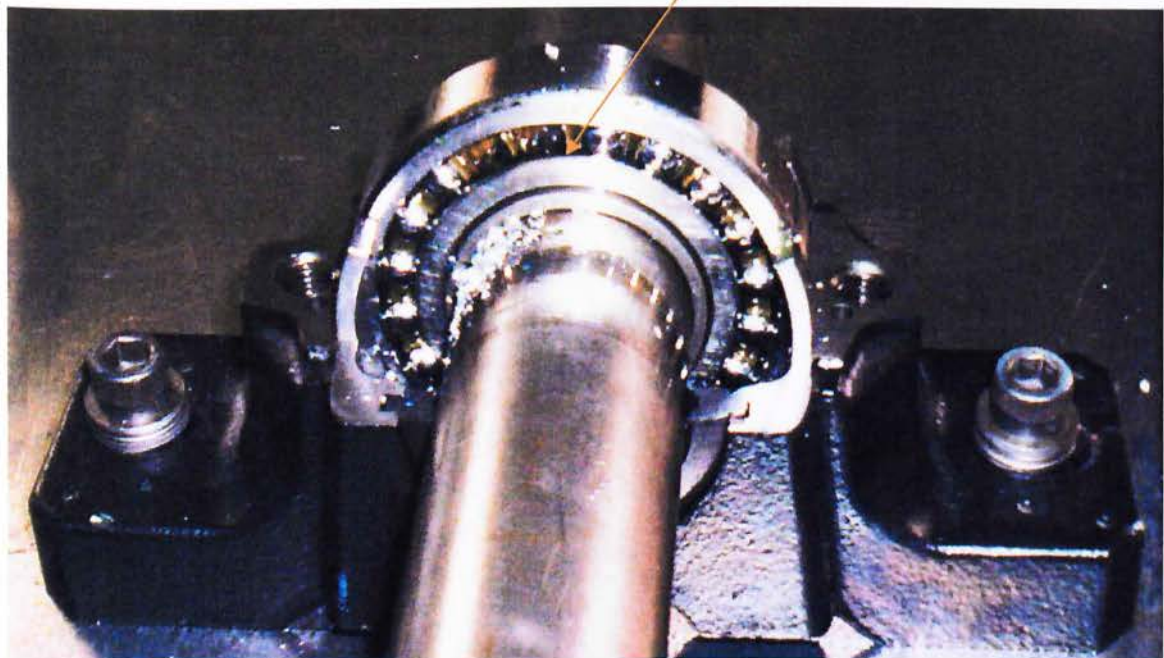


Θραυσμένος κλωβός



(β)

Απώλεια σφαιρών



(γ)

*Βλάβες στο ρουλεμάν SKF 1211*

*(εικ.9.3.Ε1 (α, β, γ))*



## Βλάβη στον αυξηνητήρα

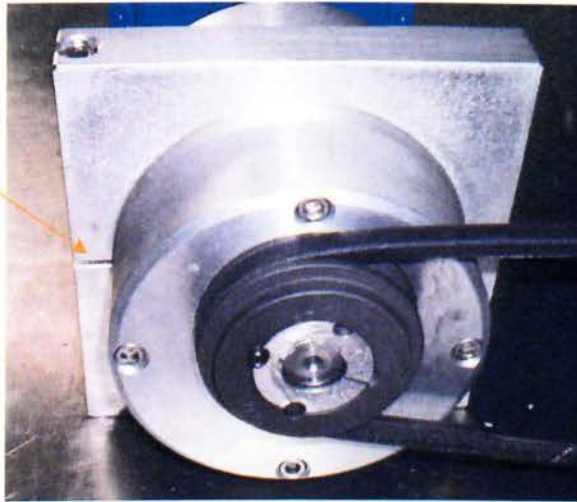
Ο αυξηνητήρας ο οποίος κατασκευάστηκε σε μηχανουργείο μετά από ειδική παραγγελία είναι μονοβάθμιος, με εσωτερική οδόντωση και σχέση αύξησης ίση με 2. Στην είσοδο, υπάρχει ένα γρανάζι-στεφάνη με  $Z_1=40$  δόντια ενώ στην έξοδο το πηνιόν με  $Z_2=20$  δόντια. Το module των γραναζιών είναι  $m=1,5$  και το υλικό κατασκευής τους είναι μαλακός σίδηρος. Ο αυξηνητήρας έχει σχεδιασθεί να λειτουργεί χωρίς προβλήματα με ρυθμό περιστροφής στην είσοδο 400 – 500 RPM, λόγω του μικρού module του. Παρά όλα αυτά, στο εργαστήριο θα λειτουργήσει μέχρι και τις 1500 RPM περίπου.

Η βάση του, είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο. Εξαιτίας της εκκεντρότητας η οποία δημιουργείται από την εσωτερική οδόντωση, ο μειωτήρας μπορεί να περιστραφεί γύρω από τη βάση του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να πετύχουμε την επιθυμητή τάνυση στην ιμαντοκίνηση.



Οι άξονες είναι έκκεντροι λόγω της εσωτερικής οδόντωσης.

εικ.9.3.E2



*Ο αυξηνητήρας μπορεί να περιστρέφεται γύρω από τη βάση του για την τάνυση του ιμάντα*

*εικ.9.3.E3*

Τα ρουλεμάν του αυξηνητήρα είναι βαθείας αύλακος με κωδικό 6004 της εταιρίας SKF ενώ η εσωτερική διάμετρος τους είναι  $d=20\text{mm}$  και η εξωτερική  $D=42\text{mm}$ .

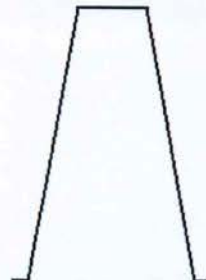
Οι άξονες του αυξηνητήρα, έχουν διάμετρο  $d=20\text{mm}$ . Τέλος, η λίπανση του γίνεται με βαλβολίνη SAE 80/90.

Η βλάβη η οποία έχει προξενηθεί στον αυξηνητήρα, είναι ότι ένα από τα δόντια του πηνιόν, δεν έχει κατασκευασθεί με τη γνωστή μορφή της εξειλιγμένης ( σχήμα 9.3.Σ1 ) αλλά, είναι κομμένο ευθεία ( σχήμα 9.3.Σ2 ). Βλάβη όχι πολύ σημαντική, αλλά αναμένουμε κάτι το αξιοσημείωτο στα αποτελέσματα των μετρήσεων για το δεύτερο γρανάζι.



*Μορφή δοντιού με εξειλιγμένη*

*Σχήμα 9.3.Σ2*



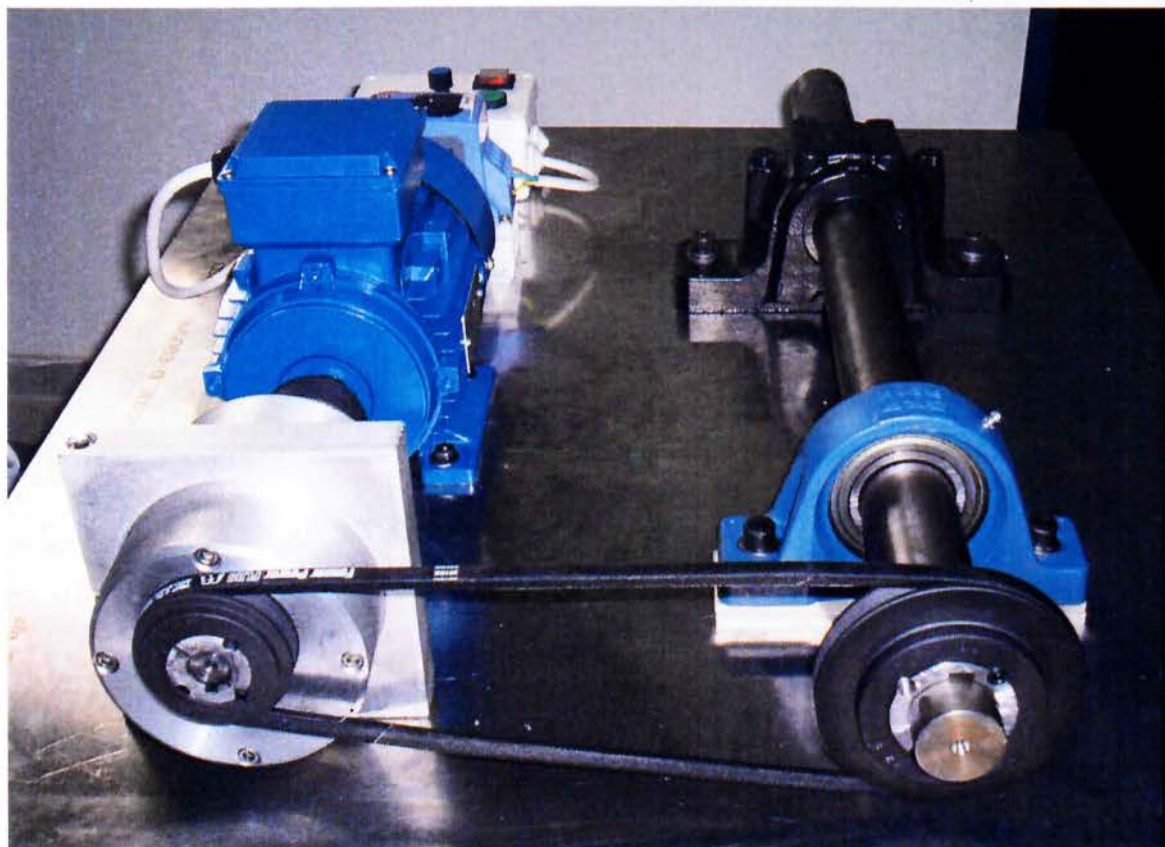
*Μορφή του «χαλασμένου» δοντιού*

*Σχήμα 9.3.Σ1*



## Λοιπά εξαρτήματα

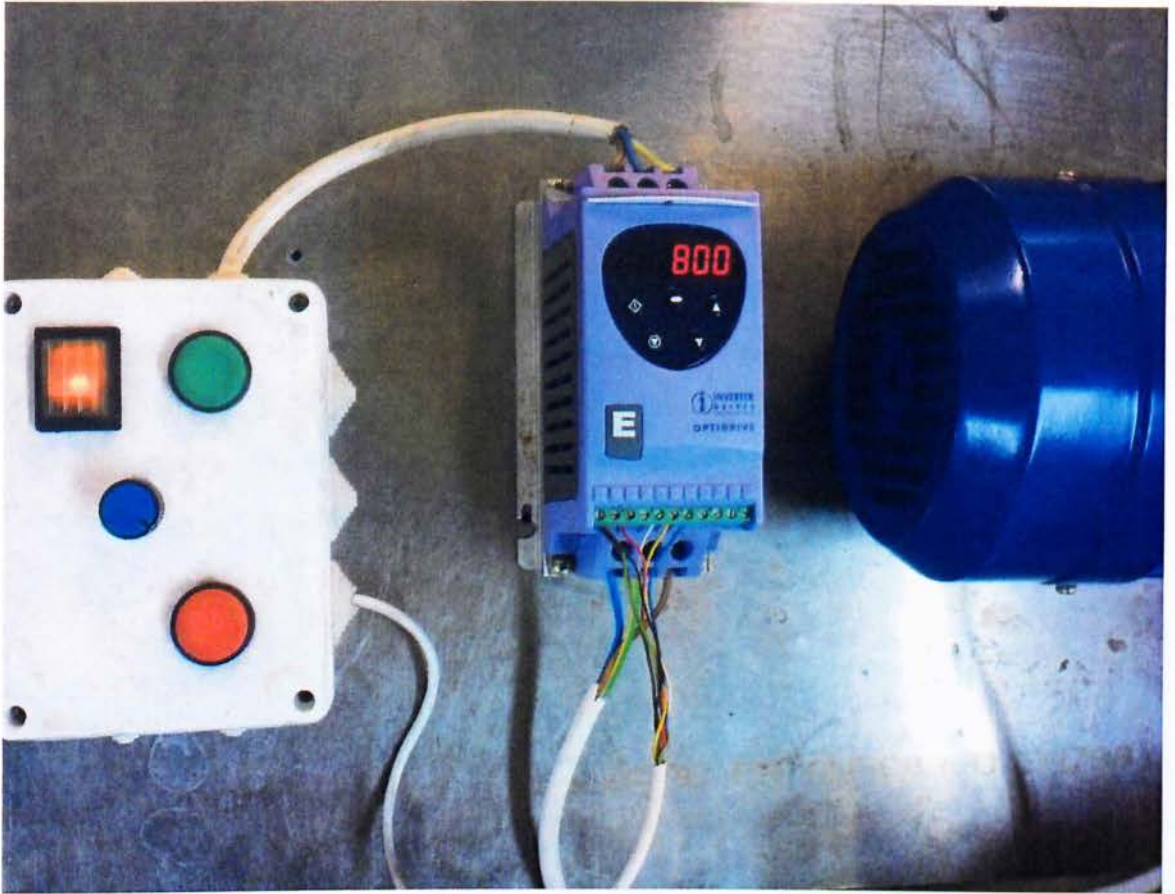
Στα υπόλοιπα εξαρτήματα, δεν δημιουργήσαμε κάποια βλάβη. Κατά τη συναρμολόγησή τους όμως, δεν έγινε απόλυτη ευθυγράμμιση του αυξηνητήρα με τον ηλεκτροκινητήρα όπως και μεταξύ των δύο τροχαλιών. Ακόμη, η τάνση του ιμάντα είναι μικρότερη της κανονικής, με αποτέλεσμα να υπάρχει ταλάντωσή του κατά τη λειτουργία του συστήματος.



*Το Rig του εργαστηρίου συναρμολογημένο*

εικ.9.3.E4

Το μοτέρ περιστρέφεται με 1500RPM . Με τη χρήση ενός Inverter (εικ. 9.3.E5 ), μπορούμε να πετύχουμε τον επιθυμητό αριθμό στροφών. Το εύρος στο οποίο θα γίνουν οι μετρήσεις είναι από 800 έως 1800 RPM.



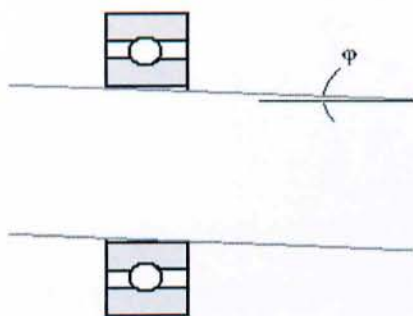
*Inverter, για τον έλεγχο του αριθμού στροφών του κινητήρα*

εικ.9.3.E5

- Η σχέση μετάδοσης από το μοτέρ στον άξονα είναι ίση με  $i_{ολ} \sim 1,136$ .  
(  $i_{μοτέρ-αυξηνητήρα} = 40/20 = 2$ ,  $i_{ιμαντοκίνησης} = 67/118 = 0,57$  )
- Για τον κινητήρα η συνδεσμολογία που επιλέχθηκε να λειτουργήσει είναι σε σύνδεση τριγώνου στα 220V διότι το inverter είναι μονοφασικό.
- Για την προσαρμογή του κόπλερ και των τροχαλιών χρησιμοποιήθηκαν Taper Bush αντιστοίχων διαμέτρων.

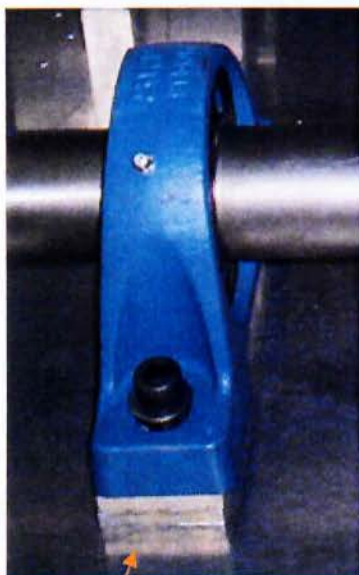


- Μεταξύ των δύο εδράνων, υπήρχε υψομετρική διαφορά μεταξύ της βάσης και του κέντρου περιστροφής του ρουλεμάν τους, της τάξεως των 12,5mm. Για καταφέρουμε τα δύο κέντρα των ρουλεμάν να απέχουν το ίδιο από τη βάση τους, προσθέσαμε δύο λάμες πάχους 7mm η κάθε μία κάτω από το έδρανο 8Y510M ( βλ. εικ. 9.3.E6 ). Το γεγονός του +1,5mm ( 14 αντί 12,5 ), θα δούμε στις μετρήσεις αν είναι ικανό να προκαλέσει κάποια ένδειξη αρχικής βλάβης στο ρουλεμάν, αφού ο άξονας διέρχεται από το αυτό με μία πολύ μικρή γωνία (σχήμα 9.4.Σ1 ). Για το έδρανο SNL 511 δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα, διότι έχει αυτορύθμιστο ρουλεμάν.



**Ο άξονας διέρχεται υπό γωνία στο ρουλεμάν**

Σχήμα 9.4.Σ1



Προσθήκες αλουμινίου

εικ.9.3.E6

## **Κεφάλαιο 10<sup>ο</sup>**

### **ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

#### **10.1 Διαδικασία Μέτρησης**

Πραγματοποιήθηκε ένας αριθμός μετρήσεων σε συγκεκριμένες θέσεις της διάταξης Rig, με το μηχάνημα T-30 της SPM τις οποίες επεξεργαστήκαμε στον Η/Υ μέσω του λειτουργικού προγράμματος CondMaster Pro .

#### **10.2 Τρόποι και θέσεις μετρήσεων**

##### **10.2.1 Γενικές παρατηρήσεις**

Θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να επιλέγουμε την καλύτερη δυνατή θέση στη μηχανή για να κάνουμε τις μετρήσεις μας. Η θέση του αισθητήρα είναι πρωταρχικής σημασίας για τη λήψη αξιόπιστων μετρήσεων. Έτσι μπορούμε να αναφέρουμε τις εξής γενικές παρατηρήσεις που θα πρέπει να τηρούνται:

- Οι μετρήσεις θα πρέπει να γίνονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στα ρουλεμάν και αν είναι δυνατόν στη ζώνη φόρτισης.
- Να αποφεύγουμε στο μέτρο του δυνατού μετρήσεις πάνω στα καλύμματα μιας μηχανής γιατί μπορεί να έχουμε παραπλανητικές ενδείξεις λόγω χαλαρότητας ή συντονισμού του καλύμματος.
- Φροντίζουμε ώστε ο αισθητήρας να εδράζεται άριστα με γωνία  $90^{\circ}$  στη θέση που θα επιλέξουμε τελικά. Συνήθως οι αισθητήρες έχουν μαγνήτη αλλά ακόμα και με την επενέργειά αυτού αν δεν προσέξουμε μπορεί να μην στηρίζεται καλά.
- Φροντίζουμε να αποφεύγουμε επιφάνειες καλυμμένες με μπογιά, τα χωρίσματα των καλυμμάτων, οτιδήποτε μη σταθερό και τα όποια διάκενα της κατασκευής.
- Αν θέλουμε να αντιπαραβάλλουμε μετρήσεις, πρέπει να μετράμε στο ίδιο ακριβώς σημείο . Συνήθης και απλή πρακτική είναι εφόσον πετύχουμε θέση που να δίνει ικανοποιητικό φάσμα να τη μαρκάρουμε με ανεξίτηλο μελάνι, ώστε να μπορέσουμε να ξανά μετρήσουμε στο ίδιο σημείο



### 10.2.2 Κατευθύνσεις μέτρησης

Γενικός κανόνας είναι ότι πρέπει να αναζητούμε την κατεύθυνση εφαρμογής των κυρίων δυνάμεων σε μια μηχανή και να τοποθετούμε κατά τη διεύθυνση αυτή τον αισθητήρα μας. Δεν πρέπει να ξεχνούμε ότι οι δονήσεις είναι αποτέλεσμα δυνάμεων, άρα όπου οι δυνάμεις μεγαλύτερες θα είναι μεγαλύτερες και οι δονήσεις. Και βέβαια υπενθυμίζεται ότι ο καλύτερος τρόπος να βρούμε την βέλτιστη κάθε φορά κατεύθυνση είναι η δοκιμή! Έτσι μπορούμε να κάνουμε μία αναφορά στις τρεις κύριες κατευθύνσεις μέτρησης:

#### Κατά αξονική κατεύθυνση (Axial)

Κάτω από ιδανικές συνθήκες, μετρήσεις κατά την αξονική κατεύθυνση παρουσιάζουν χαμηλά επίπεδα κραδασμών, καθώς οι περισσότερες δυνάμεις εμφανίζονται στις περισσότερες μηχανές κάθετα στον άξονα. Εντούτοις υπάρχουν και εξαιρέσεις διότι αυτό έχει να κάνει με το σχεδιασμό και τον τρόπο λειτουργίας της μηχανής.

#### Κατά την οριζόντια κατεύθυνση (Horizontal)

Οι μετρήσεις αυτές φανερώνουν τους περισσότερους κραδασμούς, διότι η μηχανές είναι συνήθως πιο εύκαμπτες στο οριζόντιο επίπεδο. Επίσης κατά αυτή την κατεύθυνση γίνονται πιο φανεροί κραδασμοί που έχουν να κάνουν με την αζυγοσταθμία, η οποία δημιουργεί ακτινικούς κραδασμούς, που όμως κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση αποσβένονται καλύτερα λόγω αυξημένης αδράνειας της μηχανής.

#### 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 της μηχανής και στην βαρύτητα.

### 10.2.3 Σημεία Μέτρησης

Οι μετρήσεις ελήφθησαν σε τρία στοιχεία μηχανής, τα δύο ρουλεμάν της ατράκτου και τον αυξηνητήρα. Συνολικά λάβαμε δεκατρείς μετρήσεις από τις οποίες οι τέσσερις έγιναν με τη χρήση του οργάνου μέτρησης κρουστικού παλμού, διότι η μέθοδος  $SPM \text{ } db_m / db_c$  απαιτεί μέτρηση μόνο σε ένα σημείο το οποίο έχει επιλεγθεί να είναι το κατακόρυφο, και άλλες εννιά – οριζόντια, κατακόρυφη και αξονική θέση-με τη χρήση του επιταχυνσιόμετρου.

Πριν τη λήψη των μετρήσεων έχουμε μεταφέρει τα δεδομένα από το PC στο μηχανήμα T-30. Οι μετρήσεις διαρκούν ελάχιστα, αφού για τον έλεγχο κάθε εξαρτήματος δεν ξεπερνάμε τα ενενήντα δεύτερα συνολικά.

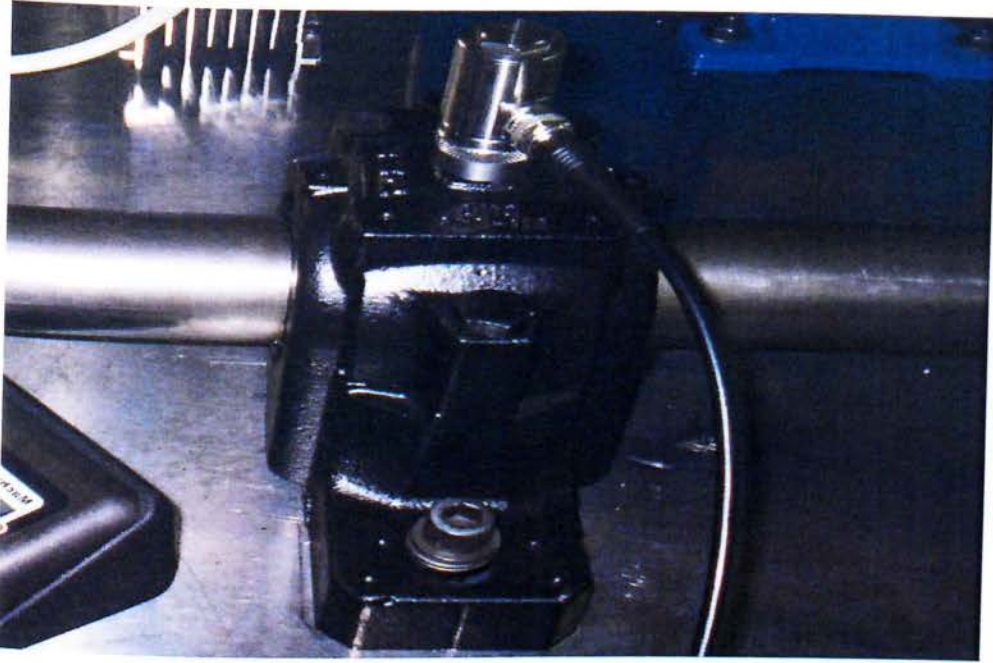
Στις φωτογραφίες που ακολουθούν, παρατηρούμε τα σημεία μέτρησης στο ένα από τα έδρανα με τα αντίστοιχα όργανα μέτρησης.



*Μέτρηση βάσει της μεθόδου  $SPM \text{ } db_m / db_c$  με τη χρήση του αισθητηρίου μέτρησης κρουστικού παλμού στην κατακόρυφη θέση για έλεγχο του ρουλεμάν*

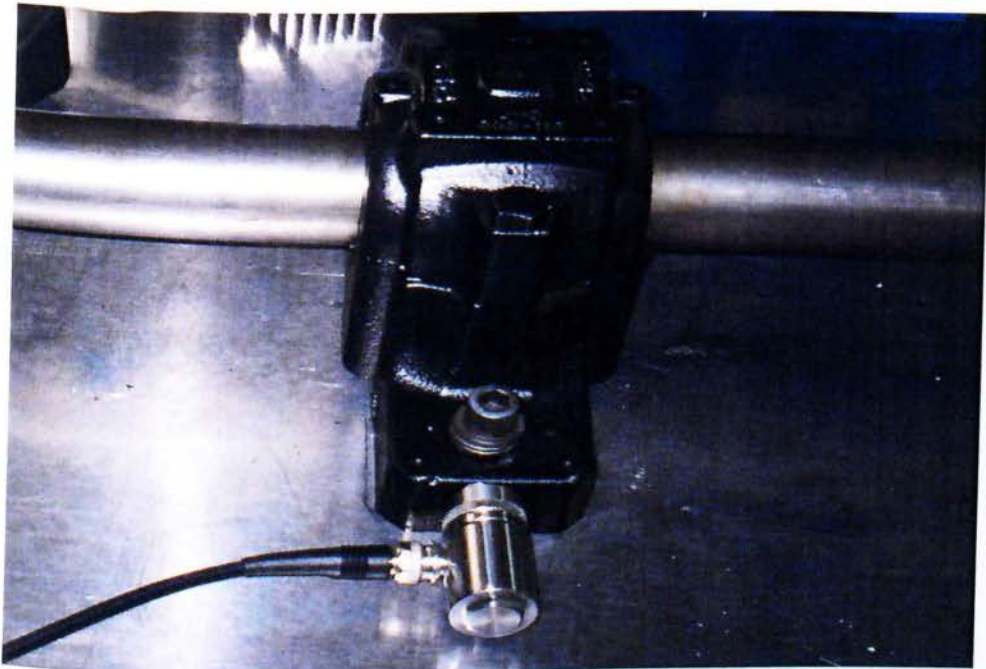
εικ.10.2.3.E1





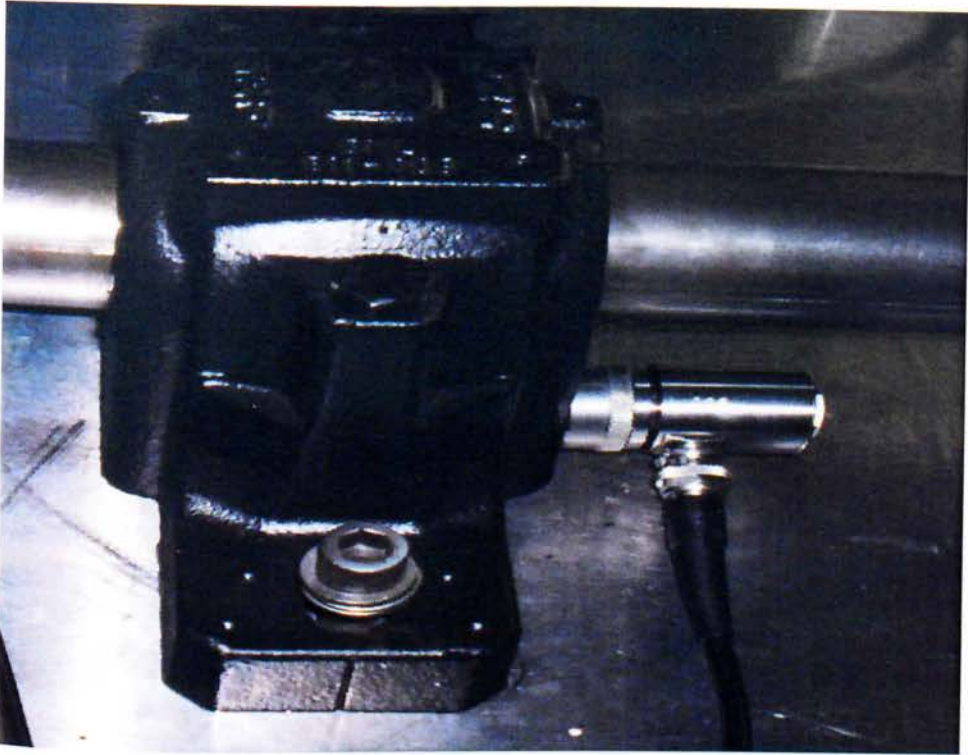
*Μέτρηση για έλεγχο VIB του ρουλεμάν και την ανάλυση EVAM στο πρόγραμμα, με το επιταχυνσιομέτρο να τοποθετείται στην κατακόρυφη θέση του εδράνου*

εικ.10.2.3.E2



*Μέτρηση για έλεγχο VIB του ρουλεμάν και την ανάλυση EVAM στο πρόγραμμα, με το επιταχυνσιομέτρο να τοποθετείται στην οριζόντια θέση του εδράνου*

εικ.10.2.3.E3



*Μέτρηση για έλεγχο VIB του ρουλεμάν και την ανάλυση EVAM στο πρόγραμμα,  
με το επιταχυνσιομέτρο να τοποθετείται στην αξονική θέση του εδράνου*

εικ.10.2.3.E4

Στις αντίστοιχες θέσεις (οριζόντια, κατακόρυφη, αξονική ) έγιναν και οι μετρήσεις στο άλλο ρουλεμάν και στον αυξηνητήρα. Στον τελευταίο, χρειάστηκε να γίνει διάνοιξη οπών με σπείρωμα ώστε να είναι δυνατή η συγκράτηση του επιταχυνσιομέτρου επάνω στη βάση του αυξηνητήρα αφού το μαγνητικό του άκρο δεν μπορεί να το συγκρατήσει επάνω στην επιφάνεια του αλουμινίου (εικ.10.2.3.E5,6,7 )

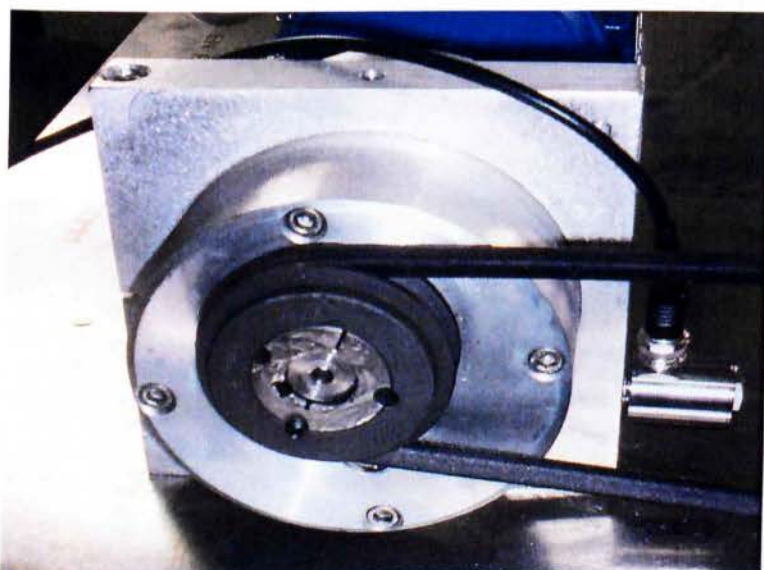
Στη συνέχεια τα δεδομένα από το T-30, μεταφέρθηκαν στον υπολογιστή ώστε να μπορέσουμε να τα επεξεργαστούμε.





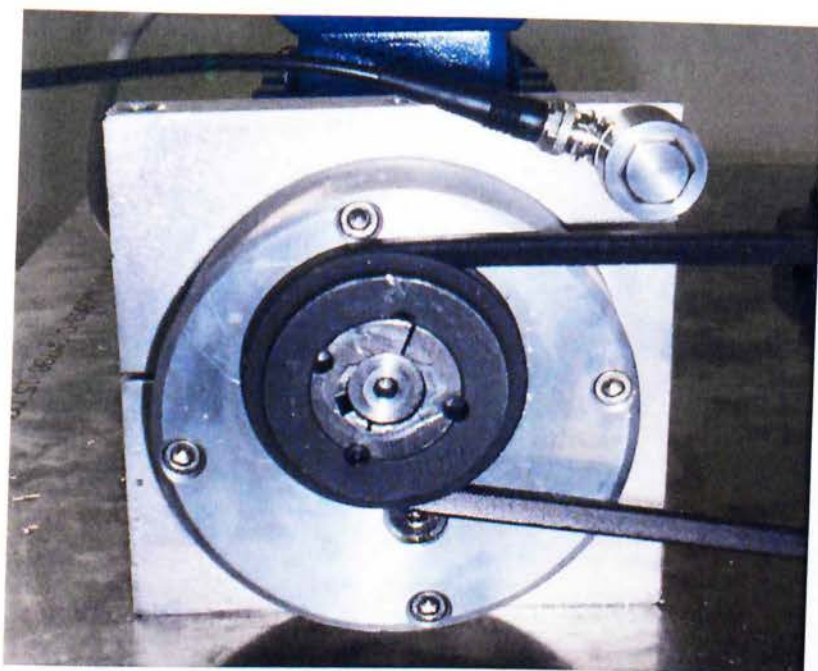
*Μέτρηση για έλεγχο VIB του αυξηνητήρα και την ανάλυση EVAM στο πρόγραμμα με το επιταχυνσιομέτρο να τοποθετείται στην κατακόρυφη θέση*

εικ.10.2.3.E5



*Μέτρηση για έλεγχο VIB του αυξηνητήρα και την ανάλυση EVAM στο πρόγραμμα με το επιταχυνσιομέτρο να τοποθετείται στην οριζόντια θέση*

εικ.10.2.3.E6



Μέτρηση για έλεγχο VIB του αυξηνητήρα και την ανάλυση EVAM στο πρόγραμμα με το επιταχυνσιομέτρο να τοποθετείται στην αξονική θέση

εικ.10.2.3.E7

Τέλος, αναφέρουμε σε όλες τις μετρήσεις οι στροφές περιστροφής του κινητήρα ήταν 1000 RPM, με απουσία επιβολής φορτίου στο σύστημα. Στον παρακάτω πίνακα, εμφανίζονται οι περιστροφικές ταχύτητες των υπόλοιπων στοιχείων μηχανών του RIG.

Ηλεκτροκινητήρας	1000 RPM
Άξονας εισόδου αυξηνητήρα (Z 1 = 40 )	1000 RPM
Άξονας εξόδου αυξηνητήρα (Z 2 = 20 )	2000 RPM
Τροχαλία d = 67 mm	2000 RPM
Τροχαλία d = 118 mm	1136 RPM
Άξονας d = 50 mm	1136 RPM

Πίνακας 8.1.2.1

Υπενθυμίζεται ότι η σχέση μετάδοσης από το μοτέρ στον άξονα είναι  $i_{\alpha\lambda} = 1,136$ . Συνεπώς, ο άξονας θα πρέπει να περιστρέφεται με 1136 RPM το οποίο και επιβεβαιώνεται από τη μέτρηση της περιστροφικής ταχύτητας με του οργάνου T-30

εικ.10.2.3.E8 ) .





*Μέτρηση της περιστροφικής ταχύτητας στον άξονα με το όργανο T-30  
προσαρμόζοντας τον κατάλληλο αισθητήρα*

εικ.10.2.3.E8

### 10.3 Αποτελέσματα μετρήσεων

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στο TEST RIG του Εργαστήριου των Στοιχείων Μηχανών του Ε.Μ.Π. . Η ανάλυση των αποδιαμορφωμένων φασμάτων, έγινε με βάση τα σήματα που πήραμε με το επιταχυνσιόμετρο στην οριζόντια θέση. Στο παράρτημα, υπάρχουν τα αποδιαμορφωμένα σήματα και από τις τρεις θέσεις μέτρησης. Το εύρος της συχνότητας του χρονικού παραθύρου του αποδιαμορφωμένου φάσματος για όλες τις μετρήσεις είναι 1000 Hz.

Με το πρόγραμμα CondMaster Pro είναι δυνατή η άμεση εξαγωγή συμπερασμάτων, διότι κάνει άμεση αντιστοίχιση των θεωρητικά αναμενόμενων συχνοτήτων της βλάβης και των συχνοτήτων των πειραματικών δεδομένων, ελέγχοντας τις τέσσερις πρώτες αρμονικές της αντίστοιχης συχνότητας βλάβης. Υπάρχει η δυνατότητα να αυξήσουμε αυτόν τον αριθμό των αρμονικών .

### 10.3.1 Έλεγχος αυξηνητήρα

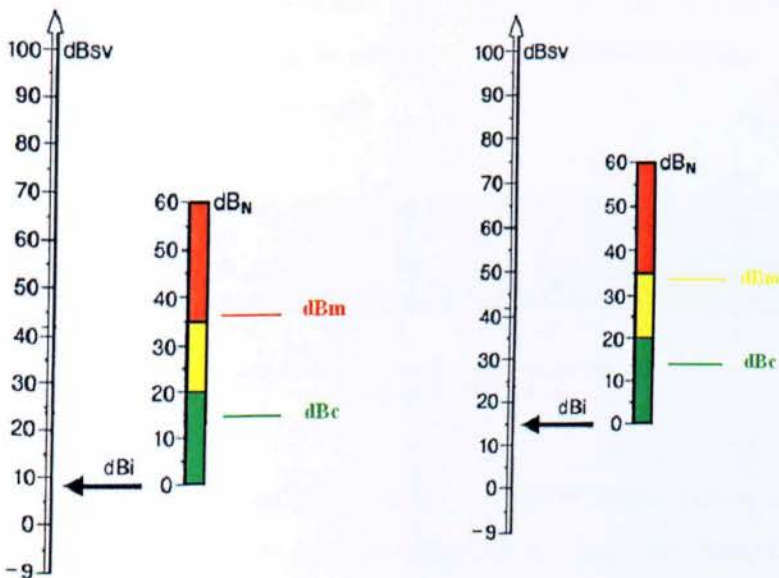
Ο έλεγχος στον αυξηνητήρα, έγινε για :

- ✓ Κατάσταση λειτουργίας των ρουλεμάν του.
- ✓ Κατάσταση λειτουργίας των γραναζιών του.
- ✓ Έλεγχος της ζυγοστάθμισής του.
- ✓ Έλεγχος της ευθυγράμμισής του.
- ✓ Έλεγχος πιθανής ταλάντωσης του μάντα.

Εδώ πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι ο αυξηνητήρας είναι κατασκευασμένος ώστε η ομαλή λειτουργία του να είναι στις 500 rpm ταχύτητα περιστροφής στην είσοδο. Κατά τη διάρκεια λήψης των μετρήσεων ο αυξηνητήρας δούλεψε στις 1000 RPM, αυτός είναι και ο λόγος εμφάνισης κραδασμών και θορύβου οι οποίοι μεταφέρονται και στην υπόλοιπη κατασκευή.

#### Έλεγχος των ρουλεμάν

Οι διαδικασίες ελέγχου αφορούν τα ρουλεμάν του αυξηνητήρα τα οποία είναι κατασκευασμένα από την εταιρία SKF με κωδικό 1211. Μία πρώτη εικόνα της κατάστασης στην οποία βρίσκονται τα ρουλεμάν κατά την λειτουργία τους δίνεται με τη μέθοδο dBm / dBc και βάσει των αποτελεσμάτων αυτής σχ.10.3.2.Σ1-πίν10.3.2.Π1 τα ρουλεμάν κατατάσσονται στην κίτρινη – αμφίβολης κατάστασης - περιοχή λειτουργίας του.



SKF 6004 - 1000 RPM

SKF 6004 - 2000 RPM

Σχήμα 10.3.2.Σ1



Ρουλεμάν	Εσωτερική Διάμετρος (mm)	RPM	dB <sub>i</sub>	dB <sub>m</sub>	dB <sub>c</sub>	Κατηγορία
SKF 6004	20	1000	9	35	16	Κίτρινη
SKF 6004	20	2000	15	33	15	Κίτρινη

Πίνακας 10.3.2.Π1

Παρατηρώντας τα διαγράμματα, βλέπουμε ότι και στα δύο ο βασικός παλμός ή παλμός χαλιού (dB<sub>c</sub>), εμφανίζεται στην πράσινη περιοχή ενώ ο μέγιστος παλμός παροχής dB<sub>m</sub>, εμφανίζεται στο όριο ή κοντά σε αυτό, μεταξύ κίτρινης και κόκκινης περιοχή. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι δεν εντοπίζεται κάποια αξιόλογη φθορά στα βασικά μέρη των ρουλεμάν. Δύο μπορεί να είναι οι πιθανές αιτίες αυτών των αποτελεσμάτων. Πρώτον, πιθανό πρόβλημα λίπανσης, δεύτερον μεταφορά των έντονων κραδασμών από το υπόλοιπο σύστημα και κύρια από τα γρανάζια του αυξηνητήρα. Διαγράμματα dB<sub>m</sub> / dB<sub>c</sub> όπως αυτό, αντιστοιχούν σε ρουλεμάν τα οποία έχουν καταπονηθεί . ελάχιστα. Περισσότερο λεπτομερή και αξιόπιστα αποτελέσματα θα έχουμε αναλύοντας το φάσμα.

Το πρόγραμμα Condmaster Pro μπορεί να υπολογίσει αυτόματα τις αναμενόμενες συχνότητες των σφαλμάτων ενός ρουλεμάν το οποίο περιστρέφεται με 1000 RPM. Για να μπορέσουμε να επαληθεύσουμε τα αποτελέσματα χρησιμοποιήσαμε τους υπολογισμούς συχνότητας βλάβης των ρουλεμάν της SKF, από την ιστοσελίδα της εταιρείας [www.skf.com](http://www.skf.com), και τα οποία εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα. Ολόκληρη σελίδα υπολογισμών υπάρχει στο παράρτημα:

Κωδικός Ρουλεμάν	RPM	BPFO (Hz)	BPFI (Hz)	BSF (Hz)	FTF (Hz)
SKF 6004	1000	59,6	90,4	39,0	6,6

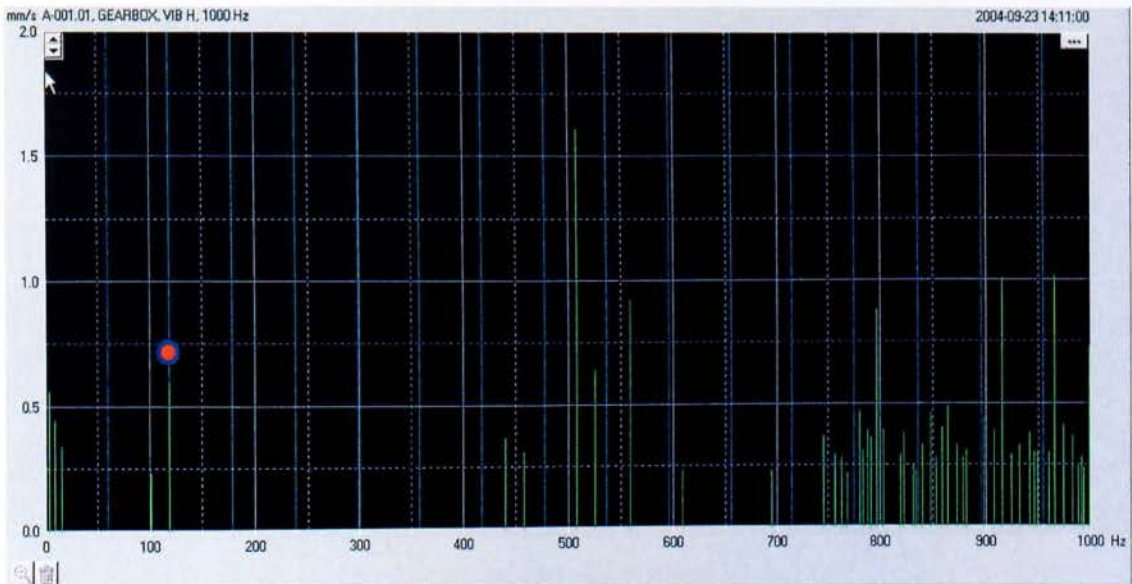
Πίνακας 10.3.2.Π2

Στη συνέχεια θα δούμε τα διαγράμματα του αποδιαμορφωμένου φάσματος το οποίο λάβαμε κατά τη μέτρηση με το επιταχυνσιόμετρο σε οριζόντια θέση. Για την αναζήτηση κάθε βλάβης, θα παρουσιάσουμε ξεχωριστό διάγραμμα. Οι γραμμές χρώματος μπλε οι οποίες εμφανίζονται στα διαγράμματα αντιστοιχούν στις θεωρητικά αναμενόμενες συχνότητες της βλάβης.

Με μια πρώτη ματιά στο αποδιαμορφωμένο φάσμα του σήματος, παρατηρούμε ότι υπάρχει συγκέντρωση αιχμών στο πεδίο συχνοτήτων μεταξύ 750 - 1000 Hz, με τη μέγιστη αυτών στα 510 Hz περίπου.

### ***Βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο (BPFO)***

Η συχνότητα BPFO στην οποία αναμένουμε ένδειξη προβλήματος στον εξωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν είναι αυτή των 59,6 Hz ( 1x ), όπως αυτό φαίνεται τόσο στο παράθυρο του φάσματος με την πρώτη μπλε γραμμή (αναμενόμενη θεωρητική) όσο και από τον πίνακα 10.3.2.Π2. Στη συχνότητα αυτή δεν παρατηρείται κάποια αιχμή, αλλά στη δεύτερη αρμονική της που είναι τα 120 Hz περίπου, μία αιχμή του φάσματος πλάτους 0,6 mm/s δείχνει να συμπίπτει με αυτήν. Στις επόμενες αρμονικές ( 3x, 4x, 5x ) της συχνότητας BPFO δεν παρατηρείται κάποια ταύτιση αιχμών του φάσματος με αυτές.



*Αποδιαμορφωμένο σήμα.*

*Οι μπλε γραμμές αποτελούν τις θεωρητικές συχνότητες εμφάνισης της BPFO*

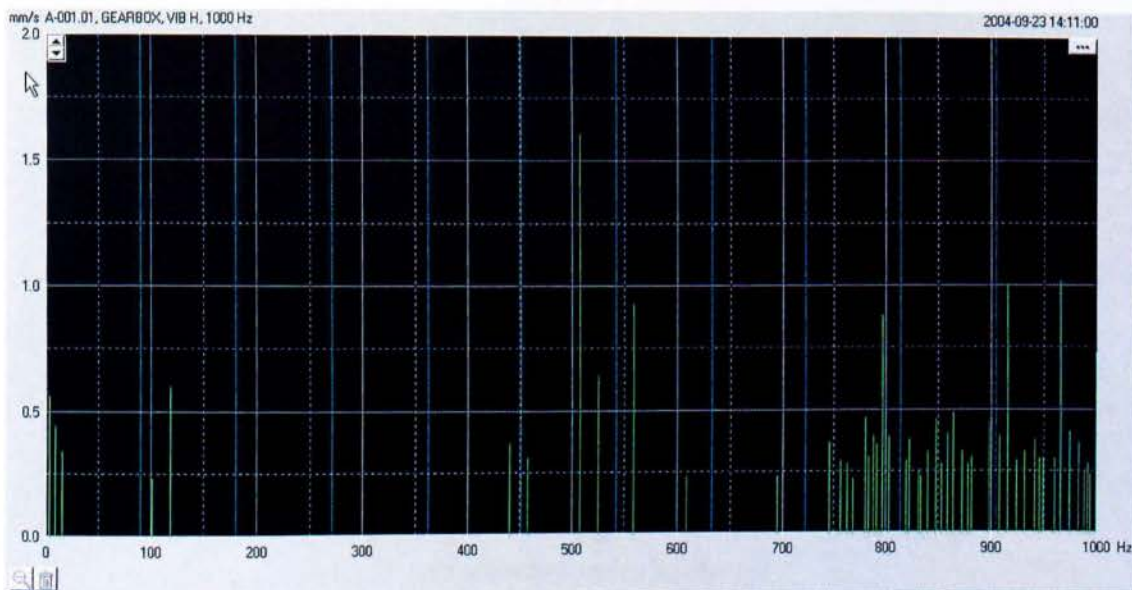
*Διάγραμμα 10.3.2.Δ1*



Τόσο από την ανάλυση του φάσματος όσο και αποτελέσματα προγράμματος Condmaster Pro επιβεβαιώνεται η ταύτιση μίας συχνότητας των πειραματικών αποτελεσμάτων με τη δεύτερη αρμονική της BPFO (Πιν. 10.3.2.Π3). Αυτό είναι ένδειξη για παρακολούθηση της κατάστασης του εξωτερικού δακτυλίου του ρουλεμάν με μελλοντικό επανέλεγχο του σημείου.

### **Βλάβη στον εσωτερικό δακτύλιο (BPFI)**

Σύμφωνα με τον πίνακα 10.3.2.Π2, και από το παράθυρο του διαγράμματος ελέγχου βλάβης στον εσωτερικό δακτύλιο (Διάγρ.10.3.2.Δ2) η πρώτη αρμονική (μπλε γραμμή) της συχνότητας BPFI αναμένεται στα 90,4 Hz ( 1x ). Παρατηρούμε όμως ότι ούτε στην πρώτη αναμενόμενη ούτε σε κάποια από τις αρμονικές της ( 2x, 3x, 4x, 5x, 6x ), παρουσιάζεται ταύτιση συχνοτήτων φάσματος μεταξύ των θεωρητικά αναμενόμενων και αυτών των πειραματικών δεδομένων.



*Αποδιαμορφωμένο σήμα.*

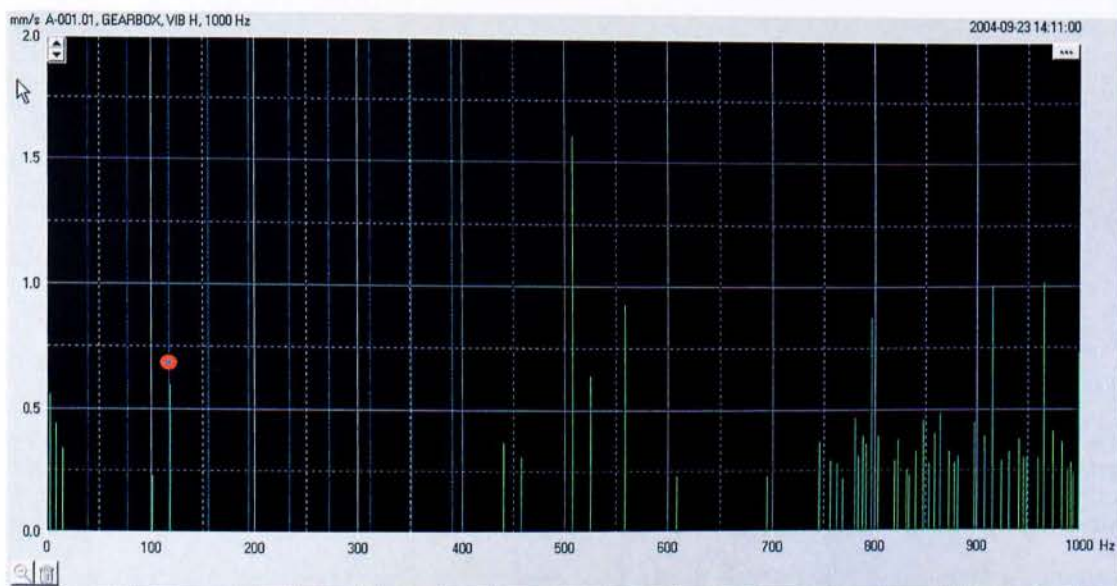
*Οι μπλε γραμμές αποτελούν τις θεωρητικές συχνότητες εμφάνισης της BPFI*

*Διάγραμμα 10.3.2.Δ2*

Το ίδιο αποτέλεσμα εμφανίζεται και στον πίνακα 10.3.2.Π3 όπου δίνεται μηδέν στην αντιστοιχία θεωρητικών – πειραματικών συχνοτήτων βλάβης BPF1. Η ένδειξη αυτή είναι χαρακτηριστική της μη ύπαρξης προβλήματος στον εσωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν.

### **Βλάβη στις σφαίρες του ρουλεμάν (BSF)**

Η θεωρητικά αναμενόμενη συχνότητα εμφάνισης βλάβης στις σφαίρες του ρουλεμάν, είναι τα 39 Hz. Εκεί, δεν υπάρχει καμία αιχμή στο φάσμα μας (Διάγρ. 10.3.2.Δ3 ). Παρατηρούμε όμως στην τρίτη αρμονική της στα 117 Hz περίπου, να συμπίπτει μία αιχμή του φάσματος του αποδιαμορφωμένου σήματος. Βλέποντας όμως μέσα από το πρόγραμμα την τιμή της συχνότητας της αιχμής αυτής είδαμε ότι είναι στα 119 Hz , τιμή η οποία συμπίπτει με τη δεύτερη αρμονική της BPF0. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το πρόγραμμα δε βρίσκει ταύτιση μεταξύ της θεωρητικής συχνότητας BSF και των πειραματικών αποτελεσμάτων. Καμία άλλη από τις δέκα πρώτες αρμονικές της ( 2x, 4x, 5x, 6x ) δεν συμπίπτει με κάποια από τις αιχμές του φάσματος.. Επομένως, το ρουλεμάν δεν αντιμετωπίζει πρόβλημα σφαιρών.



*Αποδιαμορφωμένο σήμα.*

*Οι μπλε γραμμές αποτελούν τις θεωρητικές συχνότητες εμφάνισης της BSF*

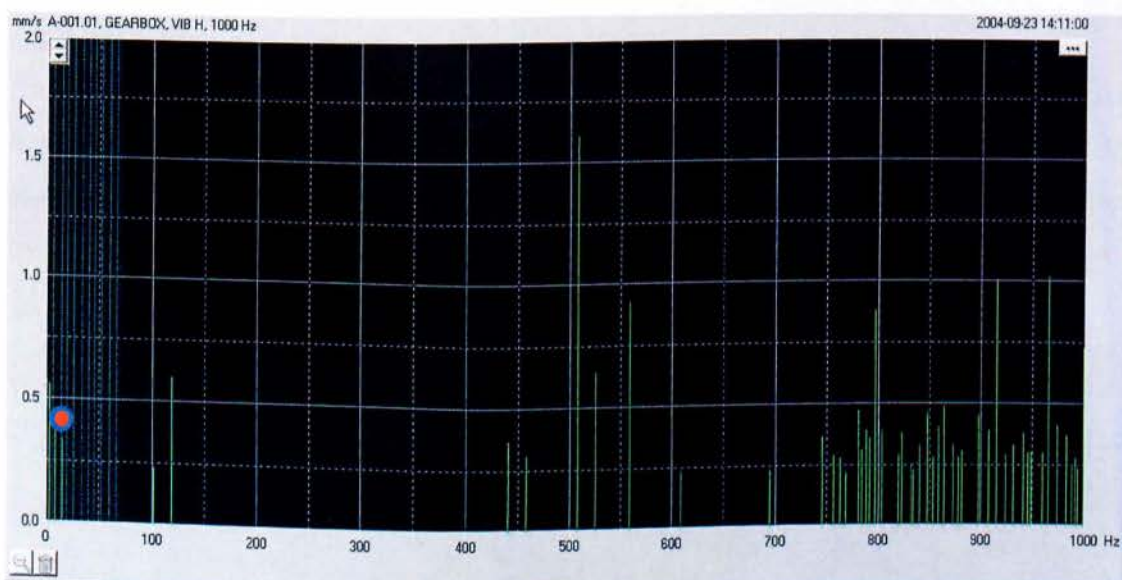
*Διάγραμμα 10.3.2.Δ3*

### **Βλάβη στον κλωβό (FTF)**

Ένας ακόμη έλεγχος στο ρουλεμάν γίνεται για τη συχνότητα περιστροφής του κλωβού FTF. Η θεωρητικά αναμενόμενη συχνότητα εμφάνισης βλάβης στον κλωβό του ρουλεμάν,



είναι τα 6,6 Hz. Παρατηρούμε, ότι πολύ κοντά σε αυτή την τιμή βρίσκεται μια αιχμή του φάσματος. Αλλά και οι επόμενες δύο από τις τρεις πρώτες αιχμές του φάσματος, βρίσκονται κοντά στις αρμονικές της FTF. Λόγω του πολύ μικρού εύρους της συχνότητας FTF ( 6,6 Hz ) εμφανίζονται να συμπίπτουν οι θεωρητικές με τις πειραματικές συχνότητες. Από τις πέντε πρώτες αρμονικές, μόνο η τρίτη ( 3x ) αρμονική ταυτίζεται οπτικά με μία αιχμή του φάσματος πλάτους περίπου 0,35 mm/s. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται και από τον πίνακα 10.3.2.Π3 με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του προγράμματος όπου το πλάτος της αιχμής δίνεται 0,34mm/s. Εξαιτίας του μικρού πλάτους αυτής της συχνότητας, διαπιστώνουμε ότι δεν υπάρχει κάποιο σημαντικό πρόβλημα στον κλωβό του ρουλεμάν.



*Αποδιαμορφωμένο σήμα.*

*Οι μπλε γραμμές αποτελούν τις δέκα πρώτες θεωρητικές συχνότητες εμφάνισης της FTF*

**Διάγραμμα 10.3.2.Δ4**

Έπειτα από την ανάλυση του φάσματος για κάθε μία από τις συχνότητες παρουσίασης βλάβης των ρουλεμάν και από τη μέθοδο  $dB_m / dB_c$ , τα συμπεράσματα τα οποία εξαγονται είναι τα εξής: Τα ρουλεμάν στον αυξηνητήρα, στα οποία δεν είχαμε δημιουργήσει κάποια βλάβη, δεν εμφανίζουν κάποιο σημαντικό πρόβλημα. Ενδείξεις για μελλοντικό επανέλεγχο έχουμε για τον εξωτερικό δακτύλιο αλλά και για τον κλωβό. Βέβαια τα ρουλεμάν αυτά, δέχονται έντονους κραδασμούς από την λειτουργία του αυξηνητήρα, κάτι το οποίο γίνεται αντιληπτό άμεσα από έναν παρατηρητή.

### Έλεγχος των γραναζιών

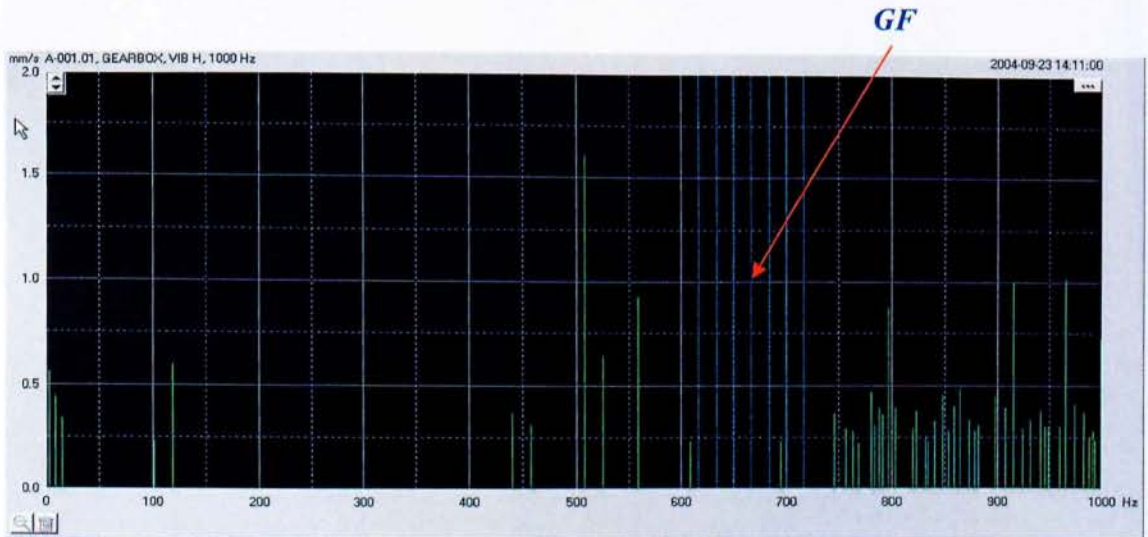
Μεταξύ των δύο οδοντωτών τροχών του αυξηνητήρα της διάταξης Test Rig μπορεί να υπολογισθεί η συχνότητα εμπλοκής τους από τη σχέση:

$$GF = N_i \cdot S_i \approx 667 \text{ Hz}$$

Έλεγχος του πρώτου γραναζιού ( στεφάνη με  $Z_1 = 40$  )

Παρατηρώντας το διάγραμμα του φάσματος του αποδιαμορφωμένου σήματος διαγρ. 10.3.2.Δ5, βλέπουμε ότι δεν εμφανίζεται ταύτιση αιχμής του φάσματος με τη συχνότητα εμπλοκής. Το πρόγραμμα εκτός από τη συχνότητα εμπλοκής ελέγχει τις πλευρικές συχνότητες ( sidebands ) οι οποίες διαφέρουν  $\pm f_r$  , κατά  $\pm 2f_r$  και  $\pm 3f_r$  από τη συχνότητα εμπλοκής ( $f_r$ : η συχνότητα περιστροφής της ατράκτου) .

Στον έλεγχο αυτό εντοπίζεται από το πρόγραμμα μια ταύτιση αιχμής με μία πλευρική συχνότητα της GF. Είναι η αιχμή στα 690 Hz περίπου πλησίον της  $GF + 2f_r$  στα  $\sim 700$  Hz. Η απόσταση αυτή των 10 Hz αλλά και το μικρό πλάτος της αιχμής μας κάνουν να μην μας ανησυχεί το παραπάνω γεγονός.



Αποδιαμορφωμένο σήμα.

Η μπλε γραμμή είναι η συχνότητα εμπλοκής με τις τρεις πλευρικές θεωρητικές συχνότητες εμφάνισης της για το πρώτο γρανάζι.

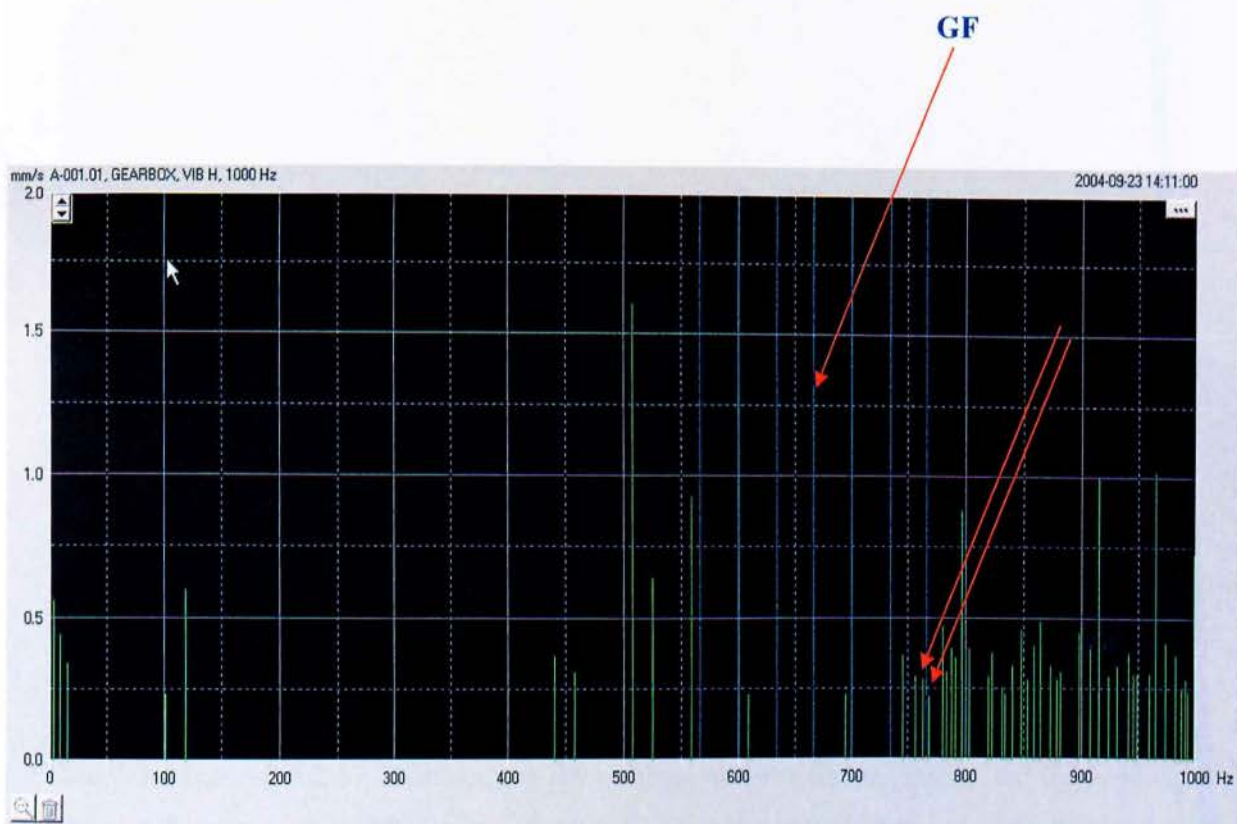
Διάγρ. 10.3.2.Δ5



Έλεγχος του δεύτερου γραναζιού ( πηνιόν με  $Z_2 = 20$  ):

Παρατηρώντας το διάγραμμα συχνοτήτων βλέπουμε ότι μία πλευρική συχνότητα της GF ταυτίζεται με δύο αιχμές του αποδιαμορφωμένου σήματος των πειραματικών μετρήσεων οι οποίες όμως έχουν πολύ μικρό πλάτος του φάσματος.

Το πρόγραμμα επιβεβαιώνει και αυτή τη φορά τις παρατηρήσεις που έγιναν μετά από οπτικό έλεγχο του διαγράμματος δηλαδή ότι δύο αιχμές πειραματικών αποτελεσμάτων να συσχετίζεται με τη αντίστοιχη θεωρητική συχνότητα. Για το λόγο που προαναφέραμε ότι τα πλάτη των συχνοτήτων είναι πολύ μικρά μπορούμε να πούμε ότι, προς το παρόν, δεν αντιμετωπίζουμε κάποιο ουσιαστικό πρόβλημα με τον αυξητήρα.



Αποδιαμορφωμένο σήμα. Οι μπλε γραμμές είναι η συχνότητα εμπλοκής με τις τρεις πλευρικές θεωρητικές συχνότητες εμφάνισης της για το δεύτερο γρανάτζι.

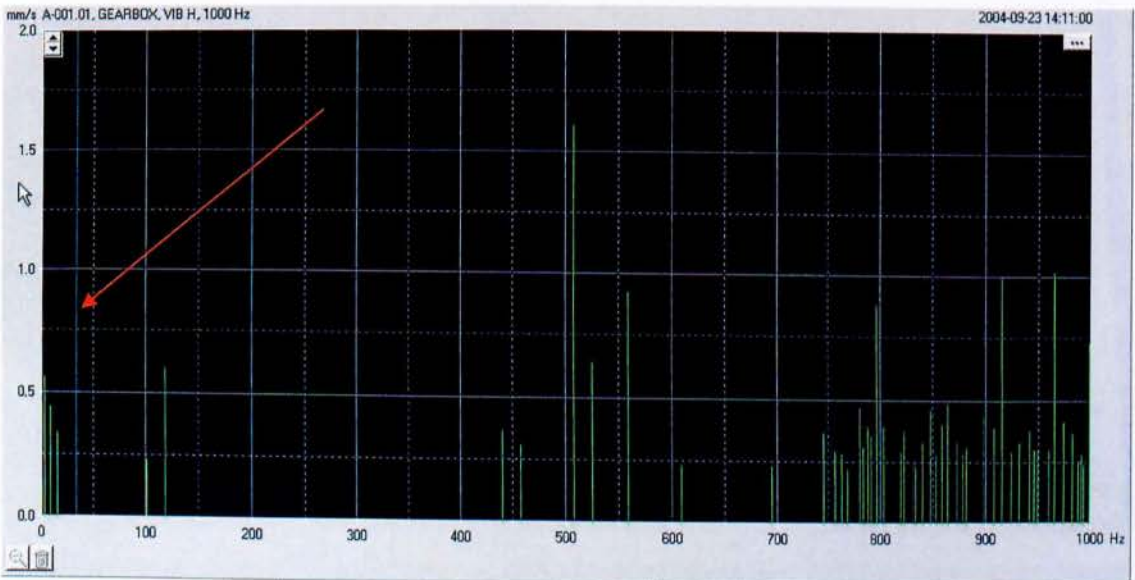
Διάγρ. 10.3.2.Δ6

Μία επισήμανση η οποία ενισχύει την αξιοπιστία του T-30 ως όργανο και των μεθόδων διάγνωσης και πρόληψης βλαβών που χρησιμοποιεί, είναι ότι παρά το μικρό πλάτος που εμφανίζουν, λόγω της μη σοβαρής βλάβης που έχουμε δημιουργήσει στα δόντια του γραναζιού ( η μορφή της εξειλιγμένης είναι ευθεία γραμμή ), εντοπίστηκαν οι δύο αιχμές για

το δεύτερο γρανάζι οι οποίες ταυτίζονται με μία θεωρητική πλευρική συχνότητα της βλάβης του γραναζιού

### Έλεγχος αζυγοσταθμίας

Η θεωρητική τιμή της συχνότητας στην οποία εμφανίζεται η αζυγοσταθμία, ταυτίζεται με αυτή της συχνότητας περιστροφής μιας ατράκτου και επειδή θέλουμε να ελέγξουμε την αζυγοσταθμία στον άξονα εξόδου του αυξηνητήρα όπου έχουμε την τροχαλία, υπολογίζουμε τη συχνότητα με βάση τις στροφές στην έξοδο ( 2000 RPM ). Η θεωρητική τιμή της συχνότητας αζυγοσταθμίας είναι 33,3 Hz .



*Αποδιαμορφωμένο σήμα.*

*Η μπλε γραμμή είναι η μόνη αναμενόμενη συχνότητα εμφάνισης τυχόν αζυγοσταθμίας*

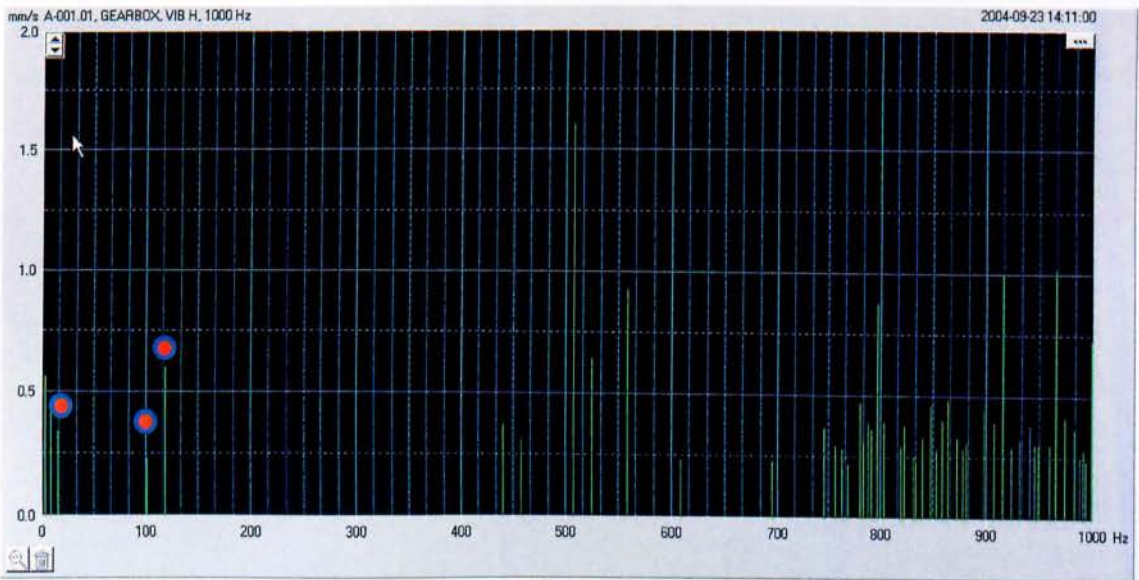
*Διάγρ. 10.3.2.Δ7*

Στο διάγραμμα 10.3.2.Δ7 βλέπουμε, ότι δεν υπάρχει ταύτιση κάποιας αιχμής της συχνότητας του αποδιαμορφωμένου φάσματος των πειραματικών μετρήσεων με την θεωρητική συχνότητα. Αποτέλεσμα το οποίο δίνει και το πρόγραμμα όπως φαίνεται και στον σχετικό πίνακα. Ως συμπέρασμα αυτών μπορούμε να πούμε ότι δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα αζυγοσταθμίας στο ζεύγος αυξηνητήρα – τροχαλίας.



### Έλεγχος ευθυγράμμισης

Θα γίνει έλεγχος ευθυγράμμισης, μεταξύ των αξόνων του ηλεκτροκινητήρα και του αυξηνητήρα. Οι αναμενόμενες θεωρητικές συχνότητες εμφάνισης σφάλματος ευθυγράμμισης είναι οι αρμονικές της συχνότητας της ταχύτητας περιστροφής η οποία είναι 1000 RPM και η συχνότητα είναι 16,7 Hz.



*Αποδιαμορφωμένο σήμα. Οι μπλε γραμμές αποτελούν τις αρμονικές της συχνότητας περιστροφής και είναι οι αναμενόμενες συχνότητες εμφάνισης κακής ευθυγράμμισης*

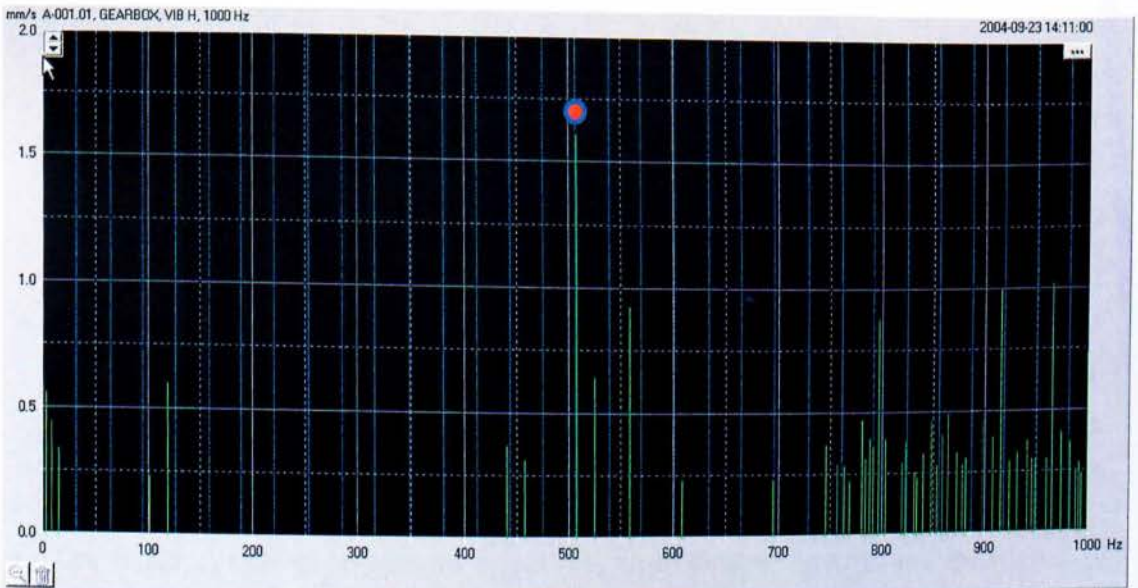
Διάγρ. 10.3.2.Δ8

Παρατηρώντας το διάγραμμα βλέπουμε ότι στην πρώτη αρμονική έχουμε ταύτιση με μια αιχμή πλάτους περίπου 0,30 mm/s όπως και στην έκτη και έβδομη αρμονική ( 6x , 7x ) με τιμή πλάτους περίπου 0,60 mm/s για την 7x. Βέβαια, η έβδομη αρμονική δεν μπορεί να αποτελεί δείκτη διάγνωσης σφάλματος ευθυγράμμισης. Με το γεγονός ότι όμοια αποτελέσματα παίρνουμε και από το πρόγραμμα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει σφάλμα ευθυγράμμισης μεταξύ των αξόνων ηλεκτροκινητήρα – αυξηνητήρα,. Χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε όργανα τα οποία διαθέτουν δέσμη φωτός ώστε να ευθυγραμμίσουμε τους υπό σύμπλεξη άξονες.

### Έλεγχος της ταλάντωσης του ιμάντα

Οι αρμονικές της συχνότητας περιστροφής ενός ιμάντα είναι εκείνες στις οποίες θεωρητικά αναμένουμε την εμφάνιση προβλήματος λόγω ταλάντωσης του.

Στο παρακάτω διάγραμμα του φάσματος, εντοπίζουμε τρεις αιχμές του φάσματος να ταυτίζονται με αναμενόμενες θεωρητικές συχνότητες με μέγιστη αιχμή στα 510 Hz και όπως ακριβέστερα αποδίδει το πρόγραμμα, είναι ( 1,62 mm/s ). Με αυτά τα αποτελέσματα το συμπέρασμα το οποίο εξάγουμε είναι ότι ο ιμάντας ταλαντώνεται έντονα στο σύστημα κάτι το οποίο αντιλαμβάνεται εύκολα ένας παρατηρητής του συστήματος και έχει ως κύριο αίτιο την όχι καλή τάνυση του ιμάντα



*Αποδιαμορφωμένο σήμα.*

*Οι μπλε γραμμές είναι οι αρμονικές της συχνότητας περιστροφής του ιμάντα .  
Είναι οι αναμενόμενες συχνότητες ένδειξης προβλήματος κυρίως ταλάντωσης.*

Διάγρ. 10.3.2.Δ9



Κατόπιν της λήψης μετρήσεων στον αυξηνητήρα και της ανάλυσης του φάσματος αυτών, μπορούμε να πούμε τα εξής σχετικά με τα διάφορα στοιχεία:

Τα ρουλεμάν πρέπει να παρακολουθούνται με μελλοντικούς ελέγχους γιατί λόγω των έντονων κραδασμών πιθανόν να εμφανίσουν πρόβλημα. Τα γρανάζια δεν δείχνουν κάτι το αξιοσημείωτο παρά το γεγονός ότι ένα δόντι δεν κατασκευάστηκε με εξειλιγμένη, όπως επίσης και η ζυγοστάθμιση του συστήματος ήταν σωστή. Προβλήματα έδειξε να υπάρχουν στην ευθυγράμμιση μεταξύ ηλεκτροκινητήρα και αυξηνητήρα καθώς και λόγω ταλαντώσεων του μάντα.

Στη συνέχεια παραθέτουμε τον πίνακα με τα αποτελέσματα τα οποία δίνει το πρόγραμμα Condmaster Pro (Π3).

Symptom	Value	Match	COND	COND=0
11 Misalignment	0.31	3		
10 Unbalance	0.00	0		
21 Gear damage Z2	0.36	2		
20 Gear damage Z1	0.23	1		
61 Belt problems	1.62	3		
Bearing, BPFO	0.60	1		
Bearing, BPFI	0.00	0		
Bearing, BSF	0.00	0		
Bearing, FTF	0.34	1		

### *Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του προγράμματος Condmaster Pro 2*

Πίνακας 10.3.2.Π3

Στη στήλη Value καταγράφεται η μέγιστη τιμή πλάτους αιχμής του φάσματος των μετρήσεων από το σύνολο αυτών που ταυτίζονται με τις θεωρητικές. Επίσης, στη στήλη Match καταγράφεται το πλήθος ταύτισης θεωρητικών – πειραματικών συχνοτήτων

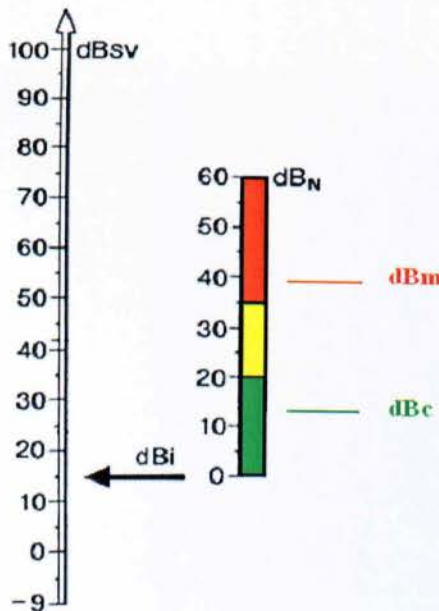
Μετά την αναλυτική διαδικασία την οποία ακολουθήσαμε κάνοντας σύγκριση της ανάλυσης του φάσματος με τις τιμές του πίνακα του προγράμματος, μπορούμε με ασφάλεια να πούμε ότι έχουμε όμοια αποτελέσματα μεταξύ των δύο μεθόδων. Έτσι κρίνεται σκόπιμο, για τον έλεγχο των άλλων δύο ρουλεμάν να εμπιστευθούμε τα αποτελέσματα των πινάκων του προγράμματος και να μην ακολουθήσουμε την αναλυτική μέθοδο.

### 10.3.2 Έλεγχος του ρουλεμάν SKF YET 210

Οι διαδικασίες ελέγχου αφορούν το ρουλεμάν με κωδικό YET - 210 κατασκευασμένο από την εταιρία SKF. Μία πρώτη εικόνα της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το ρουλεμάν κατά την λειτουργία του έχουμε με τη λήψη μετρήσεων μέσω του αισθητήρα κρουστικών παλμών και τη χρήση της μεθόδου dBm / dBc. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτής σχ.8.2.3.Σ1-πίν8.2.3.Ι κατατάχθηκε στην κόκκινη περιοχή (κακής λειτουργίας).

Ρουλεμάν	Εσωτερική Διάμετρος (mm)	RPM	dB <sub>i</sub>	dB <sub>m</sub>	dB <sub>c</sub>	Κατηγορία
SKF YET 210	50	1136	15	39	14	Κόκκινη

Πίνακας 10.3.3.Π1



SKF YET 210

Σχήμα 10.3.3.Σ1

Στο διάγραμμα έχουμε τον βασικό παλμός dB<sub>c</sub> να βρίσκεται χαμηλά στην πράσινη περιοχή, ενώ τον μέγιστο παλμό dB<sub>m</sub>, στην κόκκινη περιοχή με τιμή τα 39 dB (< 40 dB). Ένα τέτοιο διάγραμμα συνήθως έχουμε όταν ένα ρουλεμάν βρίσκεται στα πρώτα στάδια εμφάνισης βλάβης, χωρίς όμως να αποκλείεται ως αιτία εμφάνισης αυτών των αποτελεσμάτων διαγράμματος τυχόν κακή λίπανση στον κλωβό, που πιθανό να οδηγήσει σε



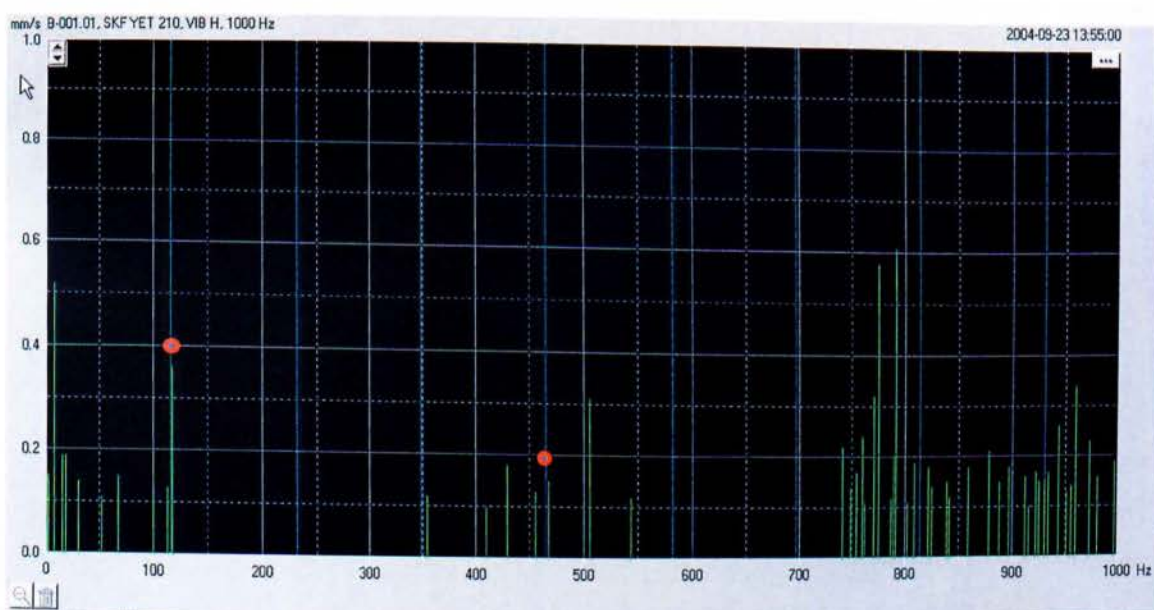
μελλοντικά προβλήματα αυτού. Όμως σαφή συμπεράσματα, θα έχουμε αναλύοντας τον συγκεντρωτικό πίνακα διάγνωσης προβλημάτων του προγράμματος Condmaster Pro που ακολουθεί.

Symptom	Value	Match	COND	COND=0
BPFO	0.39	2		
BPFI	0.31	2		
BSF	0.32	3		
FTF	0.55	4		

*Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του προγράμματος Condmaster Pro 2 (SKF YET 210)*

Πίνακας 10.3.3.Π2

Στη συνέχεια θα παραθέσουμε τα διαγράμματα με τις αναμενόμενες συχνότητες βλάβης ( BPFO, BPFI, BSF, FTF )του αποδιαμορφωμένου φάσματος του σήματος του ρουλεμάν, με το επιταχυνσιόμετρο να τοποθετείται στην οριζόντια θέση

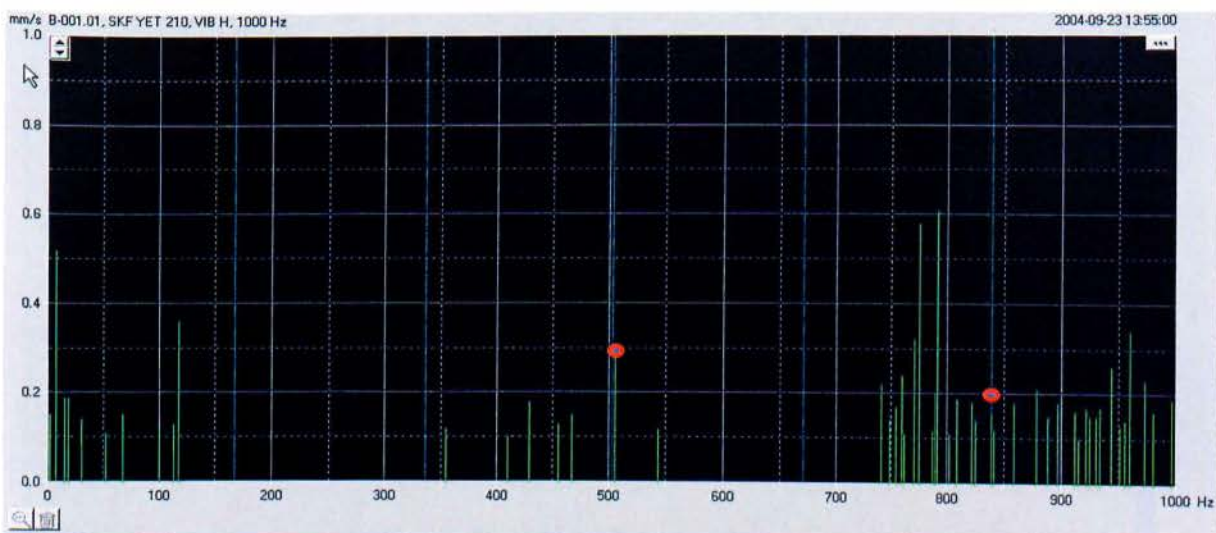


*Αποδιαμορφωμένο σήμα.*

*Η αναμενόμενη κύρια συχνότητα της BPFO με τις αρμονικές της*

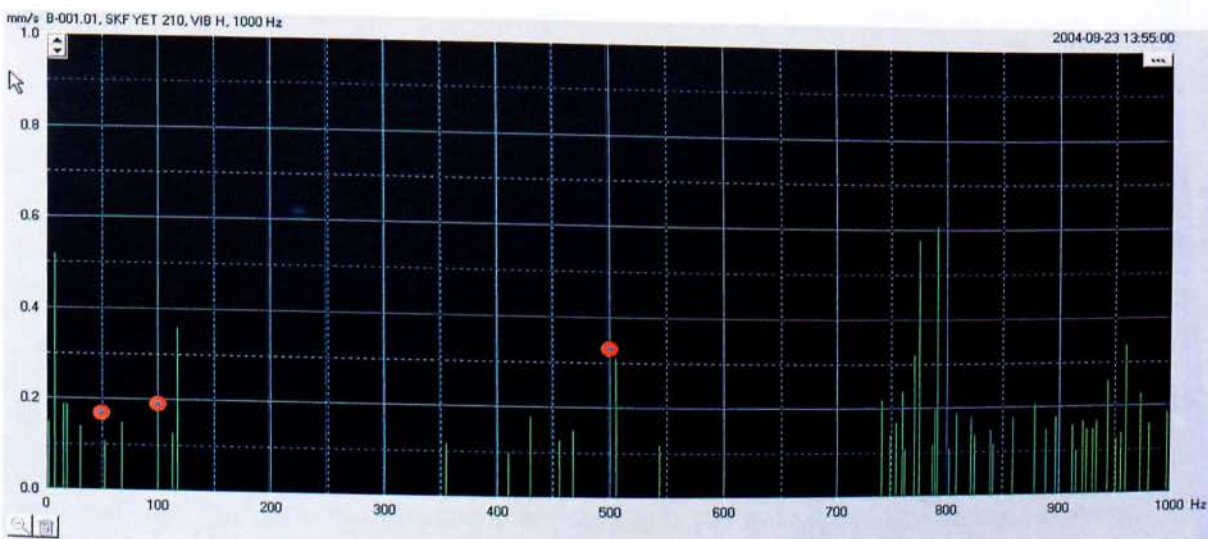
Διάγρ. 10.3.3.Δ1

Δύο αρμονικές των θεωρητικά αναμενόμενων συχνοτήτων της BPFO οι ( 1x και 4x ) ταυτίζονται με αιχμές του φάσματος του σήματος, με μέγιστο πλάτος αιχμής αυτής που συμπίπτει με την πρώτη αρμονική και είναι 0,39 mm/s. Το συμπέρασμα από αυτό είναι ότι υπάρχει κάποιο πρόβλημα στον εξωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν.



*Αποδιαμορφωμένο σήμα. Η αναμενόμενη κύρια συχνότητα της BPF1 με τις αρμονικές της  
Διάγρ. 10.3.3.Δ2*

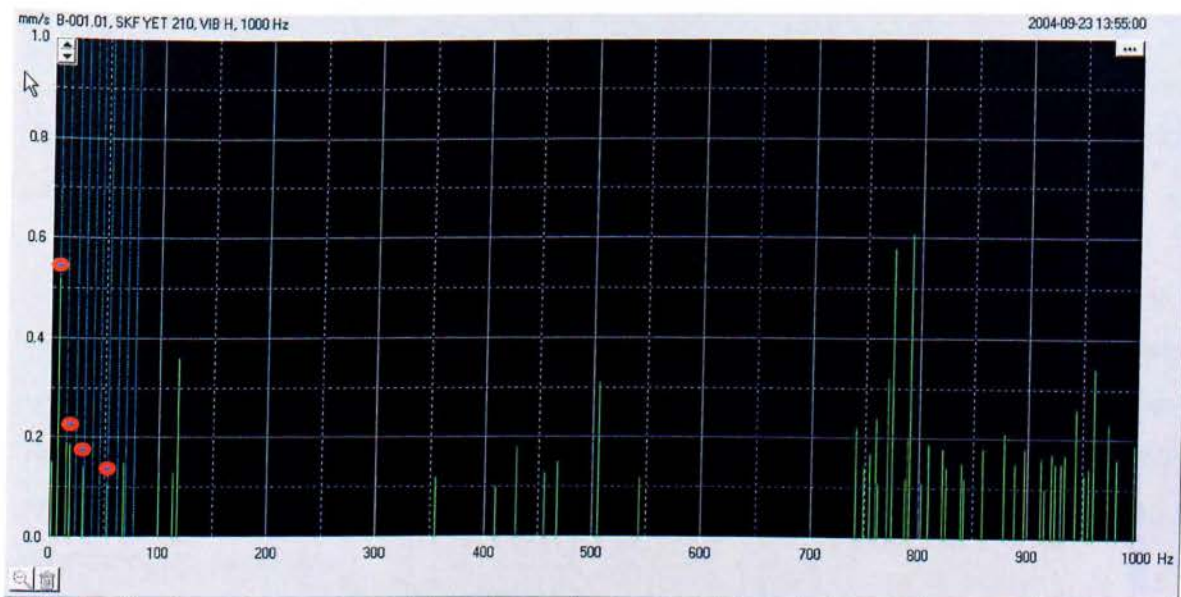
Δύο αρμονικές των θεωρητικά αναμενόμενων συχνοτήτων της BPF1 ( 3x και 5x ) ταυτίζονται με αιχμές του φάσματος του σήματος, με μέγιστο πλάτος αιχμής αυτής που συμπίπτει με την τρίτη αρμονική και είναι 0,31 mm/s. Το συμπέρασμα από αυτό είναι ότι υπάρχει κάποιο πρόβλημα στον εσωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν.



*Αποδιαμορφωμένο σήμα. Η κύρια αναμενόμενη BSF με τις αρμονικές της  
Διάγρ. 10.3.3.Δ3*

Τρεις αρμονικές των θεωρητικά αναμενόμενων συχνοτήτων BSF ( 1x , 2x , 10x ) ταυτίζονται ή είναι πολύ κοντά με αιχμές του φάσματος του σήματος, με μέγιστο πλάτος αιχμής να είναι 0,32 mm/s. Το συμπέρασμα από αυτό είναι ότι πιθανό να υπάρχει κάποιο πρόβλημα των σφαιρών του ρουλεμάν αν και τα πλάτη είναι μικρά.





Αποδιαμορφωμένο φάσμα και η αναμενόμενη FTF με τις αρμονικές της  
Διάγρ. 10.3.3.Δ4

Τέσσερις αρμονικές των θεωρητικά αναμενόμενων συχνοτήτων FTF (1x, 2x , 4x,7x ) ταυτίζονται ή είναι πολύ κοντά με αιχμές του φάσματος του σήματος, με μέγιστο πλάτος αιχμής να είναι 0,55 mm/s. Το συμπέρασμα από αυτό είναι ότι πιθανό να υπάρχει κάποιο πρόβλημα στον κλωβό του ρουλεμάν.

Μετά τα παραπάνω επισημαίνουμε ότι υπάρχει ταύτιση αιχμών με αρμονικές των θεωρητικά υπολογιζόμενων συχνοτήτων εμφάνισης για όλους τους τύπους βλαβών στο ρουλεμάν. Το γεγονός ότι η αιχμή με το μεγαλύτερο πλάτος, (0,55 mm/s) ταυτίζεται με τη συχνότητα της FTF ( κλωβού) και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της μεθόδου  $dB_m / dB_c$  , συμπεραίνουμε ότι στο ρουλεμάν υπάρχει πρόβλημα λίπανσης το οποίο αρχικά επηρεάζει τον κλωβό και επεκτείνεται στα υπόλοιπα στοιχεία. Δεν αποκλείεται να προκαλείται σταδιακή υπερθέρμανση των στοιχείων του ρουλεμάν λόγω κακής λίπανσης. Η περίπτωση το ρουλεμάν να είναι κατεστραμμένο απορρίπτεται λόγω ότι τα πλάτη των αιχμών στο φάσμα που συμπίπτουν με θεωρητικές συχνότητες βλαβών είναι σχετικά μικρά.

Η αιχμή κοντά στα 790 Hz, η οποία είναι η μέγιστη του φάσματος με το πλάτος της να είναι περίπου 0,65 mm/s, παρατηρώντας το φάσμα ελέγχου του μάντα του αυξηνητήρα, θα διαπιστώσουμε ότι συντρέχει με μία αρμονική της θεωρητικής συχνότητας αναμονής εμφάνισης βλάβης λόγω της έντονης ταλάντωσης του μάντα.

Προτείνουμε, για το παραπάνω ρουλεμάν, να γίνει σε πρώτη φάση λίπανσή του με γράσο και στη συνέχεια να επαναληφθεί ο έλεγχος χρησιμοποιώντας τις ίδιες μεθόδους λήψης μετρήσεων ανάλυσης και επεξεργασία αυτών.

Το ρουλεμάν αυτό δεν υποστεί κάποια βλάβη από εμάς. Το μόνο σφάλμα το οποίο είχε αναφερθεί στο σχετικό κεφάλαιο είναι ότι ο άξονας δεν είναι απόλυτα κάθετος με το επίπεδο που ορίζει το ρουλεμάν αφού, διέρχεται από αυτό με μία πολύ μικρή γωνία. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί το γεγονός ότι αφού τελείωσε η διαδικασία λήψης των μετρήσεων, παρατηρήσαμε ότι το ρουλεμάν είχε απώλειες γράσου οι οποίες είχαν συσσωρευτεί στην εξωτερική επιφάνειά του.

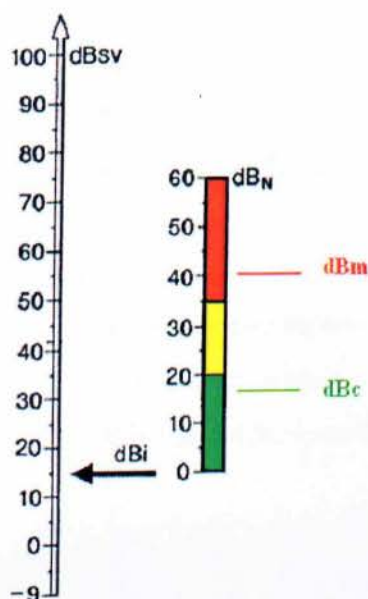
### 10.3.3 Έλεγχος του ρουλεμάν SKF 1211

Στη συνέχεια οι διαδικασίες ελέγχου αφορούν το ρουλεμάν της εταιρίας SKF με κωδικό 1211. Μία πρώτη εικόνα της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το ρουλεμάν κατά την λειτουργία του μας δίνει η μέθοδος dB<sub>m</sub> / dB<sub>c</sub> και βάσει των αποτελεσμάτων αυτής πιν. 10.3.4.ΠΙ -σχ. 10.3.4.Σ1 η κόκκινη είναι η περιοχή λειτουργίας του.

Ρουλεμάν	Εσωτερική Διάμετρος (mm)	RPM	dB <sub>i</sub>	dB <sub>m</sub>	dB <sub>c</sub>	Κατηγορία
SKF 1211	55	1136	15	42	21	Κόκκινη

Πίνακας 10.3.4.ΠΙ





### SKF 1211

Σχήμα. 10.3.4. Σ1

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι ο βασικός παλμός  $dB_c$ , βρίσκεται μέσα στη πράσινη περιοχή. Αντίθετα ο μέγιστος παλμός παροχής  $dB_m$ , βρίσκεται μέσα στην κόκκινη περιοχή με τιμή τα 42 dB ( $> 40$  dB). Όπως έχουμε προαναφέρει ένα διάγραμμα με αυτά τα αποτελέσματα προκύπτει από ρουλεμάν που έχει πρόβλημα. Η τιμή  $dB_m = 42$  dB μας κάνει να σκεφθούμε ότι το πρόβλημα δεν απλά λόγω κακής λίπανσης ή από τυχόν επιφανειακές φθορές στο ρουλεμάν. Έτσι οδηγούμεθα στο συμπέρασμα ότι το ρουλεμάν έχει πρόβλημα σε κάποιο από τα δομικά του στοιχεία. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τον πίνακα με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα τα οποία εξάγει το πρόγραμμα Condmaster Pro 2 μετά τη σύγκριση και τη συσχέτιση των θεωρητικών συχνοτήτων εμφάνισης βλάβης στο ρουλεμάν με τις πειραματικές μετά την αποδιαμόρφωση του μετρούμενου φάσματος:

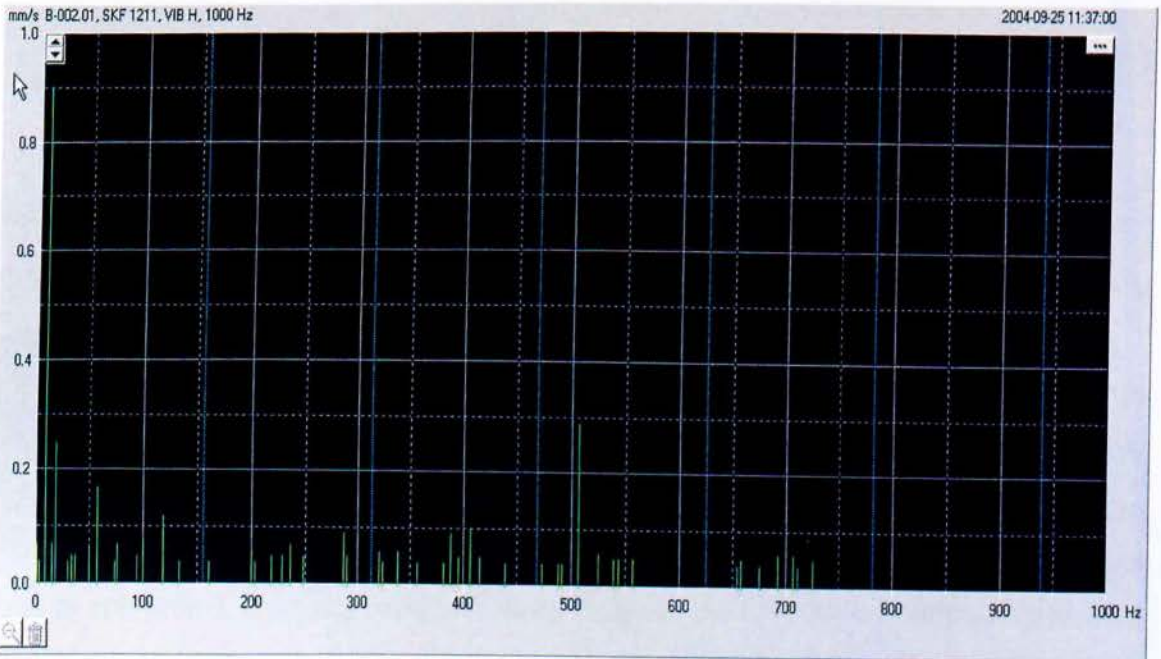
Symptom	Value	Match	COND	COND=0
Bearing, BPF0	0.00	0		
Bearing, BPF1	0.11	2		
Bearing, BSF	0.07	1		
Bearing, FTF	0.90	6		

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του προγράμματος Condmaster Pro 2 (SKF 1211)

Πίνακας 10.3.4.Π2

Στη συνέχεια εμφανίζονται τα διαγράμματα του αποδιαμορφωμένου φάσματος του σήματος και τις αναμενόμενες συχνότητες βλάβης ( BPF0, BPF1, BSF, FTF ) του ρουλεμάν. Η λήψη των μετρήσεων έγιναν με το επιταχυνσιόμετρο να τοποθετείται στην οριζόντια θέση.

Μία πρώτη παρατήρηση η οποία πρέπει να γίνει σχετικά με το φάσμα, είναι ότι εμφανίζεται μία αιχμή στα ~ 10Hz με τιμή πλάτους περίπου 0,9 mm/s , η οποία έχει και το μεγαλύτερο πλάτος σε σχέση με τις υπόλοιπες αιχμές του φάσματος. Στην ανάλυση παρακάτω θα εντοπίσουμε σε ποιο είδος βλάβης αφορά αυτή η αιχμή στο φάσμα.



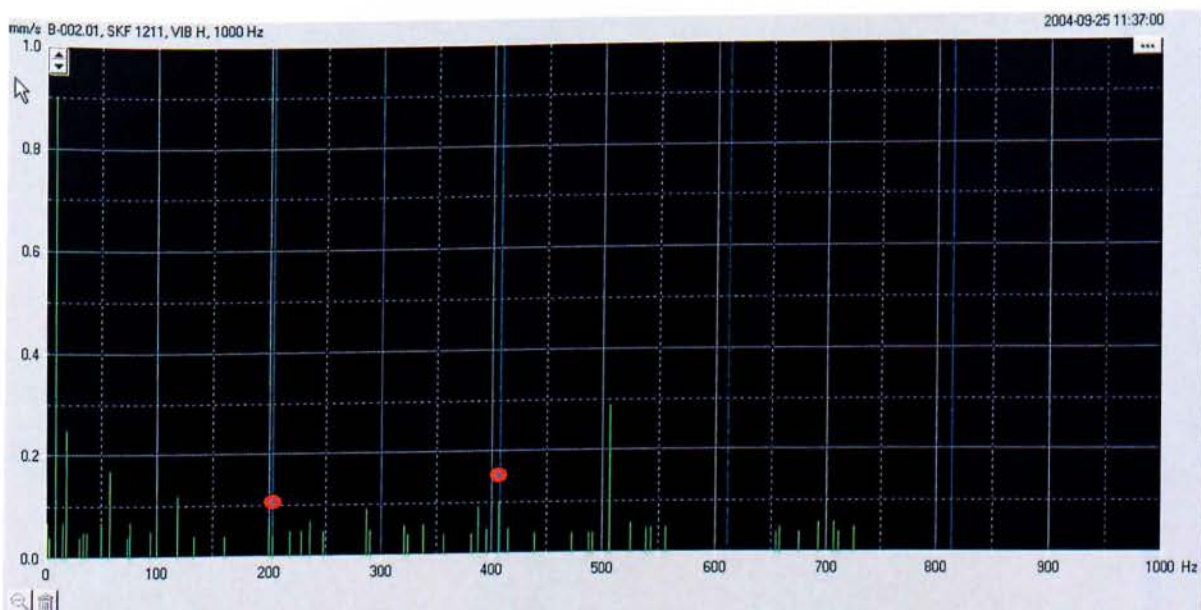
*Αποδιαμορφωμένο σήμα.*

*Η αναμενόμενη κύρια συχνότητα της BPF0 με τις αρμονικές της*

*Διάγραμμα. 10.3.4.Δ1*

Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει ταύτιση των θεωρητικά αναμενόμενων συχνοτήτων εμφάνισης βλάβης στον εξωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν με κάποια από τις από τις τιμές συχνότητας του αποδιαμορφωμένου φάσματος των πειραματικών μετρήσεων. Σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα του προγράμματος όπου και εκεί υπάρχει μηδενική τιμή ταύτισης των συχνοτήτων καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν



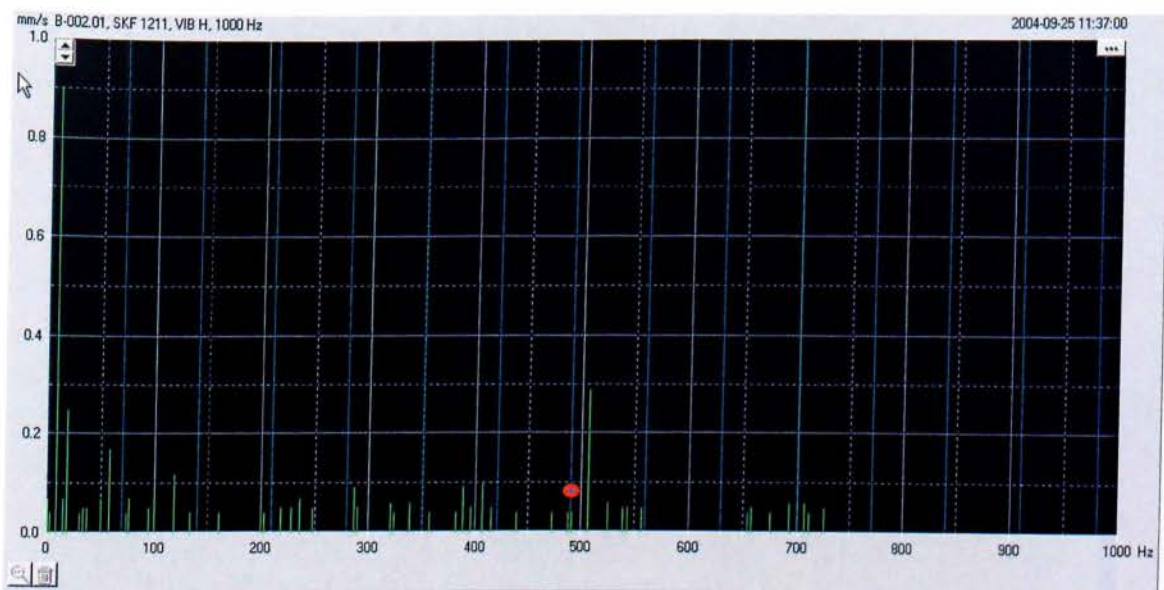


*Αποδιαμορφωμένο σήμα.*

*Η αναμενόμενη κύρια συχνότητα της BPF1 με τις αρμονικές της*

*Διάγραμμα. 10.3.4.Δ4*

Στο διάγραμμα Δ4 όπου εμφανίζονται οι αναμενόμενες συχνότητες βλάβης της BPF1 οι οποίες αφορούν τον έλεγχο του εσωτερικού δακτυλίου του ρουλεμάν, παρατηρούμε ότι υπάρχει ταύτιση δύο αρμονικών της BPF1 ( 1x και 2x ) με δύο αιχμές του φάσματος. Με το πλάτος της δεύτερης αιχμής να είναι περίπου ίσο με 0,10 mm/s, αποτέλεσμα στο καταλήγει και το πρόγραμμα, δίνοντας ακριβέστερα την τιμή του πλάτους στα 0,11 mm/s. Το γεγονός ότι οι τιμές πλάτους των δύο αιχμών του φάσματος οι οποίες ταυτίζονται με τις δύο αρμονικές της θεωρητικής είναι αρκετά μικρές μας επιτρέπει το συμπέρασμα ότι το ρουλεμάν δεν αντιμετωπίζει κάποιο σοβαρό πρόβλημα στον εσωτερικό του δακτύλιο.



*Αποδιαμορφωμένο σήμα.*

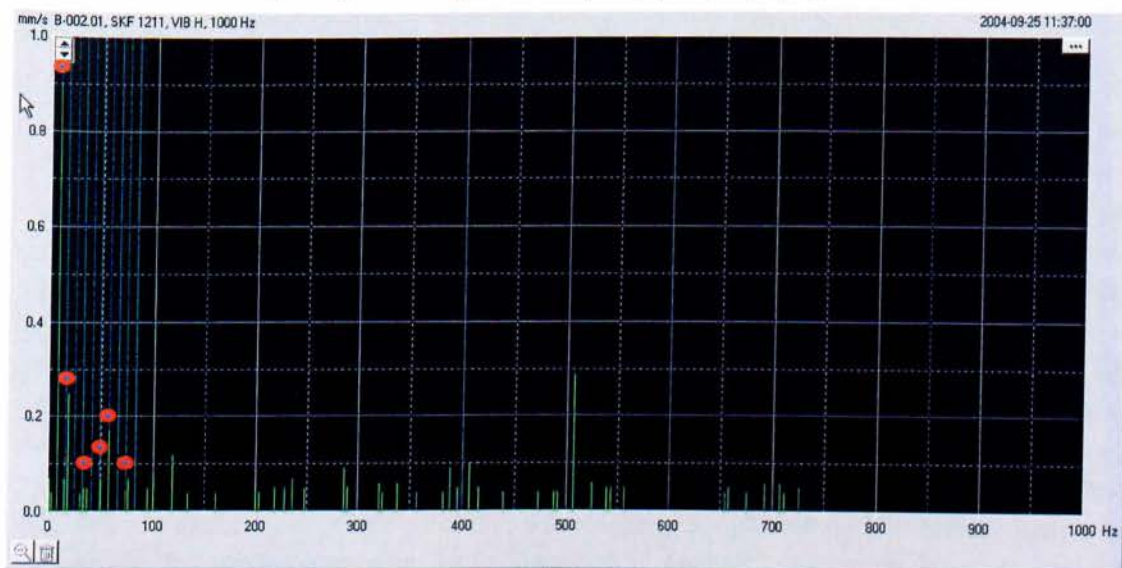
*Η αναμενόμενη κύρια συχνότητα της BSF με τις αρμονικές της*

*Διάγραμμα 10.3.4.Δ5*

Στο διάγραμμα Δ5 όπου εμφανίζονται οι αναμενόμενες συχνότητες βλάβης της BSF οι οποίες αφορούν τον έλεγχο των σφαιρών του ρουλεμάν, παρατηρούμε ότι υπάρχει ταύτιση μίας αρμονικής της BSF ( 7x ) με μία αιχμή του φάσματος. Το πλάτος της είναι μικρότερο του 0,1 mm/s. Και μάλιστα από τα στοιχεία του συγκεντρωτικού πίνακα 10.3.4.Π2, η τιμή του πλάτους είναι ίση με 0,07 mm/s. Η χαμηλή τιμή πλάτους της αιχμής και το γεγονός ότι η ταύτιση υπήρξε στην έβδομη αρμονική της συχνότητας μας επιτρέπει την εξαγωγή του συμπεράσματος ότι το



ρουλεμάν δεν έχει κάποια βλάβη στις σφαίρες του.



*Αποδιαμορφωμένο σήμα.*

*Η αναμενόμενη κύρια συχνότητα της FTF με τις αρμονικές της  
Διάγραμμα 10.3.4.Δ6*

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι θεωρητικά αναμενόμενες συχνότητες βλάβης της FTF οι οποίες αφορούν τον έλεγχο του κλωβού του ρουλεμάν. Εδώ έχουμε το εντυπωσιακό γεγονός της ταύτισης έξι αιχμών της συχνότητας του αποδιαμορφωμένου φάσματος των πειραματικών μετρήσεων με κάποια από τις δέκα πρώτες αρμονικές ( 1x, 2x, 4x, 6x, 7x, 9x) της αναμενόμενης τιμής εμφάνισης βλάβης του κλωβού του ρουλεμάν.

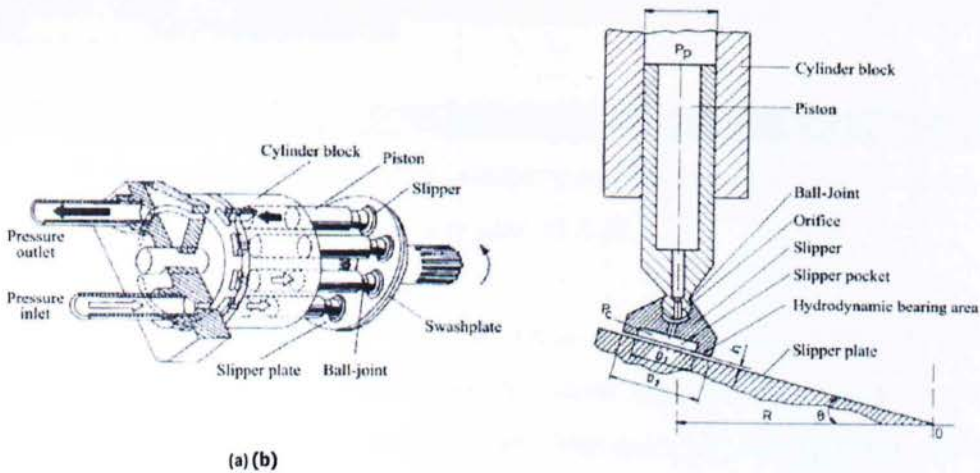
Επισημαίνουμε, ότι η μέγιστη αιχμή την οποία αρχικά είχαμε επισημάνει στις γενικές παρατηρήσεις του φάσματος είναι ουσιαστικά η πρώτη αρμονική της FTF. Το πρόγραμμα επιβεβαιώνει την ύπαρξη ταύτισης έξι αρμονικών της FTF με αιχμές του φάσματος με τιμή πλάτους της μέγιστης αιχμής ίσο με 0,90 mm/s. Ο συνδυασμός αυτών μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το ρουλεμάν έχει έντονο πρόβλημα στον κλωβό του.

Συμπερασματικά, θα λέγαμε ότι το ρουλεμάν SKF 1211 της διάταξης έχει σοβαρή βλάβη στον κλωβό του και πιθανή ελάχιστη βλάβη στον εσωτερικό του δακτύλιο.. Υπενθυμίζουμε, είχαμε προκαλέσει τη βλάβη σπάζοντας ένα κομμάτι του κλωβού του και είχαμε αφαιρέσει τέσσερις σφαίρες βλάβη η οποία εντοπίστηκε άμεσα. Επίσης, είχαμε ρίξει λίγα ρινίσματα αλουμινίου στο λάδι του εδράνου του κατά τη συναρμολόγηση βλάβη η οποία εμφανίζεται ως πιθανή πολύ μικρή βλάβη του εσωτερικού δακτυλίου.

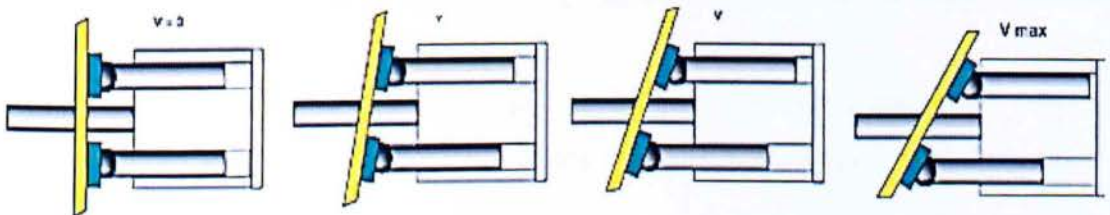
# Κεφάλαιο 11<sup>ο</sup>

## 11.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΟΥ ΑΝΤΛΙΑΣ

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στον έλεγχο που κάναμε σε υδραυλική εμβολοφόρο αντλία. Πρόκειται για υδραυλική αντλία μεταβλητής παροχής 250cc η οποία χρησιμοποιείται σε υδραυλική πρέσα πολτοποιήσης και οδηγείται από έναν κινητήρα 30kW. Πήραμε μετρήσεις στην οριζόντια και αξονική διεύθυνση χωρίς να έχουμε κάποια εμφανή ποιοτικά δείγματα βλάβης. Αυτό που θα μπορούσαμε να εξετάσουμε σε αυτή την αντλία είναι κάποια πιθανή βλάβη στα εμβολάκια ή τα ρουλεμάν της. Ακόμη θα γίνει έλεγχος αζυγοσταθμίας και ευθυγράμμισής της με τον κινητήρα. Τυχόν βλάβες του κινητήρα δεν θα ελεγχθούν διότι παρεμβάλλεται το κόμπλερ. Τα σήματα που έχουμε λάβει αφορούν ένα την οριζόντια και ένα για την αξονική διεύθυνση. Οι πιθανές θέσεις βλάβης είναι 1)βλάβη αζυγοσταθμίας η οποία εμφανίζεται στην 1xFr 2) βλάβη κακής ευθυγράμμισης η οποία εμφανίζεται στην 2,3xFr και κυρίως μπορεί να μετρηθεί στην οριζόντια διεύθυνση. Μία πιθανή βλάβη των εμβόλων θα εμφανιζόταν στη NxFr όπου N ο αριθμός των εμβόλων ο οποίος στην περίπτωση μας είναι δώδεκα(12). Αυτό που μας ενδιαφέρει στην αξονική διεύθυνση είναι η μελέτη της αζυγοσταθμίας για έλεγχο πιθανής αστοχίας στους συνδέσμους των εμβόλων.

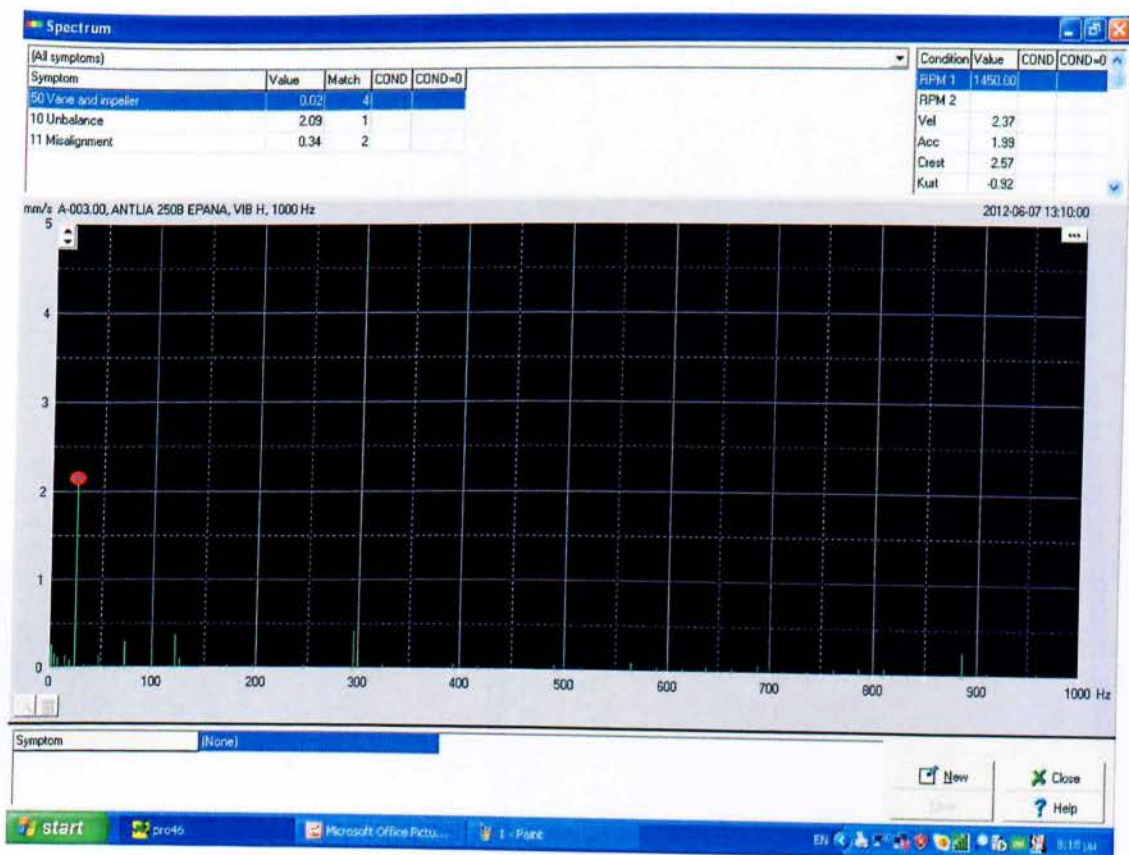


Αρχή λειτουργίας εμβολοφόρου αντλίας  
εικ.11.1.E1



Διαφορετικές γωνίες – διαφορετική παροχή  
εικ.11.1.E2

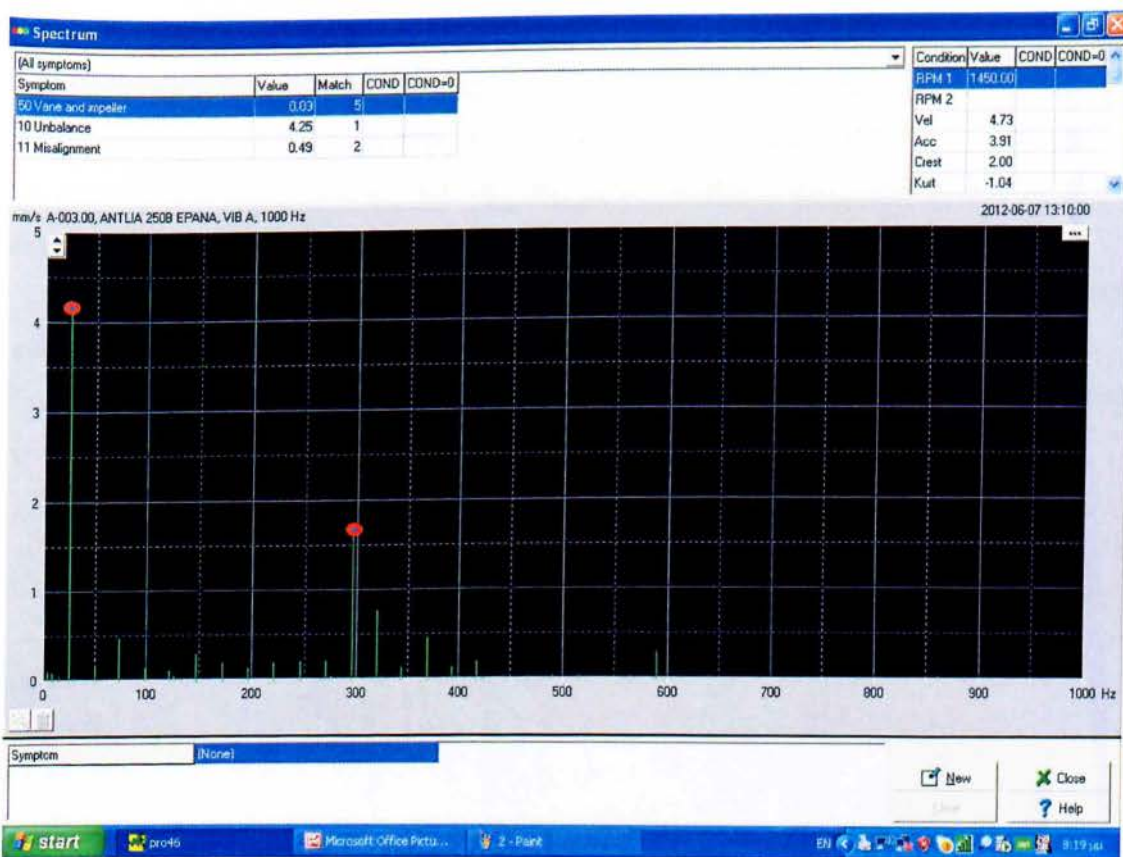




*Αποδιαμορφωμένο σήμα. Αφορά μετρήσεις κατά την οριζόντια (H) διεύθυνση*  
**Διάγραμμα 11.1.Δ1**

Στο πρώτο αποδιαμορφωμένο σήμα το οποίο αφορά την οριζόντια (H) διεύθυνση, μπορούμε να δούμε στη συχνότητα 24,5Hz την κύρια αρμονική της Fr με πλάτος 2,1mm/s καθώς και τις 2x,3x,4x,5x της Fr. Επίσης εμφανίζεται και η 12x Fr (συχνότητα εμβόλων) με πολύ μικρό πλάτος <0,5 mm/s καθώς και ελάχιστα εμφανίζονται οι αρμονικές 2x,3x της παραπάνω βλάβης. Δεν παρατηρείτε έντονη ενέργεια σε κάποιο άλλο σημείο του φάσματος. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι από το πρώτο διάγραμμα αποδιαμορφωμένου φάσματος βλέπουμε ότι υπάρχει κάποια ένδειξη αζυγοσταθμίας χωρίς την ύπαρξη κάποιου σοβαρού προβλήματος στο σύστημα.

Παρ'όλα αυτά πρέπει να αξιολογήσουμε και το φάσμα το οποίο αφορά την αξονική διεύθυνση γιατί λόγω της παλινδρομικής κίνησης των εμβόλων υπάρχουν κραδασμοί και σε αυτή τη διεύθυνση.



*Αποδιαμορφωμένο σήμα. Αφορά μετρήσεις κατά την αξονική (A) διεύθυνση*  
*Διάγραμμα 11.1.Δ2*

Παρατηρώντας το αποδιαμορφωμένο σήμα το οποίο αφορά την αξονική διεύθυνση βλέπουμε να εμφανίζεται και πάλι η  $1x$  της  $F_r$  με πλάτος  $\sim 4,2\text{mm/s}$  σχεδόν 2πλάσιο της αντίστοιχης στο φάσμα μέτρησης κατά την οριζόντια(H) διεύθυνση.

Ταυτόχρονα βλέπουμε και τη συχνότητα βλάβης των εμβόλων την  $12x$  εντονότερη σε σχέση με την τιμή της στη μέτρηση κατά την οριζόντια(H) διεύθυνση και την εμφάνιση των πλευρικών της  $\pm$  της  $F_r$ . Ακόμη υπάρχει εμφάνιση των  $2x, 3x$  αρμονικών της  $F_r$  της ίδιας βλάβης με φθίνουσα τάση.

Τέλος, παρατηρούμε ότι έχουμε εμφάνιση των  $2x-10x$  της κύριας  $F_r$ .



Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι λόγω της αυξημένης τιμής του πλάτους της κύριας συχνότητας στη μέτρηση κατά την αξονική διεύθυνση και την αύξηση του πλάτους της συχνότητας εμφάνισης βλάβης των εμβόλων πιθανολογούμε την ύπαρξη μιας χαλάρωσης της συναρμογής μεταξύ των εμβόλων και της πλάκας ολίσθησης της αντλίας. Το γεγονός αυτό ενισχύεται και από την ύπαρξη των ασθενών αρμονικών 2x-10x οι οποίες μας προδιαθέτουν για την ύπαρξη χαλάρωσης στην κατασκευή.

Προτείνεται, ο επανέλεγχος της δεδομένης αντλίας σε χρονικό διάστημα 2-3 εβδομάδων και η σύγκριση των νέων αποτελεσμάτων των μετρήσεων με το υφιστάμενο φάσμα.

Δεν υπάρχει κάποιος λόγος διακοπής λειτουργίας και άμεσης συντήρησης της αντλίας βάσει των μέχρι τώρα αποτελεσμάτων του παρόντος φάσματος.

Τέλος δεν υπάρχει λόγος ανησυχίας για το τμήμα προμηθειών και αποθήκης της εταιρείας.

## **Κεφάλαιο 12<sup>ο</sup>**

### **Συμπεράσματα-σχόλια**

Μετά και την ολοκλήρωση των μετρήσεων και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, μπορούμε να μιλήσουμε για την μεγάλη ακρίβεια του μηχανήματος μέτρησης κραδασμών T-30 της εταιρείας SPM, με σκοπό τη διάγνωση και πρόληψη μίας βλάβης σε περιστρεφόμενα στοιχεία μηχανών.

Η ταχύτητα και η αξιοπιστία είναι δύο από τα βασικά χαρακτηριστικά του μηχανήματος. Η ταχύτητα, εντοπίζεται τόσο σ' αυτή καθ' αυτή τη διαδικασία των μετρήσεων, όσο και στην επεξεργασία τους με τη χρήση του προγράμματος της ίδιας εταιρείας Condmaster Pro 2.

Τόσο η μέθοδος EVAM, με ανάλυση του φάσματος του σήματος των μετρήσεων ( VIB ) για έλεγχο όλων των στοιχείων μηχανής, όσο και η πολύ γρήγορη μέθοδος  $dB_m / dB_c$  που αντιστοιχεί στη μέτρηση του κρουστικού παλμού για τον άμεσο έλεγχο των ρουλεμάν εφαρμόζονται με ευκολία και δίνουν σαφή και σωστά αποτελέσματα.

Τονίζουμε, και πάλι, τη σημασία που έχουν στη διάγνωση και πρόληψη οι μη παρεμβατικές μέθοδοι διάγνωσης σε μηχανές που δουλεύουν ασταμάτητα σε μεγάλες βιομηχανίες και εργοστάσια, όπου η διακοπή τους για περιοδικό έλεγχο με κάποια άλλη παρεμβατική μέθοδο θα είχε τεράστιες επιβαρύνσεις σε χρόνο και σε χρήμα για την επιχείρηση.

Τέλος, θα θέλαμε να επισημάνουμε το ενδιαφέρον που έχει για έναν Μηχανολόγο - Μηχανικό το αντικείμενο της πρόγνωσης, της διάγνωσης και της συντήρησης των μηχανών, η καλή γνώση του οποίου αποτελεί και θα αποτελεί ένα ισχυρό χαρτί στα χέρια του.



## ***Βιβλιογραφία :***

---

1. The Gear Analysis Handbook, *James I. Taylor*
2. Διάγνωση Βλαβών και Συντήρηση Περιστρεφόμενων Μηχανών,  
Θ. Ν. Κωστόπουλος
3. Machinery Vibration, *Victor Wowk*
4. The Vibration Analysis, *James I. Taylor*
5. Οδοντώσεις και Μειωτήρες Στροφών, *Θ. Ν. Κωστόπουλος*
6. The Pressure Strain and Force Handbook and Encyclopedia,  
*Omega.com*
7. Engineering Vibration, *Daniel J. Inman*
8. New Bearing Doctor, *Φυλλάδιο NSK*
9. SKF General Catalogue, *SKF*
10. Δυναμική Μηχανών, *Α. Κανάραχος, Ι. Αντωνιάδης*

## Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία :

11. [www.pcb.com/tech/html](http://www.pcb.com/tech/html) , *PCB Piezotronics*
12. [www.reliabilityweb.com/excerpts/excerpts/belt\\_faults](http://www.reliabilityweb.com/excerpts/excerpts/belt_faults)
13. [www.skf.com/skf/productcatalogue/calculation](http://www.skf.com/skf/productcatalogue/calculation)
14. [www.omega.com](http://www.omega.com)