



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ &
ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Θεόδωρος Ν. Κωστόπουλος, D. Sc.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γιώργος Κ. Τριάντης

Ταυτοποίηση Βλαβών Οδοντωτών Τροχών

ΑΘΗΝΑ – ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2008

Αισθανόμαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Θ.Ν.Κωστόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και τον υποψήφιο διδάκτορα Δ.Τσαντιώτη για την καθοδήγησή του κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την συμπαράσταση που επέδειξε καθόλη την διάρκεια των σπουδών μου καθώς και την Δ.Χιώτη για την σημαντική της βοήθεια.

Γιώργος Κ.Τριάντης

Περιεχόμενα:

Κεφάλαιο 1: Συντήρηση μηχανών-Κρίσιμες αποφάσεις της διοίκησης-Είδη/Τεχνικές

1.1) Η σημασία της λειτουργίας της συντήρησης.....	08
1.2) Η αναγκαιότητα της συντήρησης.....	08
1.3) Αποφάσεις που πρέπει να παρθούν πριν επιλέξουμε το πρόγραμμα συντήρησης που θα ακολουθήσουμε.....	09
1.4) Η διαχρονική εξέλιξη των προσεγγίσεων της συντήρησης.....	13
1.5) Κυριότερες προσεγγίσεις συντήρησης.....	15
1.5.1) Λειτουργία ως τη βλάβη (breakdown maintenance).....	15
1.5.2) Προληπτική συντήρηση (Preventive maintenance).....	15
1.5.3) Προβλεπτική συντήρηση (Preventive maintenance).....	17
1.5.4) Συντήρηση ακριβείας (Design-out maintenance).....	18

Κεφάλαιο 2: Περί οδοντωτών τροχών

2.1) Γενικά.....	21
2.2) Είδη οδοντωτών τροχών.....	21
2.2.1) Μετωπικοί τροχοί.....	22
2.2.2) Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί.....	27
2.2.3) Ελικοειδείς οδοντωτοί τροχοί ασύμβατων αξόνων.....	27
2.2.4) Σύστημα ατέρμονα κοιλία-κορώνας.....	28
2.3) Εκτίμηση του λόγου μείωσης.....	28
2.4) Ποιοτικός έλεγχος οδοντωτών τροχών.....	29
2.4.1) Είδη σφαλμάτων.....	29
2.4.2) Rolling test method.....	29
2.4.3) Σύστημα ταξινόμησης της ακρίβειας μετωπικών οδοντωτών τροχών βάσει των προδιαγραφών κατά AGMA.....	30

Κεφάλαιο 3: Βλάβες οδοντωτών τροχών

3.1) Αιτίες που προκαλούν τις βλάβες οδοντωτών τροχών.....	33
3.2) Γενικά κριτήρια κακής λειτουργίας γραναζιών.....	34
3.3) Μορφές βλαβών οδοντωτών τροχών.....	35
3.3.1) Κόπωση - γήρανση (μηχανική διάβρωση).....	36
3.3.2) Μικροεκκοιλάνσεις που προκαλούν κόπωση και γήρανση.....	38
3.3.3) Δημιουργία ρωγμών.....	39
3.3.4) Χάραξη.....	41
3.3.5) Μετατροπές των κατατομών των οδόντων κατά την λειτουργία τους.....	42
3.3.6) Υπερ-φορτίσεις.....	43
3.3.7) Υπερθέρμανση.....	46
3.4) Ανίχνευση ξένων σωματιδίων.....	47
3.5) Εξακρίβωση του τύπου φθοράς ενός γραναζιού μέσω ενός διαγράμματος Στρεπτικής ροπής-Περιφερειακής ταχύτητας.....	51
3.6) Σύνδεσμοι μετάδοσης κίνησης.....	52
3.7) Θραύση των υλικών.....	53
3.7.1) Θραύση ενός τέλει υλικού.....	53
3.7.2) Θραύση ενός πραγματικού υλικού.....	53

3.7.3) Δυναμική ρωγμών.....	53
3.7.4) Τρόπος διάδοσης των ρωγμών.....	55
3.7.5) Διάδοση ρωγμής στην βάση του οδόντα.....	56

Κεφάλαιο 4: *Είδη παραγόμενων συχνοτήτων από τους οδοντωτούς τροχούς*

4.1) Εισαγωγή στη συχνότητα εμπλοκής γραναζιών(GMF).....	58
4.2) Συχνότητες «φαντάσματα».....	59
4.3) Κλασματικές συχνότητες.....	60
4.4) Διαμόρφωση των περιόδων του εκπεμπόμενου φάσματος της συχνότητας εμπλοκής γραναζιών(GMF).....	61
4.5) Μορφή φάσματος κραδασμών για κάθε μια βλάβη.....	69
4.5.1) Φθορά σε οδόντα.....	70
4.5.2) Φορτίο οδόντος.....	70
4.5.3) Οδοντωτοί τροχοί με εκκεντρότητα και χάρη μεταξύ των κατατομών.....	71
4.5.4) Οδοντωτοί τροχοί με κακή ευθυγράμμιση.....	73
4.5.5) Ραγισμένο ή σπασμένο δόντι.....	75
4.5.6) Συχνότητα σύμπτωσης οδοντωτών τροχών.....	76

Κεφάλαιο 5: *Παραγόμενες συχνότητες από τους κινητήρες*

5.1) Κραδασμοί κινητήρων.....	78
5.2) Διπλάσια γραμμική συχνότητα δόνησης.....	78
5.3) Δόνηση των επαγωγικών κινητήρων στη συχνότητα που παράγεται κατά την ύπαρξη εγχοπών στις επιφάνειες του στάτορα.....	83
5.4) Συχνότητες συντονισμού του πυρήνα του στάτορα.....	84

Κεφάλαιο 6: *Χαρακτηριστικά π.χ φασμάτων κραδασμών*

6.1) Σπασμένο δόντι & Κακή ευθυγράμμιση.....	87
6.2) Πρόβλημα εκκεντρότητας.....	88
6.3) Πρόβλημα χαλαρότητας(1).....	89
6.4) Πρόβλημα χαλαρότητας(2).....	90
6.5) Πρόβλημα εκκεντρότητας λόγω λυγισμένου άξονα.....	91
6.6) Πρόβλημα κακής ευθυγράμμισης με την εμφάνιση της $1 \frac{1}{2} X GMF$	92
6.7) Επιβολή προβληματικής χάρης μεταξύ των γραναζιών.....	93
6.8) Πρόβλημα χαλαρότητας-Ταλαντευόμενων γραναζιών.....	94

Κεφάλαιο 7: *Μετατροπείς σημάτων για μετρήσεις δόνησης*

7.1) Εισαγωγή.....	96
7.2) Επιλογή μετρούμενης παραμέτρου.....	96
7.3) Σύγκριση μετατροπέων κίνησης.....	96
7.3.1) Μετατροπείς θέσης.....	96
7.3.1.1) Πλεονεκτήματα.....	97
7.3.1.2) Μειονεκτήματα.....	97
7.3.2) Μετατροπέας ταχύτητας σεισμικής μάζας.....	98
7.3.2.1) Πλεονεκτήματα.....	98
7.3.2.2) Μειονεκτήματα.....	98
7.3.3) Επιταχυνσιόμετρα.....	98

7.3.3.1)Πλεονεκτήματα.....	100
7.3.3.2)Μειονεκτήματα.....	100
7.3.4)Ολοκλήρωση σήματος.....	103
7.3.5)Ανάκτηση δεδομένων κραδασμών.....	103
7.3.5.1)Ψηφιακή ολοκλήρωση.....	103
7.3.5.2)Αναλογική ολοκλήρωση.....	103
7.4)Μετατροπείς δύναμης.....	104
7.5)Ηλεκτρικοί μορφομετατροπείς(ακουστικά).....	105
7.6)Υδρόφωνα και μεταλλάκτες πίεσης.....	106
7.7)Χαρακτηριστικά μεταλλακτών.....	106

Κεφάλαιο 8: Συλλογή & Επεξεργασία δεδομένων

8.1)Εισαγωγή.....	109
8.2)Εργαλεία για την συλλογή και επεξεργασία δεδομένων.....	111
8.3)Χαρακτηριστικά προγράμματος ανάλυσης της λειτουργίας των γραναζιών.....	112
8.4)Χαρακτηριστικά προγράμματος ανάλυσης σήματος.....	112

Κεφάλαιο 9: Κατασκευή της πειραματικής διάταξης

9.1 Εισαγωγή.....	114
9-2Λεπτομέρειες για την κατασκευή της διάταξης.....	116
9-3 Στόχοι που επιτευχθησαν με την κατασκευή της διάταξης.....	119

Κεφάλαιο 10: Εισαγωγή στο πρόγραμμα Condmaster Pro2

10.1 Εισαγωγή.....	123
10.2 Μεταφορά δεδομένων από το PC στο T-30 μέσω του Condmaster Pro.....	123
10.3 Μεταφορά δεδομένων από το T-30 στο PC.....	127
10.4 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα.....	127

Κεφάλαιο 11: Εισαγωγή στο μηχάνημα SPM T-30

11.1.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	132
11.1.2 Λειτουργίες του μηχανήματος.....	132
11.1.3 Όργανα μετρήσεως.....	133
11.1.4 Παρουσίαση του μηχανήματος.....	136

Κεφάλαιο 12: Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

12.1 Εισαγωγή.....	138
12.2 Οδοντωτοί τροχοί με κακή ευθυγράμμιση.....	138
12.3 Οδοντωτοί τροχοί με εκκεντρότητα και μεγάλη χάρη μεταξύ των κατατομών(μέρος 1).....	142
12.4 Οδοντωτοί τροχοί με εκκεντρότητα και μεγάλη χάρη μεταξύ των κατατομών(μέρος 2).....	147
12.5 Οδοντωτοί τροχοί με σπασμένα δόντια.....	149

Κεφάλαιο 13: Γενικά συμπεράσματα

Εισαγωγή-Αντικείμενο της εργασίας:

Η διπλωματική εργασία αυτή, είναι το αποτέλεσμα ενός ετους ενασχόλησης του γράφοντος με το αντικείμενο της συντήρησης μηχανών και ιδιαιτέρως της εμβάνθυσης στο πεδίο των βλαβών των οδοντωτών τροχών.

Βασικός σκοπός της συντήρησης μηχανών είναι η εγκαίρως πρόγνωση, διάγνωση και τέλος επιδιόρθωση μιας βλάβης έτσι ώστε να περιοριστούν οι συνέπειές της τόσο στην παραγωγή όσο και στα κοντινά μηχανολογικά εξαρτήματα.

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 Η/Υ, όπου με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού γίνεται η επεξεργασία του φάσματος, με μεθόδους αποδιαμόρφωσης σήματος με χρήση του μετασχηματισμού Fourier.

Ένα τέτοιου είδους όργανο, είναι και το φορητό μηχανήμα 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 Η/Υ 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, από τον επιβλέποντα διδακτορικό κ.Δημήτρη Τσαντιώτη και έχει κριθεί ως προς την λειτουργία του ως αξιόπιστο.

Το περιεχόμενο των κεφαλαίων αλλά και κάποιοι από τους λόγους που μας οδήγησαν να επιλέξουμε την συγκεκριμένη διάρθρωσή τους περιγράφονται παρακάτω:

Το 1^ο κεφάλαιο περιέχει μία εισαγωγική παρουσίαση των ειδών-τεχνικών συντήρησης καθώς και τις αποφάσεις τις οποίες οφείλει να παρει κάποιος πριν επιλέξει το πρόγραμμα συντήρησης που θα ακολουθήσει.

Το 2^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει μια σύντομη περιγραφή της θεωρίας των οδοντώσεων. Η μελέτη του θέματος της συντήρησης μηχανών από την σκοπιά των οδοντωτών τροχών προϋποθέτει, αυτές τις βασικές γνώσεις και δεν θα ήταν δυνατόν να σταφθεί με επιτυχία χωρίς να ξεκαθαριστούν εξ' αρχής κάποια βασικά μεγέθη που αφορούν την θεωρία των οδοντώσεων(γεωμετρία, αναπτυσσόμενες δυνάμεις), που η μη-γνώση των οποίων μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μια από τις κύριες πηγές σφαλμάτων στον τομέα της συντήρησης μηχανών που μου ανατέθηκε.

Στο 3^ο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα είδη των βλαβών στους οδοντωτούς τροχούς που προσδιορίστηκαν ύστερα την βιβλιογραφική μελέτη επί του αντικειμένου.

Το κεφάλαιο 4^ο περιέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για την κατανόηση και εμβάνθυση των παραγόμενων συχνοτήτων που είναι δυνατόν να εμφανιστούν κατά την λειτουργία των γραναζιών , σε ότι είχε να κάνει με την ανάλυση φάσματος κραδασμών.

Το 5^ο κεφάλαιο στοχεύει στην παρουσίαση των συχνοτήτων που είναι δυνατόν να δημιουργηθούν από έναν κινητήρα κατά την λειτουργία του αλλά, και στον τρόπο δημιουργίας αυτών. Η αναφορά αυτού του κεφαλαίου κρίθηκε απαραίτητη, αφού μέσα

από τα φάσματα ανάλυσης κραδασμών, τα οποία δίνει ως αποτελέσματα αυτή η εργασία μπορεί κανείς να διακρίνει καθαρά τις παραπάνω συχνότητες.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια αντιπροσωπευτικά παραδείγματα φασμάτων για κάθε βλάβη, τα οποία εντοπίστηκαν από την βιβλιογραφία.

Στο 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τύποι των μεταλλακτών που χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή στις μετρήσεις δόνησης με τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματά τους καθώς και ορισμένα στοιχεία για την περιγραφή της λειτουργίας του καθενός.

Το 8^ο κεφάλαιο επεξεργάζεται κάποια πιο πρακτικά ζητήματα που αφορούν ένα σύνολο κανόνων το οποίο πρέπει να ακολουθήσει κάποιος εφόσον επιθυμεί την σωστή συλλογή και επεξεργασία των μετρήσεων.

Στο 9^ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας περιλαμβάνονται κάποιες επεξηγήσεις που αφορούν την κατασκευή της πειραματικής διάταξης.

Στο 10^ο κεφάλαιο αναπτύσσονται ορισμένα στοιχεία που έχουν να κάνουν με το λογισμικό Condmaster Pro2 που υποστηρίζει το μηχάνημα T30, ενώ το 11^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει στοιχεία που έχουν να κάνουν με την περιγραφή του μηχανήματος T30 του εργαστηρίου.

Το 12^ο κεφάλαιο αποτελεί την «καρδιά» της εργασίας και περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της εργασίας καθώς και τον σχολιασμό τους.

Στο 13^ο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα αποτελέσματα των μετρήσεών μας υπό μορφή πίνακα, ξεχωριστά για καθεμία από τις βλάβες τις οποίες μελετήσαμε.

Κεφάλαιο 1ο

Συντήρηση μηχανών-Κρίσιμες αποφάσεις της διοίκησης-Είδη/Τεχνικές:

1.1) Η σημασία της λειτουργίας της συντήρησης:

Όσο τεχνολογικά εξελιγμένα και να είναι τα μηχανήματα παραγωγής, είναι αδύνατον να λειτουργούν και να αποδίδουν, τουλάχιστον στο επίπεδο που είναι σχεδιασμένα να το κάνουν, χωρίς την απαραίτητη επίβλεψη και συντήρηση. Η συντήρηση σε μία βιομηχανική επιχείρηση έχει στόχο να υποστηρίζει την παραγωγή έτσι να παράγονται προϊόντα συνεχώς, με το μικρότερο δυνατό κόστος και την καλύτερη ποιότητα σύμφωνα με τα πρότυπα της εταιρίας. Έτσι λοιπόν επιγραμματικά η συντήρηση πρέπει να εξασφαλίζει:

- Απρόσκοπτη λειτουργία-Μείωση χαμένου χρόνου.
- Οικονομική λειτουργία-Μέγιστη παραγωγικότητα.
- Βέλτιστο αποτέλεσμα από πλευράς ποιότητας.
- Πληροφορίες για παραπέρα βελτίωση του εξοπλισμού και της οργάνωσης.

1.2) Η αναγκαιότητα της συντήρησης:

Το κόστος της συντήρησης σήμερα μπορεί και να αντιπροσωπεύει μέχρι και το 40% των εξόδων λειτουργίας μιας επιχείρησης. Με τον όρο συντήρηση εννοούμε:

- Τεχνικό και χρονικό σχεδιασμό εργασιών.
- Διαχείριση υλικών και ανταλλακτικών.
- Διαχείριση εργαλείων και παραγωγικών μέσων γενικότερα.
- Προληπτικούς, προγνωστικούς και διαγνωστικούς ελέγχους.
- Προληπτικές ενέργειες και αντικαταστάσεις.
- Προγραμματισμό και εκτέλεση προγραμμάτων λίπανσης.
- Επισκευές, βελτιώσεις, κατασκευές.

Απο τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι η συντήρηση δεν έχει στόχο μόνο τις επισκευές, όπως γενικά πιστεύεται από πολλούς, αλλά αποτελεί έναν κρίσιμης σημασίας παράγοντα στην ζωή της επιχείρησης, που σχετίζεται με το σύνολο της απόδοσής της.

Η διατήρηση του εξοπλισμού και των στοιχείων του σε ικανοποιητική κατάσταση λειτουργίας μέσω της συντήρησης(συστηματικές επιθεωρήσεις, εντοπισμοί και διορθώσεις επικείμενων αστοχιών πριν εφαρμοστούν ή προτού εξελιχθούν σε μεγάλες καταστροφές) αποδεικνύεται ότι:

- Μειώνει το επενδύμενο κεφάλαιο.
- Μειώνει την ποιοτική υποβάθμιση του εξοπλισμού.
- Μειώνει τις απροειδοποίητες βλάβες του εξοπλισμού.
- Αυξάνει την διάρκεια ζωής των μηχανών.
- Αυξάνει την παραγωγικότητα του προσωπικού της συντήρησης.
- Βελτιώνει την συμμόρφωση σε νόμους και κανονισμούς.
- Μειώνει τις περιττές επισκευές μηχανών.
- Μειώνει την επανάληψη δραστηριοτήτων συντήρησης.

- Μειώνει την απόρριψη (ελαττωματικών) προϊόντων.
- Αυξάνει την αξιοπιστία.
- Μειώνει τις υπερωρίες.
- Αυξάνει την ασφάλεια.
- Μειώνει τους τραυματισμούς.
- Μειώνει την κατανάλωση ενέργειας.
- Μειώνει την ποσότητα των απαραίτητα διαθέσιμων ανταλλακτικών.
- Μειώνει τα ελαττώματα σε καινούργιες μηχανές.
- Μειώνει τις λανθασμένες ενέργειες συντήρησης.
- Μειώνει τα ασφάλιστρα.

1.3)Αποφάσεις που πρέπει να παρθούν πριν επιλέξουμε το πρόγραμμα συντήρησης που θα ακολουθήσουμε:

Η ικανότητα να βρίσκουμε όσο το δυνατόν περισσότερες επικείμενες μηχανικές βλάβες μπορούμε (χωρίς να απενεργοποιούμε ή να λύνουμε την μηχανή άσκοπα), απαιτεί ένα σύστημα συλλογής δεδομένων προς σύγκριση, το οποίο θα θέτει τα όρια, θα διατηρεί τα δεδομένα των μετρήσεων για μεγάλα χρονικά διαστήματα και θα κάνει προσεκτική επιλογή των μεταλλάκτων που θα χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις. Προκειμένου ένα πρόγραμμα προβλεπτικής περιοδικής παρακολούθησης να πληρεί τους στόχους που θέσαμε παραπάνω πρέπει να εργαστούμε συστηματικά για να βρούμε τον αρχικό σχεδιασμό του προγράμματος. Αν βέβαια, αφήσουμε στην τύχη τον σχεδιασμό και την υλοποίηση του προγράμματος συντήρησης οι στόχοι δεν θα επιτευχθούν. Για την ενδελεχή ολοκλήρωση του σχεδίου μας, υπάρχουν κάποια συγκεκριμένα και σημαντικά ερωτήματα στα οποία πρέπει να δώσουμε απαντήσεις προκειμένου να ολοκληρωθεί σωστά η διαδικασία. Αυτά είναι που εξετάζονται παρακάτω:

---Ποιες μηχανές πρέπει να παρακολουθούνται;

Αυτό το ερώτημα πρέπει να το επεξεργαστούμε από την αρχή της διαδικασίας. Προγράμματα συνεχούς παρακολούθησης γενικώς περιλαμβάνουν μηχανές που πληρούν ένα από τα τρία επόμενα κριτήρια:

1. Αν η μηχανή είναι μεγάλης σημασίας ή όχι για την παραγωγή.
2. Αν η αντικατάσταση της μηχανής σε περίπτωση λειτουργίας της ως την βλάβη είναι πολύ δαπανηρή.
3. Αν η βλάβη της μηχανής θα μπορούσε να προκαλέσει τραυματισμό ή και απώλεια ανθρώπινης ζωής.

Τα κριτήρια για την συνεχή παρακολούθηση μιας μηχανής είναι αυστηρώς καθορισμένα, γιατί το κόστος της χρησιμοποίησης σταθερά προσαρμοσμένων σε κάποιες θέσεις μέτρησης μεταλλακτών οι οποίοι θα στέλνουν το σήμα τους μέσω καλωδίωσης σ' ένα δωμάτιο ελέγχου, είναι αρκετά υψηλό. Αν και ένα καλό επιταχυνσίόμετρο μπορεί να αγοραστεί με 300-400\$ και η κονσόλα ελέγχου κοστίζει γενικά λιγότερο από 1000\$/κανάλι μέτρησης, το κόστος των διατρεχόμενων καλωδίων και της συντήρησης του συστήματος φτάνει συχνά τις αρκετές εκατοντάδες χιλιάδες δολάρια για αρκετά κανάλια δεδομένων ώστε να παρακολουθούνται επαρκώς οι μηχανές ενδιαφέροντος.

Σε υψίστης σημασίας μηχανές ή σειρές παραγωγής είναι δυνατόν να εγκατασταθούν πιο εξεζητημένα προγράμματα ελέγχου της μηχανής συνδεδεμένα απευθείας με τον υπολογιστή. Αυτά τα συστήματα είναι βασισμένα σε τεχνικές συντήρησης συνεχούς παρακολούθησης με μία όμως σημαντική διαφορά. Το σήμα

δότησης το οποίο κανονικά συνδέεται με τον πίνακα ελέγχου, εδώ στέλνεται σε έναν πολυπλέκτη(μία ηλεκτρονική διάταξη η οποία επιτρέπει σε πολλά ξεχωριστά σήματα να ταξιδέψουν από και προς τον υπολογιστή ακολουθώντας την ίδια διαδρομή). Ο πολυπλέκτης σαρώνει κάθε κανάλι δεδομένων ανα 15min έως 1hr. Τα δεδομένα αυτά στέλνονται σ'ένα αναλυτή FFTφάσματος και κατόπιν σ'έναν υπολογιστή. Ο υπολογιστής συγκρίνει τα φασματικά δεδομένα με μία προεγκατεστημένη βάση δεδομένων για το συγκεκριμένο κανάλι και αποφασίζει αν τα δεδομένα (σε οποιαδήποτε συχνότητα) έχουν υπερβεί ή όχι τα όρια συντήρησης που έχουμε θέσει εμείς. Εάν τα έχουν υπερβεί συντάσσεται μία αναφορά για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Διαφορετικά, τα δεδομένα απορρίπτονται(για την αποφυγή υπερφόρτωσης της μνήμης του υπολογιστή) και ο πολυπλέκτης περνά στο επόμενο κανάλι δεδομένων. Το προφανές πλεονέκτημα που συνοδεύει ένα τέτοιο σύστημα είναι ότι αφενός έχει όλα τα πλεονεκτήματα της συντήρησης συνεχούς παρακολούθησης(αφού η μηχανή επιτηρείται όλες τις ώρες τις ημέρας), αφετέρου είναι δυνατόν να διαγνωστούν εύκολα βλάβες που βρίσκονται σε πρώιμα στάδια και να παρακολουθηθούν πιο στοχευμένα.

Προγράμματα περιοδικής συντήρησης κάποιες φορές εφαρμόζονται σε μηχανές που περιλαμβάνουν τα παραπάνω κριτήρια, αλλά, πιο συχνά περιλαμβάνουν τα ακόλουθα λιγότερο σημαντικά κριτήρια:

1. Αν η επισκευή ή η αντικατάσταση της μηχανής είναι σχετικά ακριβή.
2. Αν η βλάβη της μηχανής μπορεί να προκαλέσει αυξημένο κόστος παραγωγής, ή μειωμένη απόδοση των βιομηχανικών εγκαταστάσεων αλλά, όχι απαραίτητα την ολοκληρωτική καταστροφή τους.
3. Αν η μηχανή έχει κακό ιστορικό λειτουργίας.

Οι μηχανές που πληρούν τα τρία παραπάνω κριτήρια πολύ σπάνια δικαιολογούν την δαπάνη εκατοντάδων χιλιάδων δολαρίων για την παρακολούθησή τους όμως, το κόστος των 3-4\$ ανα σημείο με περίπου 12 συνολικά σημεία που μπορεί να έχει μία μηχανή είναι κάτι που κανείς δεν μπορεί να το προπεράσει.

---Ποιος θα έπρεπε να αποφασίζει ποιες μηχανές θα παρακολουθούνται;

Η απόφαση για το ποιες μηχανές θα πρέπει να παρακολουθούνται ή το είδος της συντήρησης που καθεμία απ'αυτές τις μηχανές δεν θα έπρεπε να είναι εξ ολοκλήρου απόφαση του εκάστοτε διευθυντή συντήρησης, αλλά να εμπεριέχει μια συνεργασία μεταξύ ατόμων του προσωπικού στον τομέα επεξεργασίας, λειτουργίας και εταιρικού marketing. Ένας λογικός τρόπος για να απαντηθεί το παραπάνω ερώτημα είναι ο εξής:

- ο Ο υπολογισμός των ποσοτήτων και του είδους των προϊόντων που θα παραχθούν από την συγκεκριμένη μονάδα στα επόμενα χρόνια πρέπει να γίνει από το προσωπικό marketing.
- ο Ο παραπάνω υπολογισμός θα επιτρέψει στα άτομα του προσωπικού επεξεργασίας(συνήθως χημικοί μηχανικοί ή μηχανικοί κατασκευών) να καθορίσουν την πιθανή χρήση της κάθε μηχανής για την διαδικασία παραγωγής των προϊόντων.
- ο Γνωρίζοντας το ποσοστό απασχόλησης της μηχανής το προσωπικό λειτουργίας θα μπορέσει να εκτιμήσει τον συντελεστή της χρησιμότητας της μηχανής βάσει της αναγκαιότητας της λειτουργίας κάθε μηχανής χωρίς προβλήματα προκειμένου να ικανοποιηθούν οι υπολογισμένες ανάγκες για την παραγωγή του προϊόντος.

- ο Το προσωπικό συντήρησης, γνωρίζοντας την σχετική αξιοπιστία κάθε μηχανής της μονάδας και τον πιθανό χρόνο που απαιτείται για μία επισκευή ή αντικατάσταση κάποιου στοιχείου της μηχανής, θα μπορέσει να δημιουργήσει έναν προσεγγιστικό δείκτη αξιοπιστίας ο οποίος θα υποδεικνύει την σειρά προτεραιότητας σύμφωνα με την οποία υπάρχει ανάγκη για κάθε μηχανή να συμπεριληφθεί στο πρόγραμμα παρακολούθησης. Ένας τέτοιος αριθμός προτεραιότητας μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\text{Προτεραιότητα} = \text{Χρησιμότητα} \cdot \text{Αξιοπιστία}$$

Όπου:

Η χρησιμότητα: εκφράζεται ως συνάρτηση του πόσο αναγκαία είναι η μηχανή για την επίτευξη του στόχου παραγωγής

Η αξιοπιστία: ισούται με το αντίστροφο της πιθανότητας βλάβης της μηχανής όταν αυτή λειτουργεί στις απαιτούμενες συνθήκες λειτουργίας πολλαπλασιασμένης με το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την επισκευή ή αντικατάσταση της μηχανής.

---Ποσο συχνά πρέπει να επιθεωρείται μια μηχανή;

Το μεσοδιάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών παρακολουθήσεων μιας συγκεκριμένης μηχανής εξαρτάται από το ιστορικό λειτουργίας της, το σχεδιασμό της και τον λειτουργικό της κύκλο. Συνήθως το μεσοδιάστημα αυτό καθορίζεται περισσότερο διαισθητικά, και λαμβάνοντας κυρίως υπόψιν το κόστος και τη δυσκολία για την παρακολούθηση της κάθε προς μέτρηση περιοχής της μηχανής. Κάθε μεσοδιάστημα μεταξύ των παρακολουθήσεων εμπεριέχει το ρίσκο να συμβεί κάποια απρόβλεπτη βλάβη η οποία θα καταστρέψει την μηχανή μέσα στο διάστημα αυτό. Κάποιες λογικές σκέψεις για τον καθορισμό των μεσοδιαστημάτων είναι οι ακόλουθες:

- ο Μηχανές με κακό ιστορικό λειτουργίας, γνωστά ελαττώματα κατά τον σχεδιασμό, σταματήματα εν ώρα λειτουργίας ή άλλες σοβαρές λειτουργικές επιπλοκές, μπορεί να χρειάζεται να παρακολουθούνται καθημερινά ή εβδομαδιαίως.
- ο Οι περισσότερες μηχανές πιθανόν να χρειάζονται παρακολούθηση κάθε μήνα ή και κάθε τρίμηνο.
- ο Μηχανές με αποδεδειγμένα μεγάλη διάρκεια ζωής ή ελάχιστης χρησιμότητας μπορεί να απαιτούν παρακολούθηση κάθε χρόνο ή κάθε εξάμηνο.
- ο Όταν μια μηχανή αρχίσει να παρουσιάζει προβλήματα το μεσοδιάστημα των παρακολουθήσεων θα πρέπει να μειωθεί(μερικές φορές ακόμα και σε 60min)μέχρι να μπορέσουν να γίνουν επισκευές.

---Ποιες παράμετροι εκτός της δόνησης που θα πρέπει να μετρηθούν;

Οι πιο κοινές θερμοδυναμικές ιδιότητες που μετρώνται είναι η πίεση, η θερμοκρασία, η ταχύτητα ροής, οι ταχύτητες περιστροφής των αξόνων(που συνήθως λαμβάνονται από τις μετρήσεις δόνησης) και η κατανάλωση ισχύος(μετράται σε Watt ή σε Ampere από τον κινητήρα). Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσουν τα ρουλεμαν είναι συχνά ένας εξαιρετος δείκτης για την ενδειξη της κακής λειτουργίας αυτών. Η μέθοδος για την συλλογή αυτών των δεδομένων ποικίλει από ένα απλό θερμόμετρο που κρατούμε στο πλαίσιο του ρουλεμάν έως μια σειρά θερμοστοιχείων τα οποία εδράζονται όσο τον δυνατόν κοντύτερα στο σημείο της μέτρησης.

Οι μόνες παράμετροι που θα πρέπει να μετρηθούν είναι αυτές που είναι μη παρεμβατικές για την παραγωγική διαδικασία. Για παράδειγμα, αν κάποιος ήθελε να παρακολουθήσει

μία αντλία, η διαφορά πίεσης κατά μήκος της αντλίας θα μπορούσε να μετρηθεί εύκολα, προσθέτοντας μετρητές πίεσης κοντά στην είσοδο και την έξοδο της αντλίας. Ωστόσο, για την μέτρηση της ταχύτητας ροής πιθανώς θα έπρεπε να τοποθετήσουμε έναν μετρητή ροής μέσα στην γραμμή, το οποίο θα προκαλούσε μη αποδεκτές πτώσεις της πίεσης στην διαδικασία. Σε αυτήν την περίπτωση ο μόνος λογικός δείκτης ανεπαρκούς ταχύτητας ροής μέσω της αντλίας θα ήταν μια πτώση της ροής σε κάποιο άλλο σημείο του συστήματος. Όταν αποφασίζουμε ποιες παραμέτρους θα χρησιμοποιήσουμε για την παρακολούθηση μιας δεδομένης μηχανής, πρέπει να έχουμε κατά νου ότι η συγκέντρωση πολλών δεδομένων θα οδηγήσει σε μία μεγάλη προσπάθεια συγκέντρωσης δεδομένων και σ'ένα δύσχυρο σύστημα επεξεργασίας δεδομένων. Αν ο διευθυντής συντήρησης δεν είναι σίγουροι για το ποιες θερμοδυναμικές ιδιότητες είναι αντιπροσωπευτικές της κατάστασης μιας συγκεκριμένης μηχανής, οφείλουν να ρωτήσουν τον κατασκευαστή.

---Ποια είναι τα κριτήρια επιλογής για τον καθορισμό των επιτρεπτών ορίων καλής λειτουργίας της μηχανής:

Τα κριτήρια θερμοδυναμικής λειτουργίας βρίσκονται εύκολα είτε από τον κατασκευαστή του εξοπλισμού είτε από τις αρχικές προδιαγραφές που παίρνουμε κατά την αγορά της μηχανής είτε από το προσωπικό ελέγχου της εγκατάστασής μας. Η αποδεκτή υποβάθμιση της αποδοτικότητας πριν το σημείο που η μηχανή θα πρέπει να επισκευαστεί είναι συνάρτηση των απαιτήσεων της διαδικασίας καθώς και της αυξημένης φθοράς που θα υποστεί μία μηχανή λόγω γεγονότων όπως σπληαίωση, παρακαλυπόμενη λειτουργία και υπερθέρμανση.

Για τον υπολογισμό της καλής λειτουργίας της μηχανής με μετρήσεις δόνησης υπάρχουν 3 συνηθισμένοι τρόποι που χρησιμοποιούνται.

Ο πρώτος είναι να καθορίσουμε ένα σχεδόν αυθαίρετο επιτρεπτό επίπεδο δόνησης για ολόκληρη την μηχανή περίπου στο 0,1in/sec. Παρόλο που αυτή η μέθοδος είναι αρκετά απλή έχει το σοβαρό μειονέκτημα ότι είναι πολύ απλοϊκή και όχι μόνο αγνοεί τις κορυφές βλαβών χαμηλής ενέργειας όπως είναι αυτές των ρουλεμάν, αλλά αγνοεί και ολόκληρη την «φύση» κάθε μεμονωμένης μηχανής.

Μια δεύτερη πιο αποδεκτή μέθοδος είναι να λαμβάνουμε φιλτραρισμένες αναγνώσεις δόνησης στις τοποθεσίες μέτρησης κάθε μηχανής και να υποθέτουμε ότι αυτά τα επίπεδα είναι φυσιολογικά. Μια αύξηση των 6 dB στο επίπεδο οποιασδήποτε ζώνης-εύρους συχνότητας θα αποτελέσει προειδοποιητική κατάσταση, ενώ μία αύξηση των 10 dB, θα αποτελέσει κατάσταση συναγερμού. Αυτή η μέθοδος έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να μπει σε εφαρμογή πολύ άμεσα. Αν και είναι γεγονός ότι ορισμένες από τις βλάβες που βρίσκονται σε αρχικό στάδιο δεν θα εντοπιστούν, αφού προυπήρχαν της έναρξης του προγράμματος παρακολούθησης, αυτό θα αντισταθμιστεί από το στατιστικό δεδομένο ότι οι περισσότερες μηχανές θα είναι σε καλή κατάσταση στο ξεκίνημα και από το ότι, λόγω της απλότητας στον καθορισμό των επιτρεπτών ορίων, θα παρακολουθηθεί ένας μεγάλος αριθμός μηχανών.

Μια τρίτη μέθοδος καθορισμού των επιτρεπτών ορίων είναι να επιλέξουμε επίπεδα των ορίων βασισμένοι σε μία λεπτομερή ανάλυση ενός στενού εύρους φάσματος της μηχανής. Αυτό θα επιτρέψει σ'έναν ικανό αναλυτή να υπολογίσει καθεμία από τις μηχανικές συνιστώσες της μηχανής(καθεμία από τις οποίες δημιουργεί ξεχωριστές συνιστώσες συχνότητας) ξεχωριστά.. Αυτό είναι απείρως καλύτερο από το να μετράμε ένα συνολικό επίπεδο δόνησης και να ελπίζουμε ότι αυτό αντιπροσωπεύει όλα τα κρίσιμα εξαρτήματα(ρουλεμάν, γρανάζια, κινητήρες κ.λ.π.) της μηχανής. Κάθε κορυφή

συχνότητας πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά και το επίπεδο του πλάτους της να χρησιμοποιείται για να καθορίσουμε εάν ο μηχανισμός κίνησης της μηχανής λειτουργεί μέσα σε επιτρεπτά επίπεδα δόνησης. Εάν όχι, θα πρέπει να εξετάσουμε την πιθανότητα αρχικής μηχανικής βλάβης και να πραγματοποιήσουμε μία λεπτομερή διάγνωση του προβλήματος. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ο τεράστιος χρόνος που χρειάζεται για να εκτελέσουμε μία ανάλυση στενού εύρους φάσματος για κάθε μηχανή και στην συνέχεια να την ενσωματώσουμε στο πρόγραμμα παρακολούθησης.

---Υπό ποιες συνθήκες λειτουργίας πρέπει να παίρνονται οι μετρήσεις ;

Υπάρχουν δύο περιπτώσεις λειτουργίας μπροστά στις οποίες μπορεί να έρθει ο οποιοσδήποτε συντηρητής μηχανών. Η πρώτη και απλούστερη είναι να μελετάει έναν εξοπλισμό ο οποίος λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα και με σχετικά σταθερά φορτία. Σ' αυτή την περίπτωση οι συνθήκες που θα χρησιμοποιηθούν κατά τον καθορισμό των επιτρεπτών ορίων και κατά την συλλογή των δεδομένων παρακολούθησης είναι προφανής. Πρέπει βέβαια να έχουμε κατά νου, ότι ακόμα και οι πιο απλές διατάξεις μπορεί να έχουν διακυμάνσεις ανάμεσα στην καλοκαιρινή και την χειμερινή λειτουργία τους. Ακόμα, εφόσον οι επαγωγικοί κινητήρες και οι μηχανές μπορούν να παρουσιάσουν μικρές διακυμάνσεις στην ταχύτητά τους, οποιοδήποτε πρόγραμμα παρακολούθησης ενσωματωμένο σε υπολογιστή πρέπει να συνυπολογίζει τις αλλαγές στις συχνότητες δύναμης μέσω ενός σχεδίου κανονικοποίησης της τάξης.

Αν ο εξοπλισμός προς παρακολούθηση παρουσιάζει αλλαγές στην ταχύτητα ή στο φορτίο λόγω κάποιων απαιτήσεων κατά την λειτουργία τους, η παρακολούθηση της μηχανής γίνεται περισσότερο απαιτητική. Μία πιθανότητα είναι ότι το πιο πιθανό εύρος λειτουργίας θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση. Εάν όχι, είναι αναγκαίο να διεξάγουμε δοκιμές για να καθορίσουμε την διακύμανση στις μετρούμενες παραμέτρους με την ταχύτητα και το φορτίο.

1.4) Η διαχρονική εξέλιξη των προσεγγίσεων της συντήρησης:

Η συντήρηση από την εμφάνισή της μέχρι σήμερα έχει εξελιχθεί κατά πολύ. Ειδικά τα τελευταία είκοσι χρόνια έχει αλλάξει ίσως περισσότερο απ' όσο περίμεναν οι ειδικοί. Νέα δεδομένα έχουν έρθει στο χώρο, ολοένα περισσότερα συστήματα και παραγωγικές μονάδες απαιτούν συντήρηση και φυσικά νέες τεχνικές και φιλοσοφίες εφαρμόζονται σε όλον τον κόσμο.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται συνοπτικά η διαχρονική εξέλιξη των προσεγγίσεων της συντήρησης:

Στρατηγικές / Φιλοσοφίες	Εμφανίστηκε	Εφαρμόστηκε
Λειτουργία ως τη Βλάβη (Breakdown Maintenance)	- Με την εμφάνιση των πρώτων μηχανών	
Προληπτική Συντήρηση (Preventive Maintenance)	- Με την υψηλή μηχανοποίηση αμέσως μετά το 2 ^ο Παγκόσμιο Πόλεμο – Η.Π.Α.	
Ολική Παραγωγική Συντήρηση (Total Productive Maintenance - TPM)	- η ιδέα υπάρχει από το 1951 (Ιαπωνία) - δεκαετία 60: η ιαπωνική εταιρία Nippondenso εξελίσσει την Προληπτική Συντήρηση στην Παραγωγική Συντήρηση - δεκαετία 70: το Ιαπωνικό Ινστιτούτο Συντήρησης θέτει τις αρχές της TPM – την εξελίσσουν σταδιακά ιαπωνικές επιχειρήσεις μικρού μεγέθους	- αρχές με μέσα δεκαετίας 80: η TPM είναι συνήθης στην Ιαπωνία και γίνεται δημοφιλής στις δυτικές χώρες
Συντήρηση με γνώμονα την Αξιοπιστία (Reliability Centered Maintenance – RCM)	- δεκαετίες 60 – 70: οι εμπορικές αερογραμμές και η Αεροπορία των Η.Π.Α. προσπαθούν να βελτιώσουν την αξιοπιστία αεροσκάφους τους - δημοσιεύσεις στελεχών των United Airlines χρησιμοποιούν για πρώτη φορά τον όρο RCM (Η.Π.Α.) - 1978: δημοσιεύσεις των United Airlines και Rand Corp. βιβλίου και αναφοράς εκτίμησης για την RCM αντίστοιχα με χρηματοδότηση του Υπουργείου Εθνικής Άμυνας των Η.Π.Α.	- αρχές δεκαετίας 80 και εφεξής ευρεία εφαρμογή
Προβλεπτική Συντήρηση (Predictive Maintenance)	- δεκαετία του 50: στατιστικοί του Υπουργείου Εθνικής Άμυνας των Η.Π.Α. αναπτύσσουν τις αρχές της αξιοπιστίας στη Στατιστική	- δεκαετία του 60: στη βιομηχανία αεροπορίας και συστημάτων ασφαλείας - δεκαετία 70: στην πολιτική αεροπορία και πυρηνική βιομηχανία

		- τέλη δεκαετίας 80 – αρχές δεκαετίας 90: με το τέλος του Ψυχρού Πολέμου στην παραγωγική βιομηχανία με τη συμμετοχή σε αυτή στελεχών των παραπάνω βιομηχανιών
Συντήρηση Ακριβείας (Design – Out Maintenance)	- τα τελευταία χρόνια	- δεν είναι διαδεδομένη ακόμη – αποτελεί το μέλλον της συντήρησης

Πίνακας 1.4Π1: Διαχρονική εξέλιξη των προσεγγίσεων της συντήρησης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην πράξη σε μία εγκατάσταση χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα περισσότερες της μίας προσεγγίσεις. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό να εξετάζεται ποια από τις διάφορες προσεγγίσεις αποδίδει καλύτερα οικονομικά και ταιριάζει περισσότερο σε κάθε τεχνικό σύστημα και στο λειτουργικό του περιεχόμενο.

1.5)Κυριότερες προσεγγίσεις συντήρησης:

Παρακάτω γίνεται μια σύντομη αναφορά στις κυριότερες προσεγγίσεις συντήρησης με βάση τον πίνακα που παρουσιάστηκε στην παράγραφο για την διαχρονική εξέλιξη των μεθόδων συντήρησης.

1.5.1)Λειτουργία ως τη βλάβη(breakdown maintenance):

Η λογική αυτής της μεθόδου συντήρησης είναι ιδιαίτερα απλή: Τα μηχανήματα αφήνονται να λειτουργούν χωρίς κάποια επέμβαση ή έλεγχο μέχρι την εμφάνιση βλάβης ή την παραγωγή προϊόντων κακής ποιότητας. Τότε μόνο γίνεται αναγκαστική επέμβαση για την αποκατάσταση του προβλήματος. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται και ως «Διορθωτική συντήρηση», με την έννοια ότι επεμβαίνει μόνο για να διορθώσει τις βλάβες και «συντήρηση εξ' αντιδράσεως», με την έννοια ότι αντιδρά στις βλάβες αντί να τις προλαμβάνει.

Η λειτουργία ως την βλάβη δεν απαιτεί σπουδαία οργάνωση ούτε προγραμματισμό. Απαιτεί όμως εκτέλεση εργασιών κάτω από συνθήκες πίεσης και κρίσης, που συνοδεύουν την εμφάνιση βλάβης.

Αυτή η μέθοδος συντήρησης μπορεί να είναι αποτελεσματική όταν εφαρμόζεται σωστά. Για παράδειγμα σε μικρής σημασίας και χαμηλού κόστους εξοπλισμούς, σε εξοπλισμούς όπου οι βλάβες μπορεί να είναι αποδεκτές(από τεχνικά αλλά και από οικονομική άποψη) ή σε εξοπλισμούς όπου καμία άλλη μέθοδος δεν είναι δυνατή. Σε περιπτώσεις χαμηλού κόστους λόγω βλάβης μπορεί να αποτελέσει μια καλή στρατηγική, καθώς σ' αυτές τις περιπτώσεις εξακολουθεί η καλύτερη συντήρηση να είναι η απουσία της.

1.5.2)Προληπτική συντήρηση(Preventive maintenance):

Διεθνώς έχουν καθιερωθεί πολλοί ορισμοί αυτής της μεθόδου. Κοινό σημείο όλων είναι η ένταξη των διαδικασιών συντήρησης σ' ένα χρονικά προγραμματισμένο πλαίσιο.

Η λογική της μεθόδου συνίσταται στο εξής: Προγραμματισμένος περιοδικός έλεγχος του εξοπλισμού. Κάθε σημαντικό μηχάνημα σταματά και επιθεωρείται επισταμένως μετά από συγκεκριμένες ώρες λειτουργίας (η προληπτική συντήρηση

αποτελεί παρεμβατική μέθοδο συντήρησης). Κάθε φθαρμένο εξάρτημα(εάν υπάρχει) αντικαθίσταται και το μηχάνημα παραδίδεται σε λειτουργία.

Επομένως, η προληπτική συντήρηση συνίσταται σε μια σειρά από δραστηριότητες οι οποίες προγραμματίζονται με συχνότητα που υπαγορεύεται από το συνολικό χρονικό διάστημα από την προμήθεια ενός μηχανήματος, τις ώρες λειτουργίας του και την παραγωγική του ικανότητα. και:

1. είτε παρατείνουν τη ζωή ενός εξαρτήματος/μηχανήματος (για παράδειγμα, η λίπανση σ' ένα κιβώτιο ταχυτήτων παρατείνει την ζωή του)
2. είτε αποκαλύπτουν ότι ένα εξάρτημα/μηχάνημα έχει φθαρεί σημαντικά και πρόκειται να αστοχήσει(για παράδειγμα, τρίμηνη επιθεώρηση έδειξε ότι υπάρχει ρήγμα στο στεγανωτικό μιας αντλίας-η εύρεση του ρήγματος επιτρέπει την επισκευή προτού εμφανιστεί καταστροφική βλάβη).

Σύμφωνα επομένως με αυτήν την μέθοδο, η συντήρηση σχεδιάζεται έτσι ώστε να διορθώνει είτε να προλαμβάνει καταστάσεις που μπορούν να οδηγήσουν σε βλάβες με αποτέλεσμα την απώλεια παραγωγής, με όλα τα δυσάρεστα επακόλουθα. Ακόμα και αν αυτό σημαίνει ότι ορισμένα εξαρτήματα πιθανόν να αντικατασταθούν πριν εξαντλήσουν τα αξιόπιστα λειτουργίας. Αν και πάλι η παραγωγική διαδικασία σταματά, η παραγωγή που χάνεται σε μια στάση-βλάβη είναι πολύ περισσότερη απ' ότι σε μια στάση που γίνεται προγραμματισμένα.

Η λογική πίσω απ' αυτήν την πρακτική συντήρησης είναι 'τοι οι ρυθμοί βλαβών του εξοπλισμού ακολουθούν μια πορεία στην οποία ο μόνος παράγοντας που ουσιαστικά επιδρά είναι ο χρόνος. Τα διαστήματα της συντήρησης προκαθαρίζονται είτε κυρίως από την εμπειρία του κατασκευαστή του συγκεκριμένου εξοπλισμού είτε, σε μικρότερο βαθμό, από την συστηματική τήρηση αρχείων στην εγκατάσταση. Με αυτό τον τρόπο θεωρητικά οι διαδικασίες συντήρησης μπορούν να προγραμματιστούν σε νεκρούς χρόνους λειτουργίας και τα απαραίτητα ανταλλακτικά να παραγγελθούν σε κατάλληλο χρονικό διάστημα.

Η λογική της επισκευής πριν πραγματοποιηθεί η βλάβη αποτελεί την ουσιαστική διαφοροποίηση από τη Λειτουργία ως τη Βλάβη και πέρα από την σημαντική μείωση του κόστους που προκύπτει από την παραμονή της μονάδας εκτός λειτουργίας (downtime cost) και τη δυνατότητα προγραμματισμού των χρόνων επισκευής και προμήθειας ανταλλακτικών, υπάρχει ένας ακόμα λόγος που την επιβάλλει: η καταστροφή συνδεδεμένων στοιχείων του συστήματος. Όταν κάποιο εξάρτημα αστοχεί, συχνά καταστρέφει τα στοιχεία που συνδέονται με αυτό, γεγονός που πολλαπλασιάζει το κόστος για την αποκατάσταση της (ολικής) βλάβης. Για παράδειγμα, εάν δεν αντικατασταθεί έγκαιρα το ρουλεμάν μιας αντλίας, θα χρειαστεί έπειτα να αντικατασταθούν τα περύγια, το κέλυφος και άλλα στοιχεία. Μερικές φορές η βλάβη δεν επιδεινώνεται και έτσι το κόστος αποκατάστασης και το κόστος από τη βλάβη είναι περίπου τα ίδια. Όμως η αναβολή της δράσης δημιουργεί ένα διαρκών αυξανόμενο πρόβλημα στο μελλοντικό τμήμα συντήρησης.

Για να είναι αποδοτική (και οικονομική) η Προληπτική Συντήρηση απαιτείται εκπαιδευμένο προσωπικό, αξιόπιστο και οργανωμένο σύστημα διακίνησης πληροφοριών, οι οποίες να υποστηρίζουν το σύστημα συντήρησης, τακτικές προγραμματισμένες επιθεωρήσεις και προληπτικές εργασίες συντήρησης.

Ακρογωνιαίος λίθος της Προληπτικής Συντήρησης είναι η διενέργεια ελέγχων. Έλεγχος είναι η διαδικασία εκείνη που:

1. Εξετάζει εάν ο σχεδιασμός ή οι προδιαγραφές ενός μηχανήματος είναι τα απαιτούμενα.
2. Εκτιμά όλους τους παράγοντες που μπορούν να δημιουργήσουν πιθανά προβλήματα.
3. Αναγνωρίζει όλους τους παράγοντες και τα αίτια και μπορούν να οδηγήσουν σε σταμάτημα και εκτιμά το χρόνο μέχρις ότου αυτό συμβεί.

Οι έλεγχοι θα πρέπει να παραγραμματίζονται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία των μηχανημάτων, οι δε επεμβάσεις, επισκευές ή αντικαταστάσεις που πιθανά χρειάζονται να μην έρχονται σε αντίθεση με το πρόγραμμα παραγωγής.

Υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί όσον αφορά την εφαρμογή της προληπτικής συντήρησης. Αυτοί είναι:

- Οι αστοχίες που δεν εξαρτώνται από τον χρόνο, δηλαδή εμφανίζονται τυχαία και μετά από ίσα χρονικά διαστήματα.
- Οι εξαρτώμενες από τον χρόνο αστοχίες που σχετίζονται από την διάρκεια ζωής του εξοπλισμού και οι οποίες δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν γιατί και αυτές δεν εμφανίζονται μετά από ίσα χρονικά διαστήματα. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι γι' αυτό, που οφείλονται κυρίως στον τρόπο λειτουργίας και σε εξωτερικούς παράγοντες, όπως κακή τοποθέτηση του εξαρτήματος, απώλεια λαδιών κ.λ.π.
- Η διαδικασία του σταματήματος της λειτουργίας του εξοπλισμού και της επανεκκίνησης του κάθε φορά που πραγματοποιείται μια επιθεώρηση. Μάλιστα όσο πιο μεγάλα και πιο βαριά είναι τα μηχανήματα που σταματούν τόσο πιο δύσκολη και ακριβή είναι η επανεκκίνησή τους.

1.5.3) Προβλεπτική συντήρηση (Preventive maintenance):

Όπως ήδη γνωρίζουμε από τα προηγούμενα, το κρίσιμο σημείο για την επίτευξη μιας αποτελεσματικότερης συντήρησης ήταν να βρεθούν εκείνες οι τεχνικές συντήρησης που από την μία θα ταίριαζαν στην συγκεκριμένη δραστηριότητα της εκάστοτε επιχείρησης (βιομηχανική, μεταφορική, κατασκευαστική κ.λ.π.) και από την άλλη θα διασφάλιζαν:

- Πρόβλεψη των επικείμενων προβλημάτων και σχεδιασμό της αντιμετώπισής τους πριν αυτά γίνουν καταστροφικά.
- Μείωση των πιθανοτήτων αστοχίας στο στάδιο της «νηπιακής» ηλικίας και περιορισμός των επιπτώσεων όταν αυτή συμβεί.
- Εφαρμογή ενός προγράμματος ποιοτικής διασφάλισης και συνέχειας της λειτουργίας των καινούργιων ιδιαίτερα μηχανημάτων και γενικά όλου του μηχανολογικού εξοπλισμού.
- Παρακολούθηση και καταγραφή όλων των παραμέτρων της συντήρησης έτσι ώστε τα στοιχεία που συλλέγονται να αξιοποιούνται και τα συμπεράσματα να αποτελούν οδηγό δράσης για την βελτίωση της παραγωγικής δραστηριότητας.

Με στόχο τα παραπάνω, τα οποία τελικά αποσκοπούν στην σταδιακή μετατόπιση των εργασιών συντήρησης από εργασίες αποκατάστασης –επισκευής σε διαδικασίες πρόληψης-πρόβλεψης, αναπτύχθηκε η προβλεπτική συντήρηση.

Η μέθοδος της προβλεπτικής συντήρησης βασίζεται στην χρήση συστημάτων μέτρησης και ελέγχου που επιτρέπουν την ουσιαστική διάγνωση της πραγματικής φυσικής κατάστασης του εξοπλισμού όσο αυτό βρίσκεται σε λειτουργία (μη παρεμβατική

μέθοδος). Στόχος είναι η πρόγνωση του χρόνου επισκευής ή συντήρησης πριν από την εμφάνιση σοβαρών προβλημάτων ή βλαβών.

Η προβλεπτική συντήρηση επομένως κάνει χρήση των θετικών χαρακτηριστικών από τις δύο προηγούμενες μεθόδους με το βέλτιστο δυνατό συνδυασμό τους για να επιτύχει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Έχει το στοιχείο της πρόληψης στην εμφάνιση βλάβης(Προληπτική Συντήρηση), αλλά χρησιμοποιεί την πρόγνωση προκειμένου να επέμβει διορθώνοντας έγκαιρα την βλάβη(Διορθωτική Συντήρηση) όταν πλέον αυτή είναι αναπόφευκτη.

Αυτή η προσέγγιση έχει μειωμένο κόστος σε σχέση με τη με βάση κάποια συχνότητα επαναλαμβανόμενη Προληπτική Συντήρηση επειδή οι δραστηριότητες της συντήρησης εκτελούνται μόνο όταν είναι δικαιολογημένες.

Η εφαρμογή ενός συστήματος Προβλεπτικής Συντήρησης απαιτεί καλή οργάνωση και υποδομή συνεργειών, τα οποία όμως δεν διαχωρίζονται σε συνεργεία ελέγχου και επεμβάσεων. Χωρίζονται και αποεντρώνονται σε μικρότερους τομείς ευθύνης που εκτελούν όλους τους ελέγχους και επεμβάσεις.

Ακολουθείται πρόγραμμα το οποίο προκύπτει σε συνεργασία με τους υπεύθυνους παραγωγής για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της λειτουργίας του εξοπλισμού. Η κατάσταση και η απόδοση του εξοπλισμού παρακολουθούνται συνεχώς δυναμικά(condition monitoring). Οι περισσότεροι έλεγχοι μηχανημάτων γίνονται κατά την διάρκεια που αυτά λειτουργούν. Τα στοιχεία που προκύπτουν δίνουν πληροφορίες για την κατάσταση του μηχανήματος και βοηθούν στην πρόβλεψη του χρόνου επέμβασης για συντήρηση ή διόρθωση. Μόνο όταν προγραμματιστεί η επισκευή γίνεται διακοπή της λειτουργίας του.

Ο αιώτερος σκοπός της Προβλεπτικής Συντήρησης είναι να πραγματοποιεί τις εργασίες συντήρησης σε μια προγραμματισμένη χρονική στιγμή πριν ο εξοπλισμός αστοχήσει εν λειτουργία και όταν η συντήρηση είναι οικονομικά δικαιολογημένη, δηλαδή όταν το κόστος της δεν υπερβαίνει αυτό που θα επέφερε η βλάβη του εξοπλισμού.

Ενώ η φιλοσοφία της Προληπτικής Συντήρησης αφορά περισσότερο τις εξαρτώμενες από το χρόνο αστοχίες, η Προβλεπτική Συντήρηση ασχολείται με τα τυχαία και ξαφνικά εμφανιζόμενα προβλήματα τα οποία προσπαθεί να εντοπίσει και να διορθώσει εγκαίρως. Αν και οι αστοχίες δεν είναι δυνατό να ελεγχθούν πλήρως, με την υιοθέτηση αυτής της μεθόδου συντήρησης μπορούν να μειωθούν σημαντικά οι τυχαία εμφανιζόμενες αστοχίες και οι επιπτώσεις τους.

1.5.4) Συντήρηση ακριβείας(Design-out maintenance):

Η συντήρηση ακριβείας αποτελεί μια νέα φιλοσοφία συντήρησης η οποία αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια. Προσανατολίζεται στο σχεδιασμό, έχει δηλαδή σκοπό να διορθώσει ελαττώματα του σχεδιασμού, που μπορεί να προέρχονται από ακατάλληλη μέθοδο εγκατάστασης, επιλογή λάθος υλικών κατασκευής, ασαφή καθορισμό προδιαγραφών λειτουργίας κ.α. Προφανώς αυτό αποτελεί μηχανικό πρόβλημα, αλλά ευθύνη εξακολουθεί να έχει και το τμήμα της συντήρησης. Γι' αυτό το λόγο απαιτείται η σε μεγάλο βαθμό αλληλεπίδραση των τμημάτων συντήρησης και σχεδιασμού έτσι ώστε ο μηχανικός συντήρησης να συνεργάζεται στενά με τον μηχανικό σχεδιασμού.

Σε ορισμένες περιπτώσεις είτε αδυνατών να βρεθεί μία δραστηριότητα συντήρησης ρουτίνας που να εξασφαλίζει το επιθυμητό επίπεδο διαθεσιμότητας του εξοπλισμού είτε δεν είναι πρακτικό αυτή να διενεργείται με την απαιτούμενη συχνότητα.

Όμως και σ' αυτές τις περιπτώσεις κάτι πρέπει να γίνεται, ώστε να μειώνεται ο κίνδυνος πολλαπλής αστοχίας σε ένα ανεκτό επίπεδο. Σε αυτές τις περιπτώσεις καθίσταται αναγκαία η επανεξέταση του σχεδιασμού. Ο επανασχεδιασμός αφορά κυρίως κάποιες επεμβάσεις σε νευραλγικά σημεία της μηχανής και την αντικατάσταση και επιλογή ίσως άλλων εναλλακτικών λύσεων. Εάν η αστοχία έχει συνέπειες στην ασφάλεια του προσωπικού ή το περιβάλλον, τότε ο επανασχεδιασμός είναι αναγκαστικός. Εάν η αστοχία έχει μόνο οικονομικές επιπτώσεις, τότε η ανάγκη επανασχεδιασμού εκτιμάται με βάση οικονομικά κριτήρια.

Η λογική αυτής της μεθόδου είναι διαφορετική από των υπολοίπων. Ενώ οι περισσότερες μέθοδοι συντήρησης έχουν σαν στόχο την εξάλειψη των αστοχιών ή των επιπτώσεων των αστοχιών, η Συντήρηση Ακριβείας αποσκοπεί μεν στην ελαχιστοποίηση των αστοχιών, αλλά μέσω της εξάλειψης των αιτιών της συντήρησης, δηλαδή των αιτιών που οδηγούν στην ανάγκη για συντήρηση.

Η συντήρηση ακριβείας στοχεύει στην καρδιά της αξιοπιστίας με την βελτίωση ατελειών στον σχεδιασμό. Πλεονεκτεί σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους συντήρησης στο ότι εφαρμόζεται μία μόνο φορά για να φέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Ο στόχος της είναι να «χτυπήσει» την εξάλειψη της αξιοπιστίας και όχι τα αποτελέσματα αυτής της έλλειψης, δηλαδή την πηγή που προκαλεί τα προβλήματα.

Υπάρχουν όμως δύο προαπαιτούμενα για την εφαρμογή της Συντήρησης Ακριβείας. Αυτά είναι:

1. Είναι απαραίτητη η ύπαρξη μιας διεθντικής ομάδας η οποία να πιστεύει στην καινοτομία και να ακολουθεί την αγορά. Χωρίς την παρακολούθηση της αγοράς δεν είναι δυνατή και η καινοτομία, αφού αυτή αποτελεί απάντηση στις απαιτήσεις του πελάτη.
2. Η εφαρμογή της συντήρησης ακριβείας απαιτεί ικανούς και πεπειραμένους ερευνητές στους οποίους να παρέχεται ο χρόνος και τα κεφάλαια για να κάνουν την ανάλυση/σύνθεση που θα οδηγήσει στις επιθυμητές βελτιώσεις. Οι ερευνητές πρέπει να ξέρουν σε βάθος τους νόμους και τις αρχές της φυσικής και της χημείας για να επιλύουν μηχανικά προβλήματα.

Γενικά, εφαρμόζεται σε εταιρίες που βλέπουν την όλη λειτουργία ενός οργανισμού σαν ένα δυναμικό σύστημα και πιστεύουν ότι η επένδυση θα αποδώσει.

Βιβλιογραφία:

- [1] Θ.Ν.Κωστόπουλος, D.S.c.-«Σημειώσεις του μαθήματος Συντήρησης Μηχανών», Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [2] Τσαντιώτης Χ. Δημήτρης, Θ.Ν.Κωστόπουλος(2006), «Εργαστηριακός οδηγός του μαθήματος Συντήρησης Μηχανών», Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [3] Διπλωματική εργασία με θέμα «Μεθοδολογίες Συντήρησης Μηχανών και σύγχρονες τάσεις», Τσώλη Ασημίνα, Αθήνα 2007.

Κεφάλαιο 2ο

Είδη οδοντωτών τροχών-Δυνάμεις επί των οδόντων-Διεύθυνση μετρήσεων ανάλογα με το είδος του τροχού:

Οδοντωτοί τροχοί:

2.1)Γενικά:

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

Στους περισσότερους τύπους οδοντωτών τροχών οι οδόντες δεν είναι θεωρητικά απαραίτητοι για την μετάδοση περιστροφικής κινήσεως. Όμως, η ανάγκη μεταφοράς μεγάλης στρεπτικής ροπής και σταθερής μετάδοσης κίνησης(δηλαδή σταθερών σχέσεων μεταδόσεως στροφών) από την κινητήρια στην κινούμενη άτρακτο καθιστά αναγκαία την ύπαρξη οδόντων.

Απο κινηματικής πλευράς βέβαια, δύο συνεργαζόμενοι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί ισοδυναμούν με δύο κυλινδρικούς τροχούς χωρίς οδόντες, που έχουν ως άξονες περιστροφής τους ίδιους τους άξονες των οδοντωτών τροχών και μπορούν να περιστραφούν παραμένοντας σε επαφή χωρίς να ολισθαίνουν ο ένας ως προς τον άλλον. Τότε, οι περιφερειακές ταχύτητες των δύο κυλίνδρων είναι ίσες, δηλαδή αναλυτικότερα:

$$u_1 = u_2 \Leftrightarrow \omega_1 \cdot R_1 = \omega_2 \cdot R_2 \Leftrightarrow \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

απ' όπου αντιλαμβανόμαστε ότι η σχέση μετάδοσης της κίνησης είναι αντιστρόφως ανάλογη των ακτίνων των κυλίνδρων. Οι ακτίνες επομένως των κυλιόμενων επιφανειών, αν και είναι θεωρητικό μέγεθος αποτελούν στοιχείο μεγάλης σημασίας στους οδοντωτούς τροχούς. Σε ένα οδοντωτό τροχό μετωπικής οδόντωσης η τομή της κυλινδρικής επιφάνειας αυτής με το επίπεδο περιστροφής αποτελεί τον αρχικό κύκλο και έτσι κάθε οδοντωτός τροχός χαρακτηρίζεται μεταξύ των άλλων και από την ακτίνα του αρχικού κύκλου. Σε μη κανονικές οδοντώσεις όπως είναι οι μετατοπισμένες, ορίζεται ο κύκλος κυλίσεως, όταν ο τροχός ανήκει σε βαθμίδα, δηλαδή σε ζεύγος συνεργαζόμενων οδοντωτών τροχών.

2.2)Είδη οδοντωτών τροχών:

Οι άξονες περί τους οποίους περιστρέφονται δύο συνεργαζόμενοι οδοντωτοί τροχοί μπορεί να είναι: παράλληλοι σε απόσταση a , τεμνόμενοι υπό γωνία δ ή ασύμβατοι σε απόσταση a και υπό γωνία δ . Η σχετική θέση αυτών των αξόνων είναι βασικής σημασίας

για την μορφή των τροχών που θα χρησιμοποιηθούν. Τα είδη των οδοντωτών τροχών είναι λοιπόν:

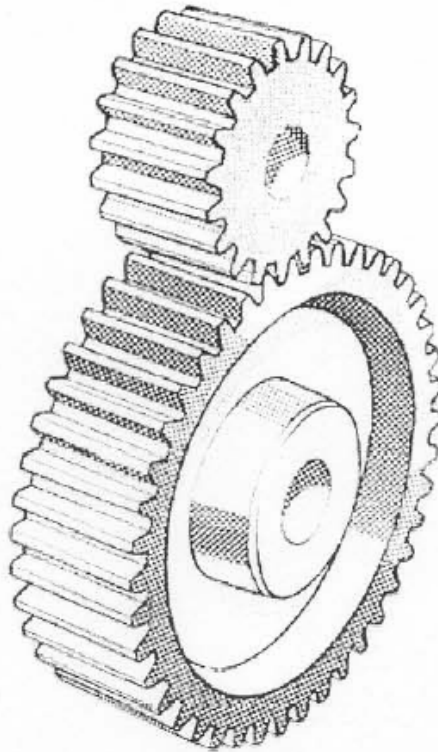
- ο Μετωπικοί(με ευθείς ή ελικοειδείς οδόντες).
- ο Κωνικοί.
- ο Ελικοειδείς ασύμβατων αξόνων.
- ο Σύστημα ατέρμονα κοχλία-κορώνας.

Παρακάτω παραθέτουμε εν συντομία τα χαρακτηριστικά των τεσσάρων παραπάνω ειδών οδοντωτών τροχών.

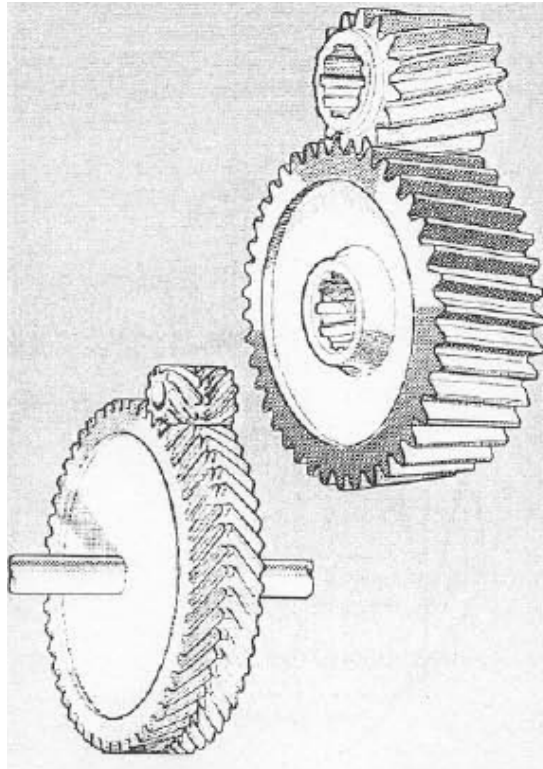
2.2.1)Μετωπικοί τροχοί:

Οι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί διακρίνονται σε αυτούς με ευθείς οδόντες(εικόνα 1) και σε αυτούς με ελικοειδείς οδόντες(εικόνα 2).

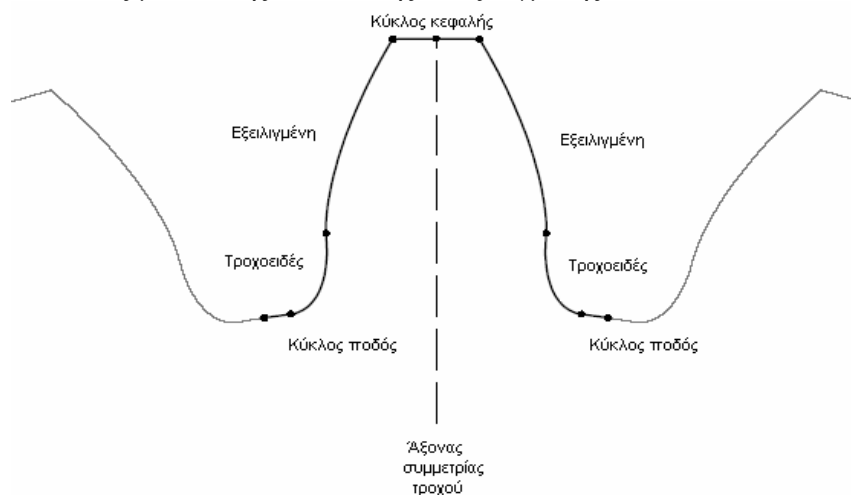
Στην πρώτη περίπτωση, τα δόντια είναι παράλληλα με τον άξονα του τροχού, ενώ στην δεύτερη, είναι κεκλιμένα ως προς τον άξονα του τροχού, σχηματίζοντας σταθερή γωνία με αυτόν, ενώ για να είναι δυνατή η συνεργασία τους πρέπει σε μια βαθμίδα ο ένας να έχει δεξιόστροφους και ο άλλος αριστερόστροφους οδόντες. Οι μετωπικοί τροχοί ευθείας οδοντώσεως έχουν βαθμό επικάλυψης 1 έως 2 ενώ δεν ενδύκνυνται για μεγάλα φορτία γιατί προκαλούν θόρυβο και δημιουργούν μεγάλα δυναμικά φορτία. Αντίθετα, οι μετωπικοί τροχοί ελικοειδούς οδοντώσεως έχουν μεγαλύτερο βαθμό επικάλυψης, αλλά μειονεκτούν στο θέμα ότι η ύπαρξη της γωνίας έλικας έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη αξονικού φορτίου επί των οδόντων, το οποίο καταπονεί τις σταθερές εδράσεις των ατράκτων.Οι μετωπικοί οδοτωτοί τροχοί μπορούν να έχουν εξωτερική οδόντωση, δηλαδή οι οδόντες να βρίσκονται στην εξωτερική επιφάνεια του τροχού ή εσωτερική οδόντωση, δηλαδή οι οδόντες να βρίσκονται στην εσωτερική επιφάνεια του τροχού.



Εικόνα 2.2.1.E1: Ζεύγος μετωπικών τροχών με ευθεία οδόντωση



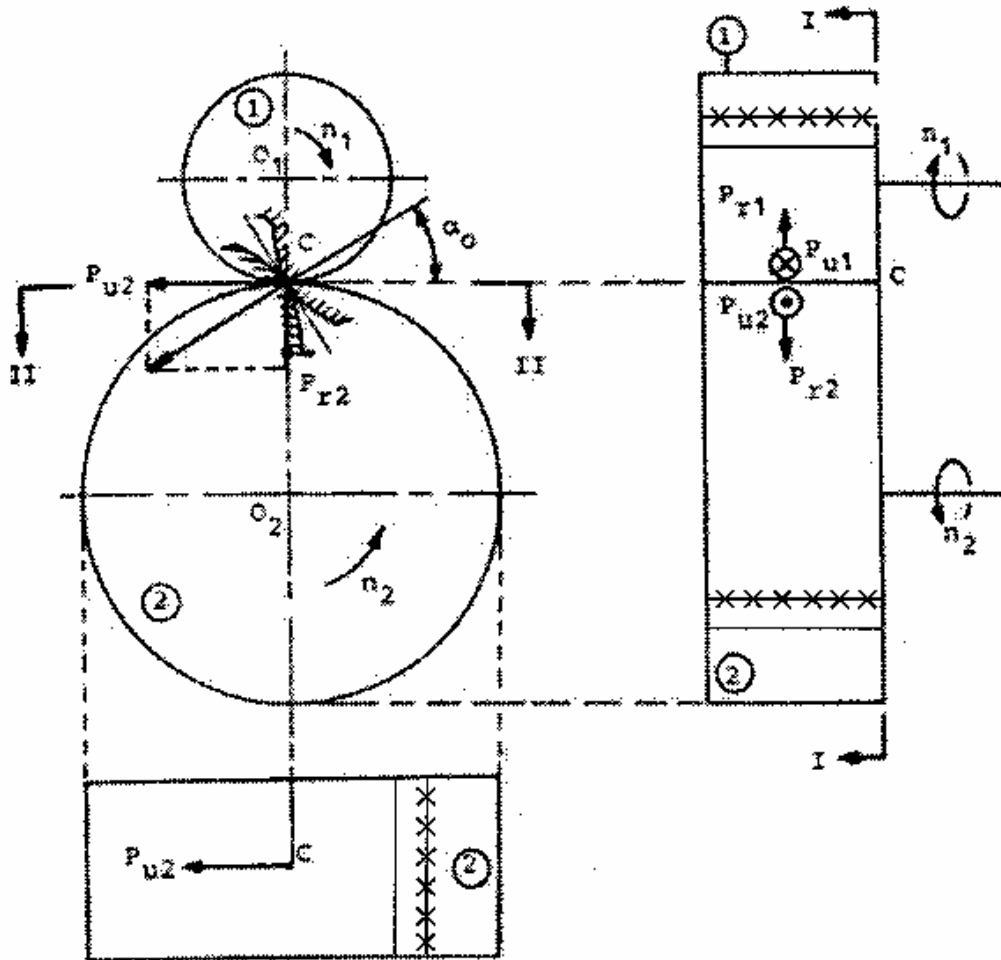
Εικόνα 2.2.1.E2: Ζεύγος μετωπικών τροχών με ελικοειδή οδόντωση
 Στην περίπτωση μιας βαθμίδα, όταν δύο μετωπικοί τροχοί διαφορετικού μεγέθους εμπλέκονται, ο μεγαλύτερος καλείται κορώνα και ο μικρότερος πινιόν. Σε μια απλή βαθμίδα τροχών μείωσης η εισερχόμενη ισχύς και δύναμη εφαρμόζονται στο κινητήριο τροχό, το πινιόν. Η εξερχόμενη από την βαθμίδα ισχύς και δύναμη μεταφέρονται από τον κινούμενο τροχό. Ο κινητήριο τροχός περιστρέφει τον κινούμενο χωρίς ολίσθηση. Αντίθετα, σε μια βαθμίδα τροχών αύξησης, κινητήριο τροχός θεωρείται ο μεγαλύτερος. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται, η μορφή μιας κατατομής ενός δοντιού ενός τροχού ευθείας μετωπικής οδόντωσης δι'εξλιγμένης.



Σχήμα 2.2.1.Σ1: Μορφή κατατομής δοντιού τροχού ευθείας μετωπικής οδόντωσης.

Φορτίσεις μετωπικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης:

Για να παρουσιάσουμε τις δυνάμεις που ανπτύσσονται στο σημείο κυλίσεως μιας βαθμίδας οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης παραθέτουμε το παρακάτω σχήμα(σχήμα2).



Σχήμα 2.2.1.Σ2: Δυνάμεις επί των οδόντων μετωπικών οδοντωτων τροχών ευθείας οδόντωσης.

Σ' αυτό η ολική δύναμη που ασκείται στον οδόντα του τροχού 2, επί της γραμμής ενεργείας, αναλύεται σε δύο συνιστώσες, την ακτινική P_{r2} και την περιφερειακή P_{u2} . Το σημείο κυλίσεως στο παραπάνω σχήμα σημειώνεται ως C. Στον τροχό 1 ακούονται οι δυνάμεις P_{u1} , P_{r1} που λόγω της αρχής δράσης=αντίδραση είναι ίσες και αντίθετες με τις αντίστοιχες δυνάμεις του τροχού 2. Επομένως θα λέμε ότι στο σημείο κυλίσεως της βαθμίδας ασκούνται οι δυνάμεις P_u , P_r και θα εννοούμε ότι αυτές οι δυνάμεις ακούονται σε καθεμία από τις συνεργαζόμενες κατατομές. Στην επάνω δεξιά πλευρά του σχήματος 2 φαίνονται οι εργαζόμενες πλευρές των οδόντων που συνεργάζονται στο σημείο κυλίσεως C. Η όψη I-I είναι η μετωπική τομή των τροχών και η όψη II-II εξετάζει τον τροχό 2. Εάν υποθεθεί ότι η προς μεταφορά (μέσω της βαθμίδας) ισχύς είναι N με n_1 στροφές (ανά μονάδα χρόνου) του πινιόν, τότε η στρεπτική ροπή στο πινιόν θα είναι:

$$M_{d1} = \frac{N}{\omega_1}$$

όπου: $\omega_1 = 2\pi n_1$ είναι η γωνιακή ταχύτητα του πιονίον.

Ο παρακάτω τύπος χρησιμοποιείται με επιτυχία για τον υπολογισμό της στρεπτικής ροπής:

$$M_d = 71620 \frac{N}{n}$$

Όπου:

$M_d \rightarrow$ η στρεπτική ροπή του τροχού (Kp cm)

$N \rightarrow$ η ισχύς που μεταφέρεται από την βαθμίδα (PS)

$n \rightarrow$ ο αριθμός στροφών του τροχού (rpm)

Η περιφερειακή δύναμη που θα απαιτηθεί στην βαθμίδα δίνεται από την σχέση:

$$P_u = \frac{2 M_{d1}}{d_{o1}} = \frac{2 M_{d2}}{d_{o2}}$$

Όπου:

$d_{o1}, d_{o2} \rightarrow$ η διάμετρος του αρχικού κύκλου των τροχών 1 και 2 αντίστοιχα (mm)

Η ακτινική δύναμη προκύπτει από την όψη I-I μέσω της οξείας γωνίας α_o ως εξής:

$$P_r = P_u \tan \alpha_o$$

Η συνολική δύναμη P που ασκείται στον τροχό δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P = \sqrt{P_u^2 + P_r^2}$$

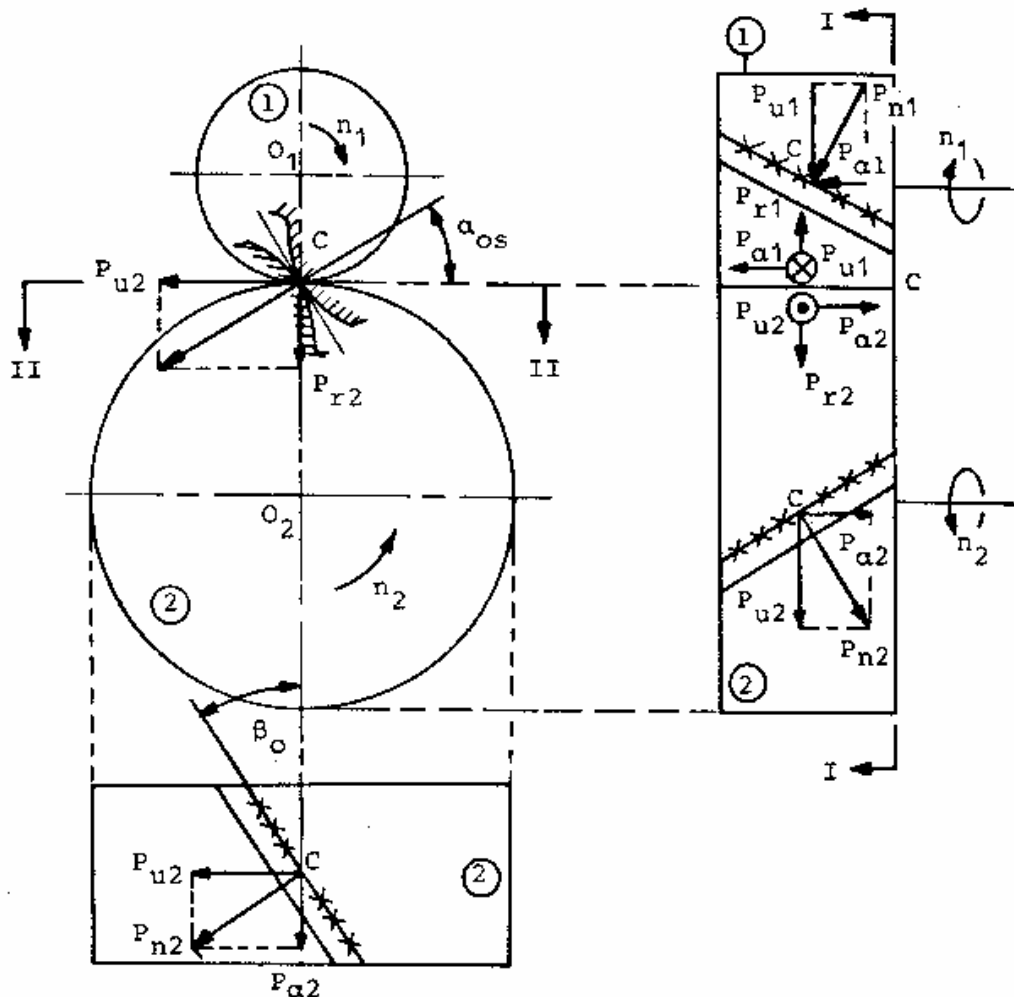
Και με αντικατάσταση των σχέσεων για τις P_r και P_u έχουμε:

$$P = \sqrt{\left(\frac{2 M_{d1}}{d_{o1}}\right)^2 + \left(\frac{2 M_{d1}}{d_{o1}} \tan \alpha_o\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2 M_{d2}}{d_{o2}}\right)^2 + \left(\frac{2 M_{d2}}{d_{o2}} \tan \alpha_o\right)^2}$$

Όπως καταλαβαίνουμε λοιπόν από την παραπάνω ανάλυση φορτίσεων για τους μετωπικούς τροχούς ευθείας οδόντωσης, ο καλύτερος καθορισμός σήματος (επομένως και η καλύτερη θέση τοποθέτησης του αισθητήρα για μετρήσεις κραδασμών) επιτυγχάνεται στην ακτινική διεύθυνση, αφού η συνιστώσα της αξονικής δύναμης (σε αντίθεση με τους μετωπικούς τροχούς ελικοειδούς οδόντωσης όπως θα δούμε παρακάτω) είναι ίση με το μηδέν.

Φορτίσεις μετωπικών οδοντωτών τροχών ελικοειδούς οδόντωσης:

Για να παρουσιάσουμε τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στο σημείο κυλίσεως μιας βαθμίδας οδοντωτών τροχών ελικοειδούς οδόντωσης παραθέτουμε το παρακάτω σχήμα(σχήμα3).



Σχήμα 2.2.1.Σ3: Δυνάμεις επί των οδόντων μετωπικών οδοντωτών τροχών ελικοειδούς οδόντωσης.

Στον τροχό 1 ασκούνται οι δυνάμεις αναφέραμε και στην προηγούμενη ενότητα για μετωπικούς τροχούς ευθείας οδόντωσης με την μόνη διαφορά ότι εδώ εμφανίζεται και η γωνία β_o (β_o : η κλίση των οδόντων ως προς τον άξονα του τροχού στον αρχικό κύκλο) Όπως καταλαβαίνουμε λοιπόν από την παραπάνω ανάλυση φορτίσεων για τους μετωπικούς τροχούς ελικοειδούς οδόντωσης (το ίδιο ισχύει και για κωνικά γρανάζια), εφόσον έχουμε να κάνουμε με μετωπικούς τροχούς ελικοειδούς οδόντωσης, μπορούμε να τοποθετήσουμε τον μεταλλάκτη μας με τον οποίο λαμβάνουμε τις μετρήσεις τόσο κατά την αξονική, όσο και κατά την ακτινική κατεύθυνση.

2.2.2)Κωνικοί οδοντωτοί τροχοί:

Οι κωνικοί τροχοί χρησιμοποιούνται για την μετάδοση κινήσεως και μεταφορά ισχύος τεμνόμενων ατράκτων. Οι τροχοί αυτοί έχουν την μορφή κολουρου κώνου του οποίου οι οδόντες μπορεί να είναι ευθείς ή τμήματα εξειλιγμένης ή τόξα κύκλου κ.λ.π.. Περισσότερο χρησιμοποιούμενοι είναι οι κωνικοί τροχοί με άξονες τεμνόμενους υπό γωνία 90° . Μολονότι, τόσο η κατασκευή των κωνικών τροχών(η οποία γίνεται σε ειδικές μηχανές κοπής) όσο και η συναρμολόγηση του μηχανισμού είναι πολυπλοκότερη εκείνης των μετωπικών τροχών, εν τούτοις οι κωνικοί τροχοί εφαρμόζονται συχνά στην μετάδοση κινήσεως και μεταφορά ισχύος.

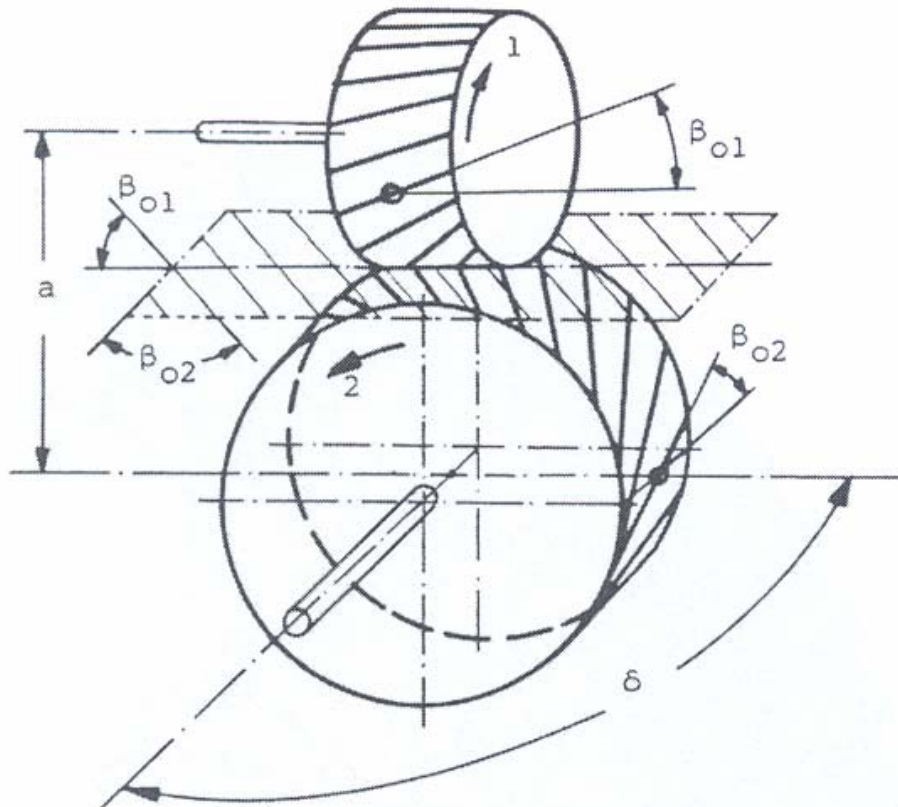
2.2.3)Ελικοειδείς οδοντωτοί τροχοί ασύμβατων αξόνων:

Οι οδοντωτοί αυτοί τροχοί(σχήμα 2) είναι κυλινδρικοί και έχουν άξονες ασύμβατους σε απόσταση a και υπό γωνία δ , ή οποία είναι τέτοια ώστε:

$$\delta = \beta_{01} + \beta_{02}$$

όπου: β_{01} και β_{02} είναι οι κλίσεις των οδόντων των τροχών. Γενικώς είναι: $\beta_{01} = \beta_{02}$.

Τα δόντια δύο συνεργαζόμενων ελικοειδών τροχών ασύμβατων ασύμβατων αξόνων έχουν σημειακή επαφή, η οποία μετατρέπεται σε γραμμική καθώς αυξάνει η φθορά των κατατομών. Λόγω του τρόπου επαφής τους οι τροχοί μπορούν να μεταφέρουν μικρά φορτία και γι'αυτό χρησιμοποιούνται κατά βάση μόνο για την μετάδοση κίνησης και δεν ενδείκνυται για μεταφορά ισχύος. Σ' αυτό συνηγορεί και ο μικρός βαθμός αποδόσεως των οδοντώσεών τους. Τέλος χρησιμοποιούνται για σχέσεις μεταδόσεως έως 5 και δεν είναι ευαίσθητοι σε μικρές μεταβολές αποστάσεως ή κλίσεως των αξόνων τους.



Σχήμα 2.2.3.Σ1: Βαθμίδα ελικοειδών τροχών ασύμβατων αξόνων

2.2.4) Σύστημα ατέρμονα κοχλία-κορώνας:

Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα ατέρμονα κοχλία, που είναι ουσιαστικά ένας κοχλίας κινήσεως κατάλληλου σπειρώματος μίας ή περισσοτέρων αρχών, ο οποίος συνεργάζεται με έναν οδοντωτό τροχό κατά τέτοιο τρόπο ώστε η συνεργασία τους να μοιάζει με τον τρόπο εμπλοκής στη συνεργασία ενός κοχλία με το περικόχλιό του. Οι άξονές τους είναι συνήθως κάθετοι, αν και είναι δυνατόν να σχηματίζουν άλλη γωνία. Το σύστημα αυτό ενδείκνυται για μεταφορά μεγάλων φορτίων και για μεγάλες σχέσεις μείωσης, έως και 200:1.

2.3) Εκτίμηση του λόγου μείωσης:

Όταν δύο ή περισσότερα γρανάζια βρίσκονται σε σύμπλεξη, η συχνότητα εμπλοκής γραναζιών που δημιουργείται καθορίζεται όπως γνωρίζουμε από την ταχύτητα των γραναζιών και από τον αριθμό των δοντιών του. Η εκτίμηση του λόγου μείωσης των δοντιών του γραναζιού μπορεί να επιτευχθεί με την παραγοντοποίηση του αριθμού των δοντιών σε κάθε γρανάζι και τον καθορισμό του μεγαλύτερου κοινού παράγοντα. Εκτός από τους μηχανισμούς χρονισμού και άλλες ειδικές εφαρμογές, ένα «ιδανικό» ζεύγος γραναζιών δεν έχει σύνολο δοντιών με κοινό παράγοντα διαφορετικό του 1. Όταν το 1 είναι ο μόνος κοινός παράγοντας ένα δόντι στο ένα γρανάζι πρέπει να εμπλακεί με όλα τα δόντια στο άλλο γρανάζι προτού δύο δόντια εμπλακούν για δεύτερη φορά. Αυτό εξασφαλίζει σχετικά ίση φθορά σε κάθε δόντι. Όταν ο αριθμός των δοντιών σε κάθε δόντι έχει ένα κοινό παράγοντα διαφορετικό του 1, ένα δόντι στο ένα γρανάζι θα εμπλακεί με κάθε n -οστό (όπου n ο μεγαλύτερος κοινός παράγοντας) του άλλου γραναζιού. Όταν συμβαίνει αυτό κάθε n -οστό δόντι μπορεί να φθαρεί διαφορετικά, το χρονικό σήμα της συχνότητας εμπλοκής γραναζιών μπορεί να παραμορφωθεί και ένα FFT στο σήμα μπορεί να παράγει κλασματικές συχνότητες στην συχνότητα εμπλοκής γραναζιών.

Ο αριθμός δοντιών σε κάθε γρανάζι θα έπρεπε να παραγοντοποιείται ώστε να καθοριστεί αν τα γρανάζια έχουν κοινό παράγοντα διαφορετικό του 1. Τα γρανάζια με κοινό παράγοντα διαφορετικό του 1 θεωρούνται ως έχοντα ακατάλληλο λόγο μείωσης (εκτός από τα γρανάζια που χρησιμοποιούνται στους μηχανισμούς χρονισμού). Όταν ένα ζεύγος γραναζιών έχει ως κοινό παράγοντα τους αριθμούς 2,3,4 κ.λ.π., ένα συγκεκριμένο δόντι σ ένα γρανάζι θα εμπλακεί μόνο με το δεύτερο, τρίτο, τέταρτο κ.λ.π. δόντι στο συνεργαζόμενο γρανάζι. Αυτά τα δόντια μπορούν να έχουν μεγαλύτερη φθορά αν ένα δόντι είναι ελαττωματικό. Ο κοινός παράγοντας προσδιορίζει την μορφή των ελαττωματικών ή φθαρμένων δοντιών. Ένας κοινός παράγοντας του 1 υποδεικνύει ότι κάθε δόντι φθείρεται. Ένας κοινός παράγοντας 2 ή 3 υποδεικνύει ότι κάθε δεύτερο ή κάθε τρίτο δόντι αντίστοιχα φθείρεται. Ο μη κοινός παράγοντας προσδιορίζει τον αριθμό των δοντιών με παρόμοια φθορά στο γρανάζι και τον αριθμό των περιστροφών που πρέπει να κάνει το άλλο γρανάζι προτού να εμπλακούν ξανά τα ίδια δόντια. Η συχνότητα αυτού του γεγονότος καλείται συχνότητα σύμπτωσης οδόντων (HTF).

2.4) Ποιοτικός έλεγχος οδοντωτών τροχών:

Έστω δύο τροχοί πλήθους οδόντων Z_1 και Z_2 . Η γωνία περιστροφής του πρώτου ϕ_1 , δεν αντιστοιχεί σε γωνία περιστροφής του δεύτερου $\phi_2 = \phi_1(Z_1/Z_2)$, όπως προβλέπεται θεωρητικά, αλλά σε κάποια κοντινή της τιμή. Η διαφορά μεταξύ της προβλεπόμενης τιμής για τη ϕ_2 και της πραγματικής καλείται σφάλμα μετάδοσης (transmission error). Οι αιτίες μπορεί να είναι:

- A) τα όποια κατασκευαστικά σφάλματα του τροχού, και ακόμα
- B) η πιθανή παραμόρφωση του οδόντα υπό καθεστώς φόρτισης.

Το σφάλμα μετάδοσης είναι η κύρια πηγή διέγερσης των προκαλούμενων κραδασμών, οι οποίοι ευθύνονται για τη δυναμική φόρτιση των οδοντωτών τροχών, όπως προέκυψε από την πειραματική παρατήρηση του φαινομένου.

Όσο μεγαλύτερο είναι το σφάλμα μετάδοσης, τόσο εντονότερη είναι η εμφάνιση θορύβου και κραδασμών, που σαφώς επιδρά αρνητικά στην αντοχή των μηχανικών μερών και την απόδοση της μετάδοσης της κίνησης. Εδώ υπεισέρχεται ο έλεγχος ποιότητας, η μέθοδος δηλαδή εξασφάλισης ενός μέγιστου επιπέδου σφάλματος, σύμφωνα με ό,τι απαιτούν οι προδιαγραφές της εκάστοτε εφαρμογής.

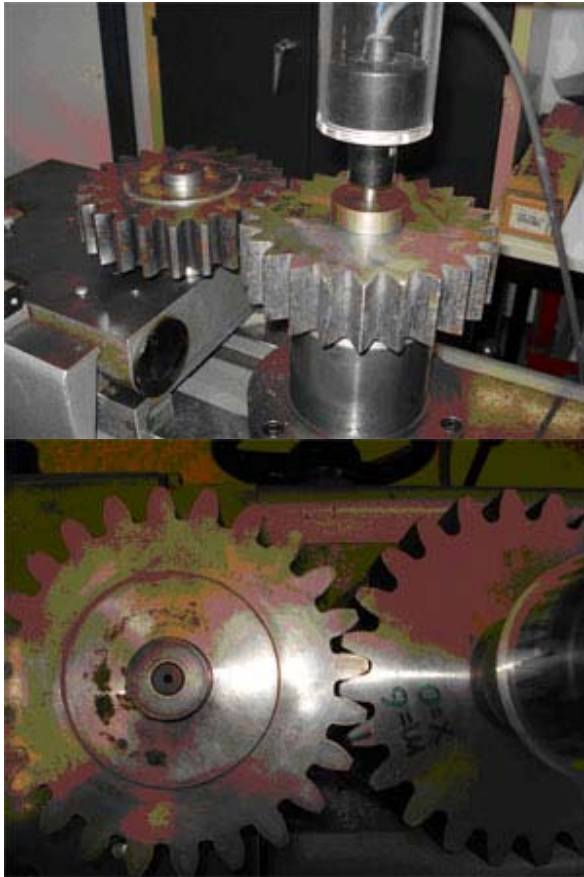
2.4.1) Είδη σφαλμάτων:

- Κατασκευαστικά σφάλματα:
 - A) κατατομής κοπτικού εργαλείου
 - B) τοποθέτησης-ανισομέρειες στο βήμα
 - οδοντώσεις στραμμένες κατά ορισμένη γωνία σε σχέση με την προβλεπόμενη (λάθος γωνία)
 - εσφαλμένη κατατομή πάχους οδόντα (έκκεντρη ή λανθασμένη απόσταση κοπτικού)
- Απλά σφάλματα:
 - Βήμα (στον αρχικό ή στο βασικό κύκλο)
 - Πάχος οδόντα
 - Κατατομή
 - Εκκεντρότητα
- Η υπέρθεση των ανωτέρω σφαλμάτων αποτελεί το σύνθετο σφάλμα.

2.4.2) Rolling test method:

Αποτελεί μέθοδο μέτρησης του σύνθετου σφάλματος ενός οδοντωτού τροχού με την εμπλοκή του σε λειτουργία με έναν πρότυπο τροχό μεγάλης ακρίβειας. Για να προκληθεί μετρήσιμο φαινόμενο, παρέχεται η δυνατότητα στον έναν εκ των δύο τροχών να μετακινηθεί παράλληλα κατά τη διεύθυνση της νοητής ευθείας που διέρχεται από τα κέντρα των τροχών, υπό την επίδραση της απωστικής δύναμης που εμφανίζεται κατά τη σφικτή συνεργασία των δύο οδοντωτών τροχών. Σε αυτές τις συνθήκες, οποιεσδήποτε ανωμαλίες και γενικώς οποιαδήποτε απόκλιση από τη θεωρητικά προβλεπόμενη γεωμετρία του τροχού θα έχουν επίδραση στο μέγεθος της απωστικής δύναμης και συνεπώς θα προκαλέσουν αντιστοίχως δυσανάλογη στιγμιαία μετατόπιση του άλλου τροχού.

Τα δεδομένα καταγράφονται και κατόπιν επεξεργάζονται ώστε να καταταχθεί ο τροχός σε κάποια κατηγορία ποιότητας, σύμφωνα με τις προδιαγραφές.



Σχήμα 2.4.2Σ1: Εφαρμογή της μεθόδου «Rolling Test»

2.4.3) Σύστημα ταξινόμησης της ακρίβειας μετωπικών οδοντωτών τροχών βάσει των προδιαγραφών κατά AGMA:

Βάσει της προδιαγραφής ANSI/AGMA 2015, καθορίζεται η δομή του συστήματος ταξινόμησης της ακρίβειας μετωπικών οδοντωτών τροχών με κατατομή εξειλιγμένης. Το σύστημα ταξινόμησης της ακρίβειας με μέτρηση του σύνθετου σφάλματος, έχει διαφορετικά εύρη βαθμών ακρίβειας από το σύστημα που χρησιμοποιείται όταν είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις των απλών σφαλμάτων. Ακόμη, τα εύρη που αφορούν στην εξεταζόμενη διάμετρο αρχικού κύκλου και στο module είναι διαφορετικά.

Το σύστημα ταξινόμησης της ακρίβειας κατά AGMA είναι ένας αλφαριθμητικός κώδικας που αποτελείται από δύο μέρη: 1)έναν ακέραιο αριθμό που είναι ο βαθμός-επίπεδο ακρίβειας και 2)ένα γράμμα ως πρόθεμα, που υποδηλώνει την προδιαγραφόμενη των επιπέδων ακριβείας.

Όταν το πρόθεμα είναι το γράμμα *A*, το επίπεδο καθορίζεται από την προδιαγραφή ANSI-AGMA 2015-1-A01 και αφορά στο σφάλμα μετάδοσης, το γράμμα *B* υποδηλώνει καθορισμό του επιπέδου ακριβείας από την προδιαγραφή ANSI-AGMA 2009-B01 και αφορά στους κωνικούς οδοντωτούς τροχούς, και το γράμμα *C* είναι αυτό που καθορίζεται από την προδιαγραφή 2015-2-A06 και αφορά στα σύνθετα σφάλματα.

Το σύστημα ταξινόμησης της ακρίβειας με μέτρηση του σύνθετου σφάλματος αποτελείται από εννέα (9) βαθμούς ακρίβειας, που αφορούν στο ολικό σύνθετο σφάλμα

και στο σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα. Ο βαθμός C4 είναι αυτός που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ ο βαθμός C12 στη μικρότερη. Η βαθμονόμηση αυτή ισχύει για τα εξής εύρη.

Το επίπεδο ακρίβειας υπολογίζεται από την εξίσωση για το σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα(fid), και από την εξίσωση για το ολικό σύνθετο σφάλμα(Fid). Από αυτές τις εξισώσεις μπορούν να προσδιοριστούν τα όρια των βαθμών ακρίβειας, για κάθε διάμετρο και module που εξετάζονται, θέτοντας αντί του γράμματος C τις τιμές 4 έως 12 και εξάγοντας έτσι τις ανώτερες τιμές για το ολικό σύνθετο σφάλμα και το σύνθετο σφάλμα από οδόντα σε οδόντα, για κάθε βαθμό ακρίβειας.

Αν δεν έχουν προσδιοριστεί τα όρια των βαθμών ακρίβειας, και εισάγουμε στις παραπάνω σχέσεις τα μετρούμενα μεγέθη, υπολογίζουμε μία τιμή του C, που για να προσδιορίσουμε το βαθμό ακρίβειας του υπό εξέταση τροχού, θα πρέπει να την στρογγυλοποιήσουμε προς τα πάνω. Για παράδειγμα, αν έχουμε τροχό αρχικής διαμέτρου d=114mm και module 3mm, προκύπτουν για κάθε κατηγορία ποιότητας οι εξής ανώτερες τιμές των σύνθετων σφαλμάτων.

C=4 fid=3,21685 Fid=17,37099
C=5 fid=4,55000 Fid=24,57000
C=6 fid=6,43370 Fid=34,74198
C=7 fid=9,10000 Fid=49,14000
C=8 fid=12,86740 Fid=69,48396
C=9 fid=18,20000 Fid=98,28000
C=10 fid=25,73480 Fid=138,96792
C=11 fid=36,40000 Fid=196,56000
C=12 fid=51,47415 Fid=277,96041

Αν όμως λάβουμε μία μέτρηση, έστω για το ολικό σύνθετο σφάλμα με τιμή Fid=55,55555 και θέλουμε να καθορίσουμε το βαθμό ακρίβειας, επιλύοντας την εξίσωση ως προς C θα προκύψει C=7,35406. Η κατηγορία ποιότητας του τροχού θα είναι η C=8 καθώς σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται οι τροχοί με $49,14000 < \text{Fid} < 69,48396$ όπως φαίνεται από τις παραπάνω τιμές. Άρα χρειάζεται προσοχή στη στρογγυλοποίηση αν επιλέξουμε να εργαστούμε με αυτόν τον τρόπο.

Βιβλιογραφία:

- [1] Θ. Ν Κωστόπουλος- «Οδοντώσεις και μειωτήρες στροφών», Εκδόσεις Συμεών 1991
- [2] Γρηγοριάδης Μιχαήλ-«Μοντελοποίηση γεωμετρίας μετωπικών οδοντώσεων»,
Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.,
Ιούλιος 2003.
- [3] «Ποιοτικός έλεγχος οδοντωτών τροχών», Published in the internet
www.to4x4.gr/html/site/forum/viewtopic.php?p=53985&sid=cdd8e800375feeb27df4461ad3b7bf5a

Κεφάλαιο 3ο

Βλάβες οδοντωτών τροχών:

3.1) Αιτίες που προκαλούν τις βλάβες οδοντωτών τροχών:

Μερικές από τις αιτίες που προκαλούν την αστοχία των οδοντωτών τροχών είναι:

- Η σημειακή υπερφόρτιση των κατατομών, η οποία είναι το αποτέλεσμα κρουστικών φορτίων. Σαν αποτέλεσμα αυτής έχουμε την δημιουργία ραβδώσεων επί των κατατομών του οδοντωτού τροχού που απογυμνώνουν τον οδόντα.
- Η υπερβολική ταχύτητα περιστροφής (πέραν του επιτρεπτού): Το αίτιο αυτό ισχύει για μηχανισμούς, οι οποίοι δεν έχουν συστήματα μέτρησης και ελέγχου της ταχύτητας. Οι τροχοί αυτοί λοιπόν, είναι πιθανό να εργάζονται σε στροφές μεγαλύτερες του επιτρεπτού ορίου.
- Τα ξένα σωματίδια: Η ύπαρξη οιοδήποτε ξένου σωματιδίου στις συνεργαζόμενες κατατομές δημιουργεί επαφή στερεού με στερεό, η οποία προκαλεί τοπική συγκόλληση και φυσικά πρέπει να αποφεύγεται.
- Η ακατάλληλη θερμική κατεργασία: Οι οδόντες συνήθως υφίστανται επιφανειακή σκλήρυνση, η οποία όμως θα είναι ακατάλληλη αν το πάχος σκληρύνσεως προκύψει ανομοιόμορφο επί της επιφάνειας των οδόντων του τροχού.
- Η ακατάλληλη λίπανση στις οδοντώσεις: Γενικά στους οδοντωτούς τροχούς συνίσταται η χρήση λιπαντικού κατάλληλου για υψηλές πιέσεις, διότι η επαφή των κατατομών είναι συνήθως μόνο γραμμική. Το σύστημα λιπάνσεως, θα πρέπει να μπορεί να λιπάνει όλες τις θέσεις εργασίας, το δε λιπαντικό θα πρέπει να παραμείνει επί της κατατομής του οδόντος μέχρι την στιγμή της επαφής των κατατομών. Εάν κάτι τέτοιο δεν καθίσταται δυνατόν και η λειτουργία της βαθμίδας γίνεται χωρίς την χρήση του απαραίτητου λιπαντικού, τότε η λίπανση είναι ακατάλληλη. Μέσα από το λιπαντικό μεταφέρονται και τα ξένα σωματίδια για τα οποία αναφερθήκαμε προηγουμένως. Είναι απαραίτητο λοιπόν, το λιπαντικό φιλτράρεται και να είναι απαλλαγμένο από οιαδήποτε πρόσμιξη που αποτελεί απειλή για τα γρανάζια. Ακόμα, η θερμοκρασία του θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να απομακρύνει από τις θέσεις εργασίας των κατατομών το παραγόμενο, λόγω τριβής, ποσό θερμότητας.
- Η ακατάλληλη κατασκευή: Οι κατατομές των δοντιών πρέπει να έχουν κατασκευασθεί με ακρίβεια, τα δε fillets (πόδες) των οδόντων πρέπει να είναι τα προβλεπόμενα.
- Η ακατάλληλη συναρμολόγηση: Οι περισσότερες των περιπτώσεων που έχουν σχέση με την κακή συναρμολόγηση των οδοντωτών τροχών αναφέρονται παρακάτω:
 1. Χαλαρή πρόσδεση, των τροχών στους άξονες, των αξόνων στα ρουλεμάν ή των ρουλεμάν στο κέλυφος, μπορούν να προκαλέσουν μεταξύ των άλλων και δονήσεις από αζυγοσταθμία.
 2. Κακή ευθυγράμμιση.
 3. Λάθος απόσταση μεταξύ των κέντρων των συνεργαζόμενων τροχών → δημιουργία απρόβλεπτων δυνάμεων → εκδήλωση βλάβης στα γρανάζια. Η μελέτη και η κατασκευή μιας διάταξης, η οποία θα αυξομειώνει με μεγάλη ακρίβεια την απόσταση των κέντρων μεταξύ των οδοντωτών τροχών, έτσι ώστε να εξυπηρετείται η εναλλαξιμότητα μεταξύ των διάφορων συνεργαζόμενων γριναζιών (τα οποία θα έχουν υποστεί εξαρχής κάποιες «τεχνητές» βλάβες), τα

οποία θα χρησιμοποιηθούν στο πείραμα μας για την ανάλυση κραδασμών, αποτελεί και αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

- *Η κακή σχεδιομελέτη:* Στην κατασκευή των οδοντωτών τροχών, ο μελετητής θε πρέπει να ακολουθήσει την καλύτερη διαθέσιμη τεχνική για να εφοδιάσει τους τροχούς με ακριβή και κατάλληλα μεγέθη, όπως διάμετρο αρχικού κύκλου, πλάτος, υλικό και επιφανειακές κατεργασίες(π.χ θερμική). Πρέπει να μελετηθεί επίσης προσεκτικά, η εκλογή του κατάλληλου ζεύγους οδοντωτών τροχών και να γίνει λεπτομερής ανάλυση των δυνάμεων, πριν αρχίσει η διαδικασία κατασκευής του μηχανισμού.

3.2)Γενικά κριτήρια κακής λειτουργίας γρναζιών:

Είναι εύκολα κατανοητό ότι η καλή και αποδοτική λειτουργία μιας βαθμίδας οδοντωτών τροχών εξαρτάται από το αν λειτουργεί σύμφωνα(ή με μικρές ανοχές) ή όχι με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Αυτά είναι:

- *Η απώλεια ισχύος:* Η λόγω τριβής απώλεια ισχύος και η μετατροπή της σε θερμότητα είναι μια καλή ένδειξη για τον τρόπο λειτουργίας των τροχών. Αυτό το ποσό της θερμότητας μετράται και συγκρίνεται με το προυπολογισθέν. Η μετρηθείσα θερμότητα πρέπει να είναι μικρότερη ή το πολύ ίση με την προυπολογισθείσα για να λέμε ότι ο μηχανισμός λειτουργεί αποδοτικά.
- *Οι ταλαντώσεις:* Ένα κιβώτιο ταχυτήτων πρέπει να παράγει ταλαντώσεις μέσα σε προβλεπόμενα όρια. Η δυναμική ζυγοστάθμιση είναι από τις πρώτες ενέργειες που θα γίνουν για τα περιστρεφόμενα μέρη του κιβωτίου. Προβλήματα ταλαντώσεων μπορούν να δημιουργήσουν τα εξής:
 1. Ένας ελαστικός σύνδεσμος που κολλάει σε μια μη ζυγοσταθμισμένη θέση.
 2. Κατασκευαστικά σφάλματα ή λειτουργικά λάθη των κατατομών.
 3. Η κακή συναρμολόγηση ή ευθυγράμμιση των εξαρτημάτων του κιβωτίου.

Βεβαια, η καλή ή η κακή λειτουργία ενός στοιχείου μηχανής μπορεί να διαπιστωθεί με την βοήθεια των συστημάτων παρακολούθησης-μέτρησης, ύστερα (πάντα) από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις και παρακολουθήσεις. Τέτοιες μετρήσεις είναι:

-Μέτρηση των κρουστικών παλμών.

-Παρακολούθηση του επιπέδου δονήσεων-κραδασμών.

-Ανίχνευση βλαβών με θερμογράφηση.

-Μελέτη των ιδιοτήτων του λιπαντικού

-Μέτρηση των παραμέτρων της παραγωγικής διαδικασίας.

-Οπτική επιθεώρηση.

-Άλλες μη καταστροφικές τεχνικές δοκιμών.

Για την (ή τις) τεχνικές μέτρησης, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία θα υπάρξουν αναλυτικότερες επεξηγήσεις σε επόμενο μέρος.

3.3)Μορφές βλαβών οδοντωτών τροχών:

3.3.1)Κόπωση - γήρανση(μηχανική διάβρωση):

Η κόπωση προκύπτει από τις κλασικές δυνάμεις επαφής, δίνοντας μια βλάβη ως αποτέλεσμα της διαδικασίας καταπόνησης. Η διαδικασία περιγράφεται από τους παρακάτω τύπους, σύμφωνα με τους οποίους για γραμμική επαφή, π.χ. κυλίνδρου με κύλινδρο με φορτίο P' / μονάδα μήκους, η μέγιστη πίεση επαφής p_0 και το πλάτος ημι-επαφής b θα είναι:

$$p_0 = \left(\frac{P'E^*}{\pi R} \right)^{1/2}$$
$$b = 2 \left(\frac{P'R}{\pi E^*} \right)^{1/2}$$

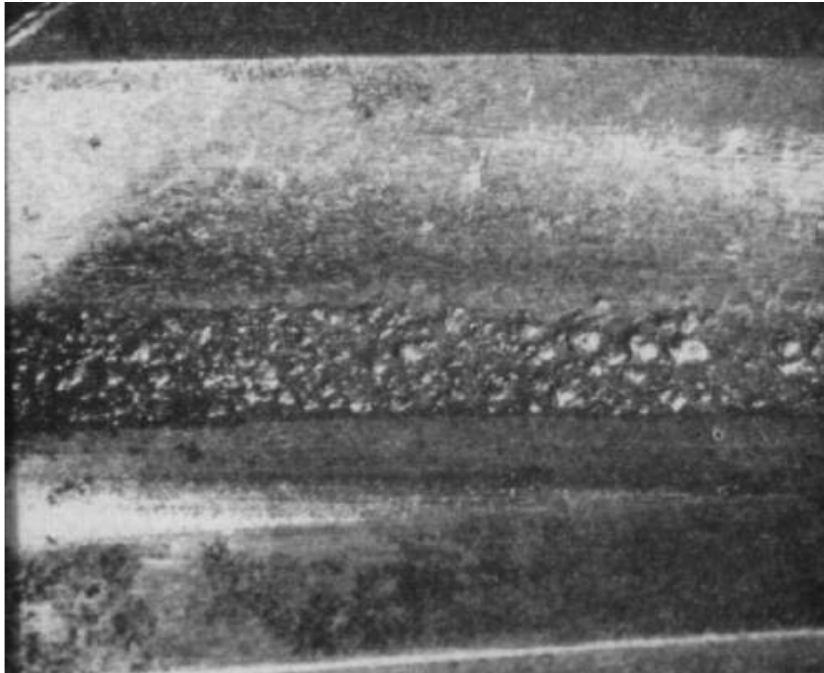
-Ενεργή πλευρά επαφής του οδοντωτού τροχού: $1/R = (1/R_1) + (1/R_2)$

Όπου: R_1 και R_2 είναι οι ακτίνες της καμπύλης επαφής.

-Συντελεστής επαφής: $(1/E^*) = (1-V_1^2)/(E_1) + (1-V_2^2)/(E_2)$

Όπου: E_1 , E_2 και V_1 , V_2 είναι οι σταθερές ελαστικότητας του Young και οι σταθερές Poisson αντίστοιχα και οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στα σώματα που έρχονται σε επαφή. Η μέγιστη τάση διάτμησης θα είναι τότε: $\tau_{\max}=0,300p_0$ για $\chi=0$, $z=0,79b$.

Αυτό οδηγεί σε μία μέγιστη τάση διάτμησης που παρατηρείται περίπου 0,5mm κάτω από την επιφάνεια και δίνει ρωγμές καταπόνησης, οι οποίες για την κλασσική μηχανική διάβρωση ταξιδεύουν αρχικά οριζοντίως και στην συνέχεια καμπυλώνονται προς τα πάνω προς την επιφάνεια. Όταν φτάσουν στην επιφάνεια, ένα ημισφαίριο ατσαλιού εκτονώνεται, αφήνοντας το κλασσικό λάκκο, ο οποίος είναι συνήθως διαμέτρου 1mm και βάθους 0,5mm.

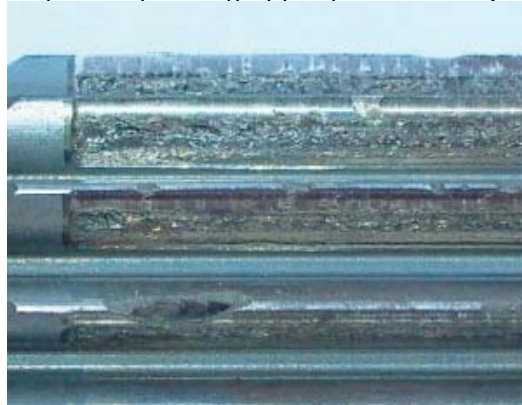


Σχήμα 3.3.1Σ1: Εμφάνιση εκκοιλάνσεων στην επιφάνεια ελικοειδούς οδοντωτού τροχού

Η απλή στατική θεωρία υποστηρίζει ότι η γήρανση θα είναι χειρότερη στα σημεία που οι τάσεις είναι μέγιστες, αφού, η ενεργή ακτίνα της καμπυλωτής πλευράς επαφής είναι μικρότερη όταν η επαφή είναι προς την βάση του οδοντωτού τροχού, όμως δεν είναι αυτό που στην πραγματικότητα συμβαίνει εδώ. Η μηχανική διάβρωση συμβαίνει αρχικά πολύ κοντά αλλά όχι ακριβώς πάνω στην διάμετρο του αρχικού κύκλου, όπου οι ταχύτητες ολίσθησης είναι χαμηλές. Δεν είναι τυχαίο πως κάποιες φορές, ιδιαίτερα σε γρανάζια που έχουν εργαστεί για πολλές ώρες, η περιοχή κοντά στην διάμετρο του αρχικού κύκλου είναι «μαυρισμένη». Κάτι τέτοιο βέβαια, μας προειδοποιεί ότι το γρανάζι χρήζει άμεσης αλλαγής. Σε περιπτώσεις όπου η συνεργαζόμενη βαθμίδα είναι λάθος ευθυγραμμισμένη σε μεγάλο βαθμό, η μηχανική διάβρωση θα συγκεντρωθεί στις περιοχές με υψηλό φορτίο. Το αποτέλεσμα είναι μια περιοχή στην οποία έχει απομακρυνθεί, ένα τμήμα του μετάλλου και ονομάζεται θρυμματισμένη. Το αν ο όρος «θρυμματισμένη» θα έπρεπε να χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό αυτής της εντοπισμένης περιοχής διάβρωσης είναι αμφισβητίσιμο, καθότι παλαιότερα χρησιμοποιούταν για την περιγραφή μιας αρκετά διαφορετικής βλάβης, κατά την οποία το «δέρμα», δηλαδή η επιφάνεια ενός ανεπαρκούς επανθρακωμένου νήματος αποφλοιωνόταν, δίνοντας ένα φαινόμενο που χαρακτηρίστηκε επίσημα ως διαχωρισμός μήτρας πυρήνα σύμφωνα με τον κανονισμό AGMA 1010. Η κόπωση φλοιδών της επιφάνειας που παρατηρείται μερικές φορές, είναι παρόμοια και μπορεί επίσης να προκαλείται από εσφαλμένη επανθρακωση.



Σχήμα 3.3.1Σ2: Τυπική βλάβη μηχανικής κόπωσης με την εμφάνιση μιας θρυμματισμένης περιοχής, πιθανότατα λόγω κακής ευθυγράμμισης—Labs, Dept. Mech. Engr., PoliMI



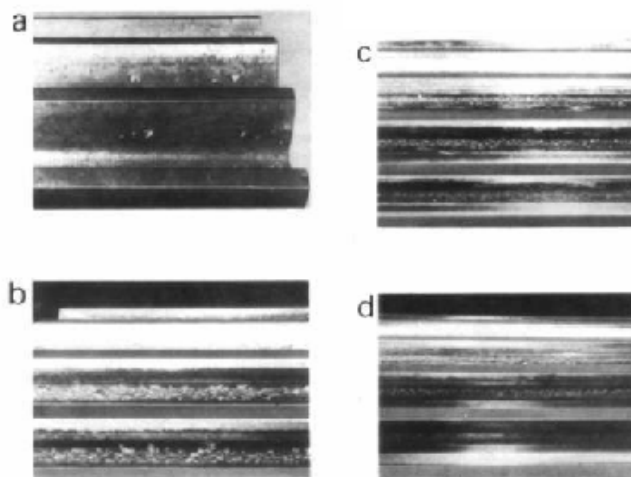
Σχήμα 3.3.1Σ3: Εκτεταμένη βλάβη γήρανσης—Labs, Dept. Mech. Engr., PoliMI



Σχήμα 3.3.1Σ4: Εκτεταμένη βλάβη γήρανσης στην επιφάνεια επαφής του δοντιού.

Η μηχανική διάβρωση εξαρτάται λοιπόν, από την τάση που ακείται στους οδόντες και αποτελεί γι αυτό τον λόγο μία σχετικά αργή διαδικασία (βλέπε σχήμα 2), η οποία στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν εξελίσσεται. Περιστασιακά τα φορτία είναι πολύ υψηλά για το υλικό και η διάβρωση προχωρεί και καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια του γκραναζιού, όμως ακόμα και σ αυτήν την περίπτωση υπάρχει μικρή πιθανότητα να παράγει θόρυβο που θα γίνει αντιληπτός από τις μετρήσεις μας, διότι οι παραγόμενες συχνότητες είναι πολύ υψηλές και τείνουν να ανακλώνται ή να απορροφώνται προτού φτάσουν στα σημεία όπου θα μπορούσαν να εκπέμψουν θόρυβο.

Έχει αποδειχθεί ότι τροχοί με μεγάλο module και μικρό αριθμό οδόντων έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να εμφανίσουν επιφανειακές εκκοιλάνσεις παρά να αστοχήσουν σε αντοχή της επικίνδυνης διατομής τους. Αντίθετα, οδοντωτοί τροχοί με μικρό module και μεγάλο αριθμό οδόντων κινδυνεύουν περισσότερο σε θραύση οδόντων παρά σε εμφάνιση εκκοιλάνσεων. Επομένως προς αποφυγή των εκκοιλάνσεων πρέπει να χρησιμοποιείται πιο παχύρευστο λιπαντικό, μικρότερο module που εξασφαλίζει μικρότερο ύψος ποδός και κεφαλής, μεγαλύτερος αριθμός οδόντων, και μικρότερη ταχύτητα. Επιβάλλεται και η χρήση καλύτερου υλικού με επιφανειακή κατεργασία.



Σχήμα 3.3.1Σ5: Α: δόντια γκραναζιού που δείχνουν σημάδια κόπωσης μετά από ένα μικρό διάστημα λειτουργίας. Β: Τα ίδια δόντια μετά από ένα χρόνο λειτουργίας. Γ: Κάποια βελτίωση δύο χρόνια μετά. Δ: Σχεδόν με λεία επιφάνεια 3 χρόνια μετά

Μπορούμε ακόμα, να αναφέρουμε χαρακτηριστικά και τους τρεις τύπους-στάδια εκκοιλάνσεων:

1. Οι αρχικές εκκοιλάνσεις: αυτές συνήθως εμφανίζονται σε θέσεις υψηλών συγκεντρώσεων τάσεως και οφείλονται σε τοπική φυσιολογική φθορά των επιφανειών(τοπικό γυάλισμα) δι' αφαιρέσεως ή εξομαλύνσεως αυτών των θέσεων υψηλών τάσεων.
2. Οι καταστρεπτικές εκκοιλάνσεις:Εδώ οι δημιουργούμενοι λάκκοι είναι πολύ μεγαλύτεροι από τους προηγούμενους και προκαλούν πάντοτε καταστροφή της κατατομής. Είναι φανερό ότι δεν υπάρχει ελπίδα επαναφοράς της κατατομής.
3. Οι εκκοιλάνσεις που δημιουργούν σμίλευση της κατατομής: είναι ουσιαστικά η ίδια φθορά με την προηγούμενη, μόνο που οι δημιουργούμενοι λάκκοι επί της επιφάνειας του οδόντος είναι πολύ μεγαλύτεροι. Μπορεί να θεωρηθεί ως το επόμενο βήμα των καταστρεπτικών εκκοιλάνσεων, εάν τα σωματίδια που δημιουργούνται από αυτές παρεμβληθούν ανάμεσα στις συνεργαζόμενες κατατομές.

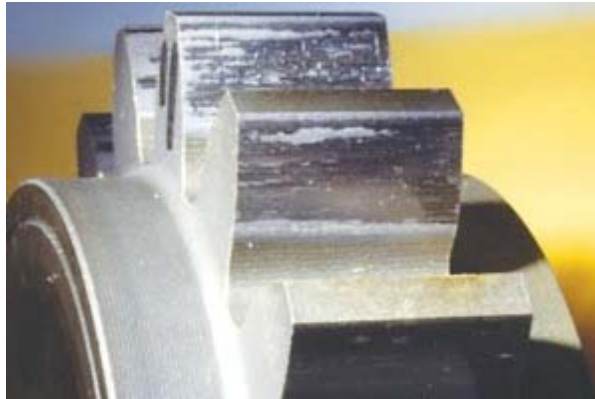
Όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως βασικές αιτίες για την εμφάνιση των εκκοιλάνσεων είναι η κακή ευθυγράμμιση και η τοπική υπερφόρτιση των οδοντωτών τροχών.

Συμπερασματικά λοιπόν, αναφέρουμε για την διάβρωση: Λόγω τοπικών πιέσεων με παρουσία λιπαντικού, εμφανίζονται στην περιοχή του κύκλου κυλίσεως(εκεί η ταχύτητα ολισθήσεως είναι πολύ μικρή) των τροχών οι λεγόμενες εκκοιλάνσεις, οι οποίες ευνοούνται από τα λεπτόρευστα λιπαντικά. Λόγω κοπώσεως του υλικού από τις υψηλές πιέσεις δημιουργούνται ρωγμές στην επιφάνεια του οδόντος, όπου εισέρχεται το λιπαντικό υπό μεγάλη πίεση. Με την πάροδο του χρόνου αυτές οι ρωγμές διευρύνονται. Η αστοχία επέρχεται όταν οι τροχοί που έχουν αναπτύξει επιφανειακές εκκοιλάνσεις στην κατατομή τους εργάζονται σε υψηλές ταχύτητες.

3.3.2)Μικροεκκοιλάνσεις που προκαλούν κόπωση και γήρανση:

Η μικροκόπωση (μερικές φορές καλείται και γκρι κηλίδα) έχει γίνει πιο σημαντική τελευταία, πιθανώς λόγω της μεγαλύτερης χρήσης γραναζιών με επιφάνεια που έχει υποστεί σκλήρυνση και των αλλαγών στις κατασκευαστικές τεχνικές. Έχει ομοιότητες με την συμβατική κόπωση, όμως, συμβαίνει σε πολύ μικρότερη κλίμακα αποστάσεων και σε ελαφρώς χαμηλότερα φορτία απ' αυτήν. Αντίθετα με την συμβατική κόπωση, τείνει να εξαπλώνεται και να προχωρεί. Μπορεί να ξεκινήσει οπουδήποτε πάνω στην πλευρική επιφάνεια του γραναζιού. Η έναρξη οφείλεται σε επαφές μεγάλων καταπονήσεων, οι οποίες μέσω δυνάμεων τριβής δημιουργούν τοπικά υψηλές πιέσεις μεταξύ των συνεργαζόμενων οδόντων, γεγονός που ενισχύει την διαδικασία. Διαφέρει από την συμβατική διάβρωση στο ότι, επειδή οι αναπτυσσόμενες καταπονήσεις είναι μικρές, με μεγέθη της τάξης των μm , τα πεδία πίεσης είναι πολύ εντοπισμένα ώστε τα δημιουργούμενα ανεπιθύμητα κοιλώματα είναι περισσότερο συγκρίσιμα σε μέγεθος με την επιφάνεια φινιρίσματος(η οποία μετρίεται σε μm), απ' ότι τα μετρούμενα σε mm πεδία καταπόνησης στην συμβατική διάβρωση. Το τυπικό βάθος ενός τέτοιου κοιλώματος είναι $20\mu\text{m}$. Η βασική προϋπόθεση για την έναρξη της μικροδιάβρωσης είναι το μέγεθος των ανωμαλιών της επιφάνειας(τραχύτητας) του οδόντα να είναι της ίδιας ή μεγαλύτερης τάξης μεγέθους με το πάχος του φιλμ λαδιού το οποίο είναι συνήθως της τάξης του $1\mu\text{m}$ ή λίγο μικρότερο. Η χρήση συνθετικών λαδιών σε υψηλές

θερμοκρασίες τείνει να μειώνει το πάχος του φιλμ λαδιού και έτσι αυξάνει την πιθανότητα μικροδιάβρωσης.

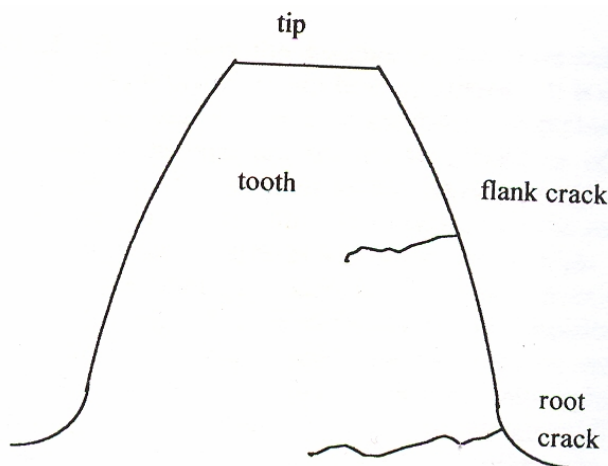


Σχήμα 3.3.2Σ1: Βλάβη μηχανικής μικροδιάβρωσης στην επιφάνεια δοντιού ενός δοκιμαστικού γραναζιού—FZG, TU Munchen, Germany

Σε ότι αφορά στον παραγόμενο θόρυβο, τα σχόλια που ισχύουν για την μηχανική διάβρωση είναι ακόμα πιο σχετικά. Η μέγιστη τραχύτητα των μικροανωμαλιών της επιφάνειας των οδοντωτών τροχών είναι τόσο μικρή, ώστε σε φυσιολογικές ταχύτητες περιστροφής η πλάτος των συχνοτήτων των μικροκοιλωμάτων είναι εκτός του ακουστικού εύρους, οπότε, ακόμη και αν οι δονήσεις μεταδίδονταν, αυτές δεν θα μπορούσαν να ακουστούν. Στην πράξη, δεν μπορούν να διαδοθούν μέσω των ρουλεμαν. Για την ώρα, παρόλο που υπάρχει σημαντικό ενδιαφέρον για την μικροδιάβρωση, οι πιο πρόσφατες δοκιμές πάνω στο αντικείμενο είναι του 1987 και έδειξαν ότι με την μετέπειτα λείανση της επιφανειάς του δοντιού ώστε η τραχύτητα επιφάνειας(περίπου $0,1\mu\text{m}$) να είναι μικρότερη του πάχους του φιλμ λίπανσης($0,4\mu\text{m}$) αυξάνεται η αντίσταση στην μικροδιάβρωση. Κάτι τέτοιο θα αύξανε τις συνθήκες πιθανής λειτουργίας στο όριο φυσιολογικής(αποδεκτής) διάβρωσης όπως καθορίζεται τις δυνάμεις επαφής. Δυστυχώς, οι συνήθεις κατεργασίες παραγωγής γραναζιών αφήνουν μια μάλλον τραχιά ποιότητα επιφανειάς, παράγοντας που ενθαρρύνει την μηχανική μικροδιάβρωση.

3.3.3)Δημιουργία ρωγμών:

Συνήθως οι ρωγμές δημιουργούνται στην βάση του οδοντωτού τροχού όπως φαίνεται στο σχήματα 3.3.3Σ1 και 3.3.3Σ2. Η ρωγμή ξεκινά από μία αυξημένη επιφανειακή τάση κάπου στην βάση του οδόντος, αρκετά μακριά από την εργαζόμενη πλευρά και αφού δημιουργηθεί εξελίσσεται ραγδαία, με αποτέλεσμα την τελική αποκόλληση ολόκληρου του τμήματος του δοντιού. Σε αντίθεση με τους ευθείς οδόντες, στα ελικοειδή δόντια δεν συνηθίζεται η αστοχία(η αποκόλληση ολόκληρου του δοντιού μετά το πέρας κάποιου χρονικού διαστήματος από την έναρξη της ρωγμής), αλλά είναι πιθανό να έχουμε αποκόλληση σε ποσοστό $1/3$ του πλάτους του δοντιού. Αυτή η μορφή βλάβης είναι πολύ σπάνια, καθότι το πιθανότερο είναι να είναι ραγδαία και καταστροφική. Λόγω της σοβαρότητας της βλάβης, ο σχεδιασμός πρέπει να μεριμνεί ώστε να αποφεύγεται. Σύμφωνα με την παραπάνω θεώρηση, η βλάβη που είναι πιθανότερο(-προτιμότερο) να εμφανιστεί μετά από πολλές ώρες λειτουργίας θα πρέπει να είναι η διάβρωση της πλευρικής επιφάνειας του οδόντος.



Σχήμα 3.3.3Σ1: Πιθανές θέσεις ανάπτυξης ρωγμών



Σχήμα 3.3.3Σ2: Έναρξη ρωγμής στην βάση του οδόντα

Οπότε, όταν παρουσιάζεται ρωγή στην βάση του οδόντος, σημαίνει ότι υπάρχει είτε ελαττωματικός σχεδιασμός, είτε πρόβλημα τοπικής υπερθέρμανσης.

Αυτό που προκαλεί έκπληξη είναι ότι πολλές φορές το σπάσιμο των δοντιών μπορεί να συμβεί και να μην γίνει αντιληπτό μέχρι να αποκαλυφθεί λόγω κάποιας βλάβης της μηχανής (run to failure) ή κάποιου άλλου γεγονότος που μπορεί να οδηγήσει στο ξεμοντάρισμα. Σε τέτοιες περιπτώσεις η βλάβη δεν μπορεί να γίνει αντιληπτή από τη δημιουργία θορύβου και ακόμα και συσκευές καταγραφής μπορεί να μην τον εντοπίσουν. Ο κύριος κίνδυνος είναι αν το σπασμένο δόντι επιχειρήσει να περάσει μέσα από το σημείο σύμπλεξης των άλλων οδόντων του γραναζιού και φρακάρει τον οδηγό. Οι ρωγμές μπορούν επίσης να δημιουργήσουν πρόβλημα όταν ξεκινούν πάνω στο μέσο της εργαζόμενης πλευράς, συνήθως κοντά στην γραμμή του βήματος οδοντώσεως επί του αρχικού κύκλου (pitch line). Η έναρξη σ αυτήν την περίπτωση φαίνεται να οφείλεται στις ρωγμές που δημιουργούν οι μικρο- και μακροσκοπικές διαβρώσεις, οι οποίες μπορεί να διακλαδώνονται προς τα κάτω, μέσα στο κύριο σώμα του δοντιού, αντί να διακλαδώνονται προς τα πάνω ώστε να δημιουργήσουν ένα κοίλωμα. Η τριβή κατά την επαφή φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο και αυτή με την σειρά της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες λίπανσης. Όπως και με την συμβατική ρωγή βάσης είναι πιθανό να δημιουργηθεί μικρός ή και καθόλου θόρυβος. Αναλυτικά στοιχεία για

την θραύση των υλικών, την δημιουργία ρωγμών και την διάδοση αυτών παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

3.3.4)Χάραξη:

Η χάραξη περιλαμβάνει «σκίσιμο» του φιλμ λαδιού ώστε η επαφή μετάλλου με μέταλλο κατά την συνεργασία των δοντιών(σχήμα 3.3.4Σ1,2), να δημιουργεί βίαιη σύντηξη και επακόλουθο αποχωρισμό και πλαστική ροή στις δύο συνεργαζόμενες επιφάνειες. Μπορεί επίσης να σχετίζεται με το ενδεχομένως πολύ μικρό πάχος του φιλμ λαδιού ή με την επιβολή μεγαλύτερων των επιτρεπτών τάσεων ή με μεγάλες ταχύτητες ολίσθησης μεταξύ των συνεργαζόμενων επιφανειών.

Η διαδικασία της χάραξης παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με την εισχώρηση μετάλλου κατά την λειτουργία των γραναζιών. Και τα δύο συνδέονται με επαφές καταπόνησης οι οποίες προκύπτουν από την αφαίρεση μετάλλου και η κύρια διαφορά τους εντοπίζεται στην έκταση του φαινομένου. Με τη εισχώρηση αφαιρούνται οι(μικρές) τραχύτητες και οι επιφάνειες γίνονται πιο λείες, ενώ με την χάραξη η ένταση είναι μεγαλύτερη και πραγματοποιείται σύντηξη(πλαστική ροή) μεταξύ των δύο τριβόμενων επιφανειών, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τραχύτητα της επιφάνειας. Το διαχωριστικό όριο μεταξύ των δύο διαδικασιών δεν είναι σαφώς καθορισμένο και μπορεί να εντοπιστεί μόνο πειραματικά μόνο με παρακολούθηση μέσω των κρουστικών παλμών Smith. Μια παρατηρούμενη πτώση των μετρούμενων κρουστικών παλμών καταδεικνύει μια ομαλή σύμπλεξη των γραναζιών, ενώ μια άνοδος καταδεικνύει χάραξη και οι συνθήκες θα πρέπει να μεταβληθούν άμεσα. Όταν η χάραξη των τριβόμενων επιφανειών οφείλεται σε έλλειψη λίπανσης, τότε είναι δυνατόν όχι μόνο να περιορίσουμε την φθορά, αλλά και να βελτιώσουμε τις επιφάνειες ώστε να αποκαταστήσουν την απροβλημάτιστη και πλήρη δυνατότητα μεταφοράς φορτίου. Σε μερικά γρανάζια τα οποία περιστρέφονται με χαμηλή ταχύτητα και με μεγάλο φορτίο, η χρήση ενός καλού λιπαντικού μπορεί να αποκαταστήσει επιφάνειες που είχαν προηγουμένως φθαρεί από ψυχρή χάραξη(απουσία ικανού λιπαντικού φιλμ).





Σχήμα 3.3.4Σ1,2: Σοβαρή χάραξη της επιφάνειας σε γρανάζια δοκιμών-FZG, TU Munchen, Germany

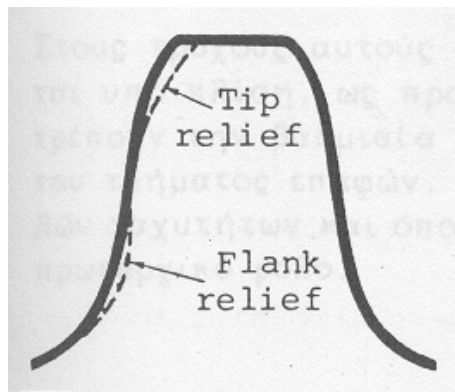
Όσον αφορά στον θόρυβο, μπορούμε να τονίσουμε τα εξής: Η εμφάνιση των αρχικών σταδίων της χάραξης δεν περιγράφεται από κάποιο γενικό κανόνα και εντοπίζεται κάθε φορά σε διάφορα πολύ μεμονωμένα σημεία του γραναζιού, οπότε δεν υπάρχει κάποια σχέση που να την συνδέει με συγκεκριμένες συχνότητες στην ακουστική κλίμακα. Οι κρουστικοί παλμοί οι οποίοι δημιουργούνται είναι σύντομοι, οπότε θα έπρεπε να δίνουν ένα θόρυβο παρόμοιο με αυτόν των ριτισμάτων, ή παρόμοιο με το θόρυβο που προκαλεί η μεμονωμένη φθορά σε ένα δόντι. Μόλις παρατηρηθεί μια σημαντική χάραξη η δόνηση μπορεί να ανιχνευτεί με ένα συμβατικό ταχύμετρο καταγραφής. Όμως, μέχρι τότε η φθορά θα έχει φτάσει σε προχωρημένο στάδιο.

3.3.5) Μετατροπές των κατατομών των οδόντων κατά την λειτουργία τους:

Κατά την μελέτη των συνεργαζόμενων κατατομών, θεωρείται ότι οι κατατομές διατηρούν το σχήμα τους τόσο κατά την κατασκευή τους όσο και κατά την λειτουργία τους. Όμως κατά την λειτουργία αναπτύσσονται σημαντικά φορτία που προκαλούν ελαστικές παραμορφώσεις επί των τροχών, οι οποίες προφανώς μεταβάλλουν το σχήμα των οδόντων. Έτσι, οι κατατομές παύουν να είναι συνεργαζόμενες γιατί δεν μπορούν να ακολουθήσουν τον βασικό νόμο οδντώσεως. Έχει αποδειχθεί ότι για μικρές φορτίσεις, μικρότερες των 20Kp ανά mm πλάτους του οδόντος, η παραμόρφωση του οδόντος είναι ασήμαντη για τα συνήθη υλικά κατασκευής οδοντωτών τροχών, και η μεταβολή των κατατομών θεωρείται αμελητέα. Για μεγαλύτερες φορτίσεις η παραμόρφωση των οδόντων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και να υπολογίζεται η ενδοτικότητα των συνεργαζόμενων οδόντων μέσω της οποίας βρίσκεται η απαραίτητη μετατροπή των κατατομών, για να μπορούν αυτές να είναι συνεργάσιμες κατά την λειτουργία τους.

Στις κατατομές των οδοντωτών τροχών γίνονται μετατροπές για να αποφύγουμε τις υποκοπές λειτουργίας, οι οποίες είναι αποτέλεσμα της ενδοτικότητας των διαφόρων εξαρτημάτων της βαθμίδας (των οδόντων, των ατράκτων, των εδράσεων και του κελύφους) που οφείλεται τόσο στα αναπτυσσόμενα φορτία όσο και στα κατασκευαστικά λάθη της επιφάνειας των κατατομών και του πάχους των οδόντων. Οι μετατροπές αυτές των κατατομών αποβλέπουν και στην εξομάλυνση των αδρανειακών φαινομένων στα ιδιάζοντα σημεία του τμήματος επαφών.

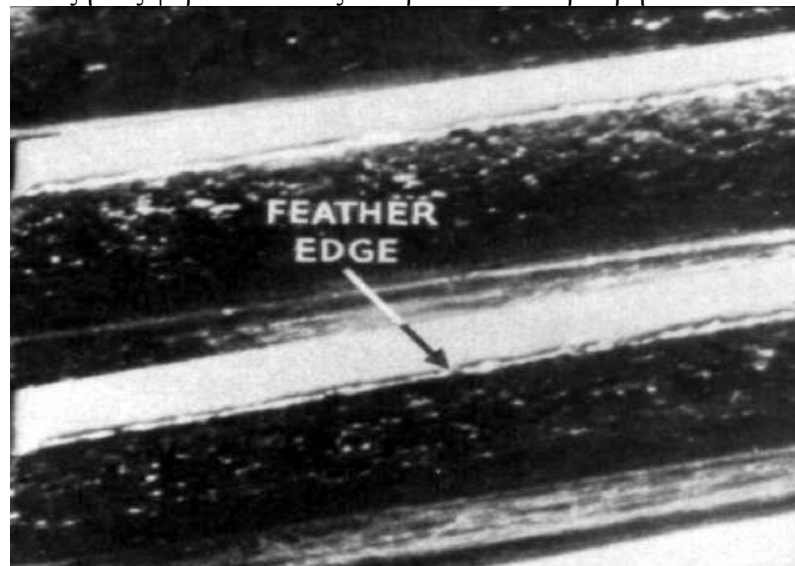
Εάν το πινιόν μιας βαθμίδας δεν έχει τοποθετηθεί στην θεωρητικά προβλεπόμενη θέση του(εξαιτίας λάθους κατασκευής του διακένου των οδόντων ή λόγω της ενδοτικότητας του ήδη εργαζόμενου οδόντος) τότε κάθε οδόντας του πινιόν εισέρχεται σε συνεργασία γρηγορότερα από την προβλεπόμενη στιγμή και σε σημείο του fillet του που αντιστοιχεί σε ακτίνα μικρότερη από την προβλεπόμενη. Κατ' αυτό τον τρόπο δημιουργούνται υποκοπές λειτουργίας και αναπτύσσεται δυναμικό φορτίο, τα οποία αυξάνουν την τάση στον πόδα του οδόντος και προκαλούν θόρυβο και ταλαντώσεις. Τα φαινόμενα αυτά εξαφανίζονται όταν αφαιρεθεί υλικό από την κατατομή του οδόντος τόσο στην περιοχή κεφαλής όσο και στην περιοχή ποδός. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια χαρακτηριστική μετατροπή μιας κατατομής(profile modification), η οποία περιλαμβάνει την ανακούφιση κεφαλής(tip relief) και την ανακούφιση ποδός(flank relief).



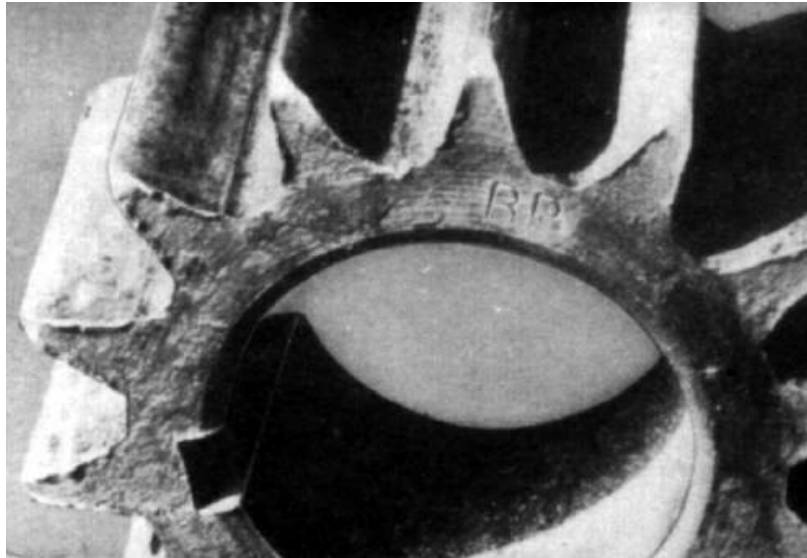
Σχήμα 3.3.5Σ1: Μετατροπή κατατομής(profile modification)

3.3.6)Υπερ-φορτίσεις:

Σε μερικούς σχεδιασμούς οδοντωτών τροχών κάνουμε μία βασική υπόθεση, ότι όπου υπάρχουν συγκεκριμένες παράλληλες οδεύσεις ισχύος, το φορτίο κατανέμεται ισόποσα μεταξύ των διαφόρων οδεύσεων. Εάν αυτή η υπόθεση δεν είναι σωστή, μπορεί να παρατηρηθούν αυξήσεις φορτίων ικανές να προκαλέσουν βλάβη.



Σχήμα 3.3.6Σ1: Δημιουργία κοφτερής ακμής στο κύκλο κεφαλής που μαρτυρά πλαστική ροή



Σχήμα 3.3.6Σ2: Υπερφορτωμένα «μαλακά» δόντια που μαρτυρούν πλαστική ροή του υλικού προς τα άκρα του δοντιού.



Σχήμα 3.3.6Σ3: Καταστροφή καμπτικής καταπόνησης ενός βιομηχανικού οδοντωτού τροχού λόγω μεγάλης διακύμανσης τάσης—FZG, TU Munchen, Germany

Αν τοποθετήσουμε ένα μετωπικό οδοντωτό τροχό με ευθείς οδόντες και 4 οδοντωτούς κινητήριους τροχούς, θα εξισορροπηθούν οι φορτίσεις των οδόντων αφού τα πινιόν θα έχουν ένα άξονα όδευσης με μεγάλη στρεπτική ευκαμψία. Το ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να επιτευχθεί και σ ένα γρανάζι τύπου πλανήτη ενός επικυκλικού μηχανισμού, με το να προσδώσουμε στον επικυκλικό μηχανισμό τα παρακάτω χαρακτηριστικά: ή με το να επιτρέψουμε στον ήλιο να κινείται κατά το δυνατόν ελεύθερος, ή να έχει εύκαμπτους άξονες στήριξης των πλανητών, ή τέλος μία εύκαμπτη στεφάνη. Η υπόθεση ότι ένας ελεύθερα κινούμενος ήλιος θα δίνει ίσα φορτία στις πλευρικές επιφάνειες του γραναζιού, θα ισχύσει μόνο εάν δεν υπάρχει καμία πλευρική συγκράτηση στον ήλιο, γιατί σε μία τέτοια περίπτωση μία ελαττωματική ή σφικτή έδραση θα μπορούσε να αυξήσει τα φορτία πάνω στους οδόντες με ανεπιθύμητα για εμάς αποτελέσματα. Σε μία περίπτωση μπορεί να εμφανιστεί πρόβλημα αζυγοσταθμίας.

Μια ακραία περίπτωση άνισης φόρτισης μπορεί να συμβεί σε μονταρίσματα υδραυλικών ανυψωτικών μηχανισμών, όπου μπορεί να υπάρξουν από 36 έως και 54 ηλεκτρικοί κινητήρες οι οποίοι θα εργάζονται σε παράλληλη διάταξη μέσω μειωτήρων στροφών, με σκοπό να ανυψώσουν ή να κατεβάσουν μέχρι και 20000tn. Κάτι τέτοιο

επιτυγχάνεται μέσω περιστρεφόμενων πινιόν τα οποία συμπλέκονται με κάθετους οδοντωτούς κανόνες.



Σχήμα 3.3.6Σ4: Δόντι που έσπασε λόγω επίδρασης στρεπτικής πίεσης αναστροφής. Οι ρωγμές καταπόνησης έχουν διαδοθεί προς το εσωτερικό εξίσου και προς τις δύο πλευρές.

Αυτό υποδηλώνει ότι το δόντι ανήκε προφανώς σε κάποιο ενδιάμεσο γρανάζι

Κατά τον σχεδιασμό των γραναζιών υποθέτουμε ότι τα φορτία είναι ίσα, όμως είναι σχετικά εύκολο να φανταστούμε συνθήκες κατά τις οποίες οι επιδράσεις των κατασκευαστικών λαθών(γίνεται αναφορά σ'άλλο σημείο της εργασίας). Οι επιδράσεις των κατασκευαστικών λαθών μπορούν να προκαλέσουν μια ανισορροπία, η οποία μπορεί να επιφέρει μέχρι και 50% αύξηση στο φορτίο μιας μεμονωμένης όδευσης ισχύος. Γι αυτό το λόγο, προτείνεται να σχεδιάζουμε έχοντας ως βάση ότι αυτό μπορεί να συμβεί, και να προνοούμε κατά την επιλογή των κινητήρων ώστε αυτοί να μην μπορούν να παράγουν υπερβολικά μεγάλη στρεπτική ροπή. Κάποιες φορές είναι δυνατόν να συμβαίνουν λάθη κατά την συνδεσμολογία με αποτέλεσμα ένας (ή περισσότεροι) μεμονωμένος κινητήρας από το συγκρότημα να οδεύει προς τα κάτω(σε αντίθετη φορά από τους υπόλοιπους), ενώ όλοι οι υπόλοιποι να οδεύουν σε αντίθετη φορά περιστροφής. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή της κατασκευής, όμως είναι αδύνατον να προνοήσουμε γι αυτό κατά τον σχεδιασμό. Δεν συνηθίζεται για τα ανισοκατανεμημένα φορτία να έχουν κάποια ηχητική επίδραση, οπότε μία μέτρηση θορύβου σ αυτήν την περίπτωση δεν μας βοηθάει να ανιχνεύσουμε την αζυγοσταθμία.

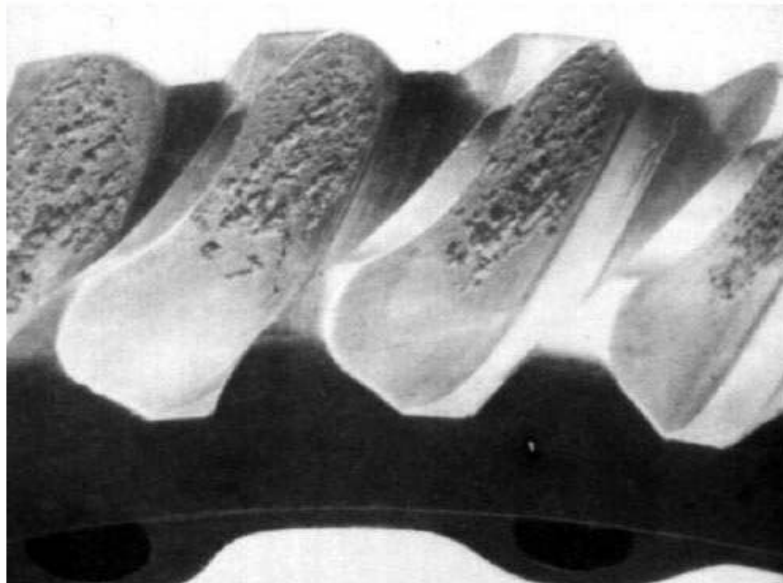
Γενικά θα πρέπει να ελέγχουμε στις πρόσφατα τοποθετημένες οδηγίες τα φορτία να είναι όπως τα προβλεπόμενα. Μία απλή μέθοδος για να κάνουμε αυτό το πείραμα είναι να μετρούμε κάθε φορά τα γενικά τεχνικά χαρακτηριστικά εξόδου του μηχανισμού μας, Αν διαπιστωθεί κάποια απόκλιση σ' αυτά(σε σχέση με τα αντίστοιχα θεωρητικά υπολογιζόμενα-όπως π.χ τις στροφές εξόδου), τότε πρέπει να ελέγξουμε μήπως αυτή οφείλεται σε κάποια από τις προηγούμενες βλάβες. Ένα άλλο σχετικά συχνό πρόβλημα, απαντάται στις βηματικές οδηγίες όπου υπάρχει ένας δρομέας ο οποίος περιστρέφεται με πολύ υψηλή ταχύτητα με μεγάλη ροπή αδρανείας. Το κιβώτιο ταχυτήτων του βηματικού κινητήρα υφίσταται πολύ υψηλή ροπή εκκίνησης(χαρακτηριστικό βηματικών κινητήρων), τάξεως ακόμα και 250% της ροπής σχεδιασμού, για ένα σημαντικό μεγάλο διάστημα χρόνου σε κάθε εκκίνηση, οπότε θα

αστοχήσει αν δεν σχεδιαστεί για την μέγιστη απαιτούμενη ροπή. Εάν δεν επιθυμούμε να σχεδιάσουμε το κιβώτιο ταχυτήτων για την μέγιστη απαιτούμενη ροπή, μπορούμε εναλλακτικά να χρησιμοποιήσουμε έναν κινητήρα ομαλής εκκίνησης με μειονέκτημα σ αυτήν την περίπτωση τον μεγαλύτερο χρόνο ανάπτυξης της επιθυμητής ροπής.

3.3.7)Υπερθέρμανση:

Η ψύξη των κιβωτίων ταχυτήτων αποτελεί σπάνια πρόβλημα για τα μικρά μεγέθη καθ ότι το εμβαδόν επιφάνειας σε σχέση με την ισχύ είναι μεγάλο. Όσον αφορά στα μεγάλα μεγέθη, υπάρχει συνήθως ένα εξωτερικό(πρόσθετο) σύστημα ψύξης για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του λαδιού.

Η υπερθέρμανση μπορεί να συμβεί όταν βασιζόμαστε στην φυσική μετάδοση θερμότητας αλλά η παραγωγή θερμότητας είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη. Ένας τυπικός μονοβάθμιος μειωτήρας στροφών με συντελεστή μείωσης περίπου 5/1 και είσοδο 1450rpm θα έχει στροφές εξόδου περίπου 290rpm. Στον τροχό που θα περιστρέφεται με 290rpm, θα περιορίζεται η κυκλοφορία του λαδιού, καθ ότι μόνο ένα μέρος του λαδιού περνά μέσα στο ψυχόμενο λάδι. Η φυσική μετάδοση θερμότητας μπορεί να απάγει θερμική ισχύ της τάξης του 1kW/m^2 περίπου και συνήθως αυτό είναι αρκετό. Η εισαγωγή μιας επιπλέον βαθμίδας στο κιβώτιο ταχυτήτων δεν θα προκαλέσει προβλήματα υπερθέρμανσης, αν τα επιπλέον επιπλέον γρανάζια και ρουλεμάν περιστρέφονται με μικρή ταχύτητα, όμως εάν προστεθεί ένας άξονας μεγάλης ταχύτητας, οι απώλειες λόγω της μεγάλης ανατάραξης του λαδιού θα είναι μεγάλες και το λάδι θα είναι ανεπαρκές. Σ αυτήν την περίπτωση είναι αναγκαίο να μειώσουμε το επίπεδο λαδιού για να εμποδίσουμε την μεγάλη του ανατάραξη και να προσθέσουμε ψυκτικό spray το οποίο θα κατευθύνεται προς τα δόντια του γραναζιού. Η χειρότερη περίπτωση εντοπίζεται όταν έχουμε έναν άξονα ο οποίος περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα σε συνδυασμό με ρουλεμάν με μπίλλιες και επιφάνειες οδοντωτών τροχών πλήρως εμβαπτισμένες στο λάδι.

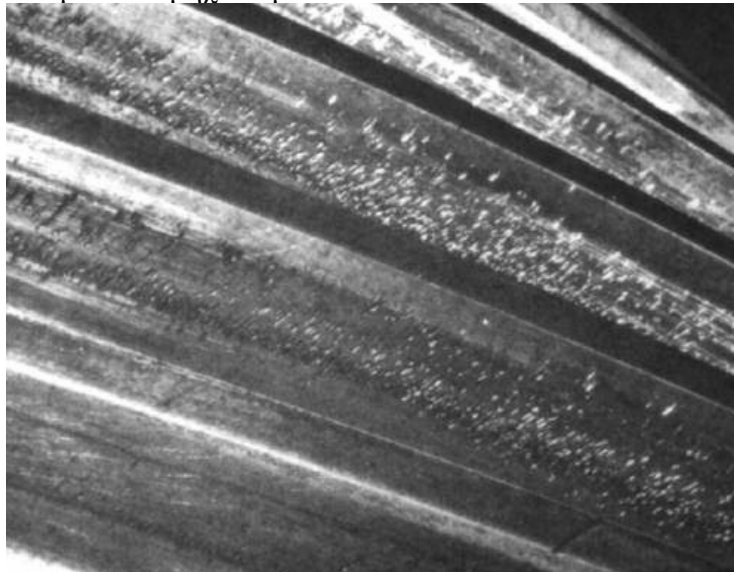


Σχήμα 3.3.7Σ1: Ατέρμονας κοχλίας που παρουσιάζει διάβρωση καταπόνησης μετά από παρατεταμένη χρήση. Η διάβρωση τείνει να συμβαίνει κυρίως προς το μέτωπο εκφυγής, όπου η θερμοκρασία είναι υψηλότερη.

Σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής, η χρήση εξωτερικά ψυκτικού spray θα μειώσει την θέρμανση των γραναζιών, όμως τότε ελλοχεύει ο κίνδυνος υπερθέρμανσης των ρουλεμάν με μπίλλια, εκτός αν αυτά είναι καλά αποστραγγισμένα ώστε να μην περιστρέφονται γεμάτα με λάδι το οποίο θα παραμένει στις επιφάνειές τους καθότι αυτό δημιουργεί μεγάλη παραγωγή θερμότητας. Πολλές φορές ένας σχεδιαστής μπορεί να απασχολείται πολύ με το να εισάγει ψυκτικό λάδι σ ένα ρουλεμάν, με αποτέλεσμα να τροφοδοτεί το ρουλεμάν με μεγαλύτερες ποσότητες λαδιού απ αυτές που μπορούν να εξαχθούν. Σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να χρειάζεται σύστημα ψύξης δια ψεκασμού λαδιού ώστε να υπάρχει επαρκής ψύξη χωρίς τόσο μεγάλη ποσότητα λαδιού.

3.4) Ανίχνευση ξένων σωματιδίων:

Η ανίχνευση ξένων σωματιδίων είναι μια από τις παλαιότερες τεχνικές που χρησιμοποιούμε για να πάρουμε κάποια ένδειξη σχετικά με την βλάβη. Τα μαγνητικά πώματα (έλκουν τα ρινίσματα σιδήρου) υπήρξαν περιορισμένης χρήσης γιατί χρησιμοποιούνταν μόνο όταν ήταν προγραμματισμένη μια αλλαγή λαδιών. Οι μοντέρνες τεχνικές καταμέτρησης σωματιδίων είναι πολύ αποτελεσματικές στο να δίνουν ακριβείς ποσοτικούς υπολογισμούς της κατάστασης του λαδιού και πρέπει να χρησιμοποιούνται αν τα ρουλεμάν του μειωτήρα φέρουν βαριά φορτία οπότε και είναι πολύ ευάλωτα στις ακαθαρσίες ή στα ξένα σωματίδια που υπάρχουν στο λάδι. Άλλωστε, γνωρίζουμε ότι οι δύο παραπάνω αιτίες είναι από τις κυριότερες που συμβάλλουν στην πρόωρη καταστροφή των ρουλεμάν των μηχανισμών.



Σχήμα 3.4Σ1: Σκληρά ξένα σωματίδια (ρουπαντές) στο λάδι προκαλούν την ενσωμάτωση σωματιδίων στην επιφάνεια των δοντιών

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για ξένα σωματίδια παρουσιάζονται με την μορφή σωματιδίων που μετριώνται σε 100ml λαδιού και οι περιεκτικότητες εμφανίζονται απρόσμενα υψηλές (Πίνακας 3.4ΠΙ). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες εκδοχές, όμως για τα γρανάζια και για τα ρουλεμάν με μπίλλια οι δύο μορφές που χρησιμοποιούνται είναι για αριθμό σωματιδίων μεγαλύτερων από 5 μ m και για αριθμό σωματιδίων μεγαλύτερων των 15 μ m αντιστοίχως. Τα νούμερα δεν δίνονται απ ευθείας αλλά ταξινομούνται σε μία τυποποιημένη δυαδική κλίμακα.

Ένα καινούργιο, καθαρό(από ξένα σωματίδια) λάδι, θα αναμέναμε αφελώς να μην περιέχει σωματίδια, όμως στην πράξη μπορεί να του ανιχνεύσουμε μέχρι και 200000 / 7000, οπότε θα το ταξινομούσαμε στην κατηγορία 18/13. Μερικές φορές χρησιμοποιούνται 3 μορφές και σ αυτήν την περίπτωση η πρώτη είναι για την καταμέτρηση σωματιδίων μεγαλύτερων των 2 μm, οπότε δεν μας ενδιαφέρει στην ανάλυση μας για τις βλάβες στους οδοντωτούς τροχούς.

Έχει ενδιαφέρον να συγκρίνουμε τις περιοχές μεταξύ των 5 και 15μm με το αναμενόμενο πάχος φιλμ λαδιού, οι οποίες κυμαίνονται από μικρότερες του 1μm σε ένα ρουλεμάν με μπίλλια έως 3 ή 4μm σε ένα γρανάτζι μεσαίου μεγέθους με μικρό φορτίο. Οι μετρήσεις των σωματιδίων ταξινομούνται σε ομάδες σύμφωνα με το ISO4406. Αυτές είναι:

Ξένα σωματίδια σε 100ml λιπαντικού			Κατηγορία
500000	to	1000000	20
250000	to	500000	19
130000	to	250000	18
64000	to	130000	17
32000	to	64000	16
16000	to	32000	15
8000	to	16000	14
4000	to	8000	13
2000	to	4000	12
1000	to	2000	11
500	to	1000	10
250	to	130	9
130	to	250	8
64	to	130	7
32	to	64	6

Πίνακας 3.4Π1: Κατηγοριοποίηση με βάση τον αριθμό των ξένων σωματιδίων που βρίσκονται μέσα στο λιπαντικό.

Οι κατασκευαστές ρουλεμάν συνήθως υποστηρίζουν ότι 18/14 είναι μια επαρκής καθαρότητα για ένα λάδι, οπότε θεωρητικά μία ποιότητα(όσον αφορά την καθαρότητα) λαδιού καλύτερη της προηγούμενης θα ήταν οκ.

Δυστυχώς, για να είμαστε σε θέση να χρησιμοποιήσουμε τα ρουλεμάν με μπίλλια στο ονομαστικό τους φορτίο, η θεωρούμενη ως επαρκής θεωρητική καθαρότητα είναι κατά πολύ μικρότερη της πραγματικά απαιτούμενης καθαρότητας και υπάρχει ανάγκη να πετύχουμε πολύ καλύτερα επίπεδα. Η FAG υποστηρίζει ότι απαιτείται 14/11 όμως χρειάζεται καλύτερη καθαρότητα αν οι ρυπαντές έχουν αποκολλητικές ιδιότητες(όπως αυτές της άμμου). Οι εργασίες που έχουν γίνει στην SKF καταδεικνύουν ότι για τα ρουλεμάν με μπίλλια, τα ξένα σωματίδια με αναμενόμενη υψηλή σκληρότητα θα προκαλούν φθορές στο κανάλι κύλισης των μπιλλιών όταν το μέγεθος των σωματιδίων θα ξεπερνά τα 5μm. Κάτω απ αυτό το μέγεθος φαίνεται ότι οι ελαστικές παραμορφώσεις των επιφανειών των μπιλλιών μπορούν να συγκρατήσουν τα ξένα σωματίδια χωρίς να μειώσουν την διάρκεια ζωής των ρουλεμάν. Η SKF υποστηρίζει ότι για την μέγιστη δυνατή διάρκεια οι ρυπαντές θα πρέπει να είναι συγκρίσιμοι σε μέγεθος με το πάχος του φιλμ λαδιού, όμως αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να υπάρχουν πολύ λίγα ξένα σωματίδια μεγαλύτερα του 1μm. Η INA επίσης προτείνει, ότι για την μεγαλύτερη δυνατή

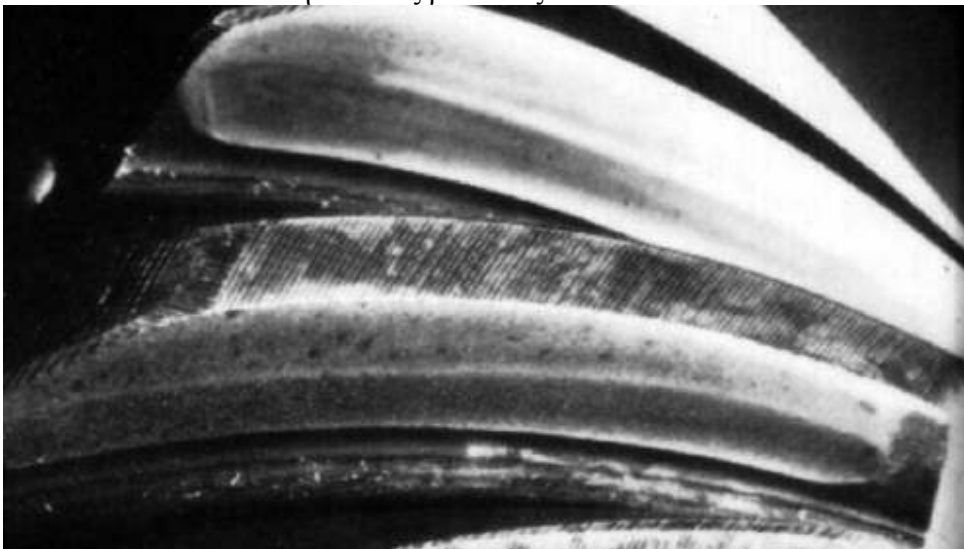
καθαρότητα λαδιού, τα μεγέθη των σωματιδίων θα έπρεπε να είναι μικρότερα από το πάχος του φιλμ λαδιού. Η συνήθης βιομηχανική πρακτική είναι να χρησιμοποιούμε αυτό που οι κατασκευαστές ρουλεμάν θεωρούν επαρκές με αρνητικές σ αυτήν την περίπτωση για την διάρκεια ζωής.

Υπάρχει και ένα ακόμη πρόβλημα για τον χρήστη του κιβωτίου ταχυτήτων και αυτό έγκειται στο ότι δεν υπάρχει κάποια απ'ευθείας σύνδεση μεταξύ των τεχνικών προδιαγραφών του φίλτρου και της πραγματοποιούμενης πραγματικής μέτρησης του αριθμού των σωματιδίων μέσα στο κιβώτιο ταχυτήτων.

Στην πράξη η μόνη αξιόπιστη λύση είναι η καταγραφή της περιεκτικότητας του λαδιού σε σωματίδια. Μετά από την προσθήκη μιας ποσότητας καθαρού λαδιού(18/13) στο σύστημα, η περιεκτικότητα σε σωματίδια θα έπρεπε να πέσει στο 14/11 τουλάχιστον ή και ακόμα χαμηλότερα και τότε να σταθεροποιηθεί. Αν παρατηρηθεί οποιαδήποτε αύξηση απαιτείται η αλλαγή του φίλτρου και πιθανώς ένας έλεγχος για την προέλευση των ξένων σωματιδίων.

Τα φιλμ λαδιού για τις επαφές των γραναζιών είναι πιο παχιά από τα αντίστοιχα των ρουλεμάν με μπίλλιες, οπότε θα έπρεπε να είναι λιγότερο ευπαθή στους ρυπαντές, όμως επειδή τα γρανάζια εμφανίζουν και κάποια ολίσθηση αντί για την ιδανική καθαρή κύλιση, έχουν την τάση να εμφανίζουν γρατζουνιές στις πλευρικές επιφάνειες των δοντιών. Αυτό σημαίνει ότι μερικές φορές είναι ευκολότερο το να εντοπίσουμε τα ξένα σωματίδια σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων παρατηρώντας τις γρατζουνιές στις κατατομές των γραναζιών, απ το να προσπαθήσουμε να εντοπίσουμε την βλάβη από τα ξένα σωματίδια που μπορεί να βρίσκεται σ ένα σημείο όχι εύκολα προσβάσιμο.

Στις περιπτώσεις που έχουμε παχιά φιλμ λαδιού, όπως συμβαίνει στα απλά ρουλεμάν ή στα ρουλεμάν με μπίλλιες τα οποία δεν περιστρέφονται με υψηλές στροφές και δεν φέρουν μεγάλα φορτία, το ρουλεμάν το κρίσιμο μέρος και η συσσώρευση ξένων σωματιδίων θα εμφανιστεί ως στιλβωτικός παράγοντας(βλέπε σχήμα 3.4Σ2) φθοράς στις πλευρικές επιφάνειες των οδόντων. Αυτός είναι ο κύριος τρόπος με τον οποίο συμβαίνει η φθορά στα κωνικά ελικοειδή γρανάζια τα οποία έχουν υψηλές ταχύτητες ολίσθησης και γι αυτό είναι πολύ ευαίσθητα στους ρυπαντές.



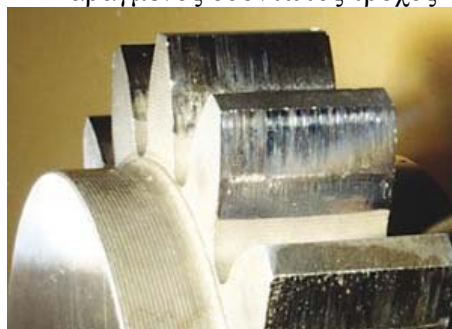
Σχήμα 3.4Σ2: Επιφάνεια δοντιών γραναζιού που έχουν υποστεί λείανση λόγω της παρουσίας λεπτών τραχέων σωματιδίων στο λιπαντικό λάδι

Το να εξετάσουμε τους διάφορους μηχανισμούς βλάβης και την πιθανή επίδρασή τους στην ρύπανση του λαδιού δεν είναι ενθαρρυντικό. Η ρωγμή στην βάση του δοντιού παράγει ένα μεγάλο κομμάτι, το οποίο στην καλύτερη περίπτωση θα πέσει στον πάτο της θήκης του κιβωτίου και δεν θα κινηθεί, οπότε δεν θα υπάρξει και καμία ένδειξη στην ανάλυση ρυπαντών, είτε πρόκειται για χημική είτε για σωματιδιακή καταμέτρηση. Η διάβρωση (μακροσκοπική) από την άλλη παράγει λίγα, σχετικά μεγάλα σε μέγεθος και σε σχήμα ημισφαιρίου σωματίδια, τα οποία δεν θα εμφανιστούν στην καταμέτρηση σωματιδίων και συνήθως παραμένουν στον πάτο της δεξαμενής ή στην λεκάνη αποστράγγισης του λαδιού. Η χάραξη θα περιμέναμε να παράγει κάποια λεπτά ξένα σωματίδια, τα οποία θα έπρεπε να είναι ανιχνεύσιμα, όμως μόνο η μικροδιάβρωση θα παρήγαγε μεγάλες ποσότητες από σχετικά λεπτά σωματίδια ρυπαντών.

Το συμπέρασμα είναι ότι η φθορά της επιφάνειας(λόγω των ξένων σωματιδίων) και η μικροδιάβρωση θα αυξήσουν τις καταμετρήσεις σωματιδίων, όμως οι υπόλοιποι μηχανισμοί φθοράς θα έχουν μικρή επίδραση. Οποιαδήποτε συσχέτιση μεταξύ των ρυπαντών και του θορύβου είναι αδύνατη καθ' ότι οι συνήθεις ρυπαντές είναι μικροί σε μέγεθος οπότε δίνουν παλμούς που είναι πολύ υψηλής συχνότητας ώστε δεν μπορούν να ακουστούν και συμβαίνουν με ασυνεχή τρόπο. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται δύο φωτογραφίες στην μία εκ των οποίων έχει συμβεί φθορά και στην άλλη χάραξη. Συγκρίνοντας αυτές τις δύο φωτογραφίες βγάζουμε κάποιο μικρό συμπέρασμα ως προς τον γεωμετρικό τύπο των σημείων της επιφάνειας του οδόντα στην οποία συνήθως συμβαίνει καθεμία από τις προαναφερθείσες βλάβες.



Χαραγμένος οδοντωτός τροχός



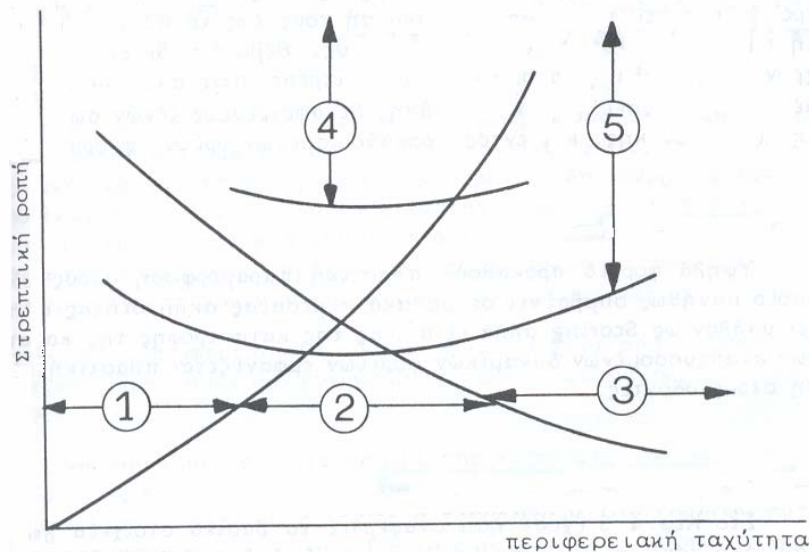
Φθαρμένος οδοντωτός τροχός

Σχήμα 3.4Σ3,4: Μία σύγκριση μεταξύ ενός φθαρμένου ως προς την ιδανική γεωμετρία και ενός χαραγμένου οδοντωτού τροχού. Η χάραξη εντοπίζεται σε περιοχές που αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις λόγω τριβών. Σε καμία περίπτωση η χάραξη δεν εμφανίζεται στην διάμετρο του αρχικού κύκλου, στην οποία έχουμε καθαρή ολίσθηση. Από την άλλη πλευρά η φθορά λαμβάνει χώρα σ' όλο το ύψος του οδόντα ακόμα και πάνω στην διάμετρο του αρχικού κύκλου—FZG, TU Munchen, Germany

Το πιο ευαίσθητο σύστημα καταγραφής ρυπαντών για μικρά σωματίδια που έχει απαντηθεί μέχρι στιγμής είναι η χρήση κρουστικών παλμών Smith για την ανίχνευση των σωματιδίων που περνούν μέσα από το φίλτρο. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ εξεζητημένη για την χρήση στα κοινά κιβώτια ταχυτήτων του εμπορίου και δεν γίνεται να χρησιμοποιηθεί λόγω της πειραματικής της πολυπλοκότητας.

3.5)Εξακρίβωση του τύπου φθοράς ενός γραναζιού μέσω ενός διαγράμματος Στρεπτικής ροπής-Περιφερειακής ταχύτητας:

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει τις διάφορες περιοχές στρεπτικής ροπής, συναρτήσει της περιφερειακής ταχύτητας του αρχικού σημείου κυλίσεως, όπου οι οδοντωτοί τροχοί αστοχούν ή όχι.



Διάγραμμα 3.5Δ1: Περιοχές αστοχίας οδοντωτού τροχού

Η φθορά συνίσταται στις περιοχές 1, 2 και 3.

Περιοχή 1: Ο τροχός δεν έχει αρκετή ταχύτητα για να διατηρήσει το στρώμα λιπαντικού μέχρι την θέση επαφής της κατατομής.

Περιοχή 2: Είναι η ασφαλής περιοχή λειτουργίας. Η ταχύτητα είναι αρκετή για να υπάρξει στρώμα λιπαντικού στις θέσεις εργασίας των κατατομών. Η διάρκεια ζωής των τροχών είναι απεριόριστη, εφόσον φυσικά το λιπαντικό είναι απαλλαγμένο από σωματίδια και χημικά αντιδραστήρια. Οι οδοντωτοί τροχοί πρέπει να σχεδιάζονται για να εργασθούν σ' αυτήν την περιοχή.

Περιοχή 3: Εδώ συμβαίνει ταχύτατη φθορά επιφανείας(scoring), που οφείλεται σε συνδυασμό υψηλών φορτίων με υψηλές ταχύτητες, τα οποία καταστρέφουν το στρώμα λιπαντικού στις θέσεις επαφής.

Αναφέρονται εδώ και άλλες δύο περιοχές, όπως η περιοχή 4, όπου τα φορτία είναι πάρα πολύ υψηλά και επέρχεται θραύση(breakage) των οδόντων και η περιοχή 5, όπου εμφανίζεται κόπωση(pitting) των κατατομών.

Τέλος πρέπει να αναφέρουμε ότι οι οδοντωτοί τροχοί δεν πρέπει να φορτίζονται με το πλήρες φορτίο τους από την πρώτη στιγμή της λειτουργίας τους. Η τεχνική των οδοντωτών τροχών απαιτεί την σταδιακή φόρτισή τους έως το πλήρες φορτίο και έως την μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας τους. Βέβαια, η διαδικασία αυτή είναι χρονοβόρα, αλλά η αργοπορία αυτή επιτρέπει στις συνεργαζόμενες κατατομές να «γυαλίσει» η μία την άλλη,

δι' αφαιρέσεως ξένων σωματιδίων μέσω της φυσιολογικής, και εντός προκαθορισμένων ορίων, φθοράς τους.

3.6)Σύνδεσμοι μετάδοσης κίνησης:

Οι σύνδεσμοι μετάδοσης φαίνονται καταρχήν να είναι ένα ασήμαντο μέρος του συστήματος, όμως κάποιες φορές μπορούν, όχι μόνο να φθαρούν τα ίδια, αλλά να προκαλέσουν βλάβες και σε άλλα μέρη του μηχανισμού.

Ο σχεδιασμός για τους συνδέσμους τύπου ατσαλένιου διαφράγματος είναι ευθύς, καθ' ότι η ακαμψία του συνδέσμου, αξονικά και στον λυγισμό, θα πρέπει να δίνεται στο έντυπο πώλησης, οπότε είναι εύκολο να προβλέψουμε ποιες τάσεις θα ασκηθούν στα φορτία κάθε πλευράς. Τα αξονικά φορτία χρειάζεται να επιτρέπουν όχι μόνο λάθη στην συναρμολόγηση, αλλά και επεκτάσεις λόγω διαφορικών θερμικών διαστολών.

Οι σύνδεσμοι τύπου ελαστικού μπλοκ χρησιμοποιούνται ευρέως σε μικρούς μηχανισμούς, αφού μπορούν να διορθώσουν κάποιες μόνιμες αποκλίσεις των αξόνων, καθώς και τις λανθασμένες γωνιακές ευθυγραμμίσεις, έτσι ώστε να χρειάζεται μόνο ένας σύνδεσμος, αντί για δύο που χρειάζονται με τους συνδέσμους τύπου διαφράγματος. Το αντίστοιχο μειονέκτημα είναι ότι, παρόλο που το μπλοκ κατά την λειτουργία παραμορφώνεται ώστε να αντισταθμίσει την μόνιμη απόκλιση, ασκείται μια σημαντική πλάγια δύναμη η οποία μπορεί να καταπονήσει τους άξονες κατά τον λυγισμό. Εάν το αξονικό μήκος είναι επαρκές ώστε να καταλάβει το διάκενο του συνδέσμου, μπορεί να προκύψει ένα μάλλον ασυνήθιστο πρόβλημα λόγω των θερμικών φαινομένων. Τα μεταλλικά(ή πλαστικά) χυτά μπορούν σε τέτοια περίπτωση να παραλάβουν έντονες αξονικές φορτίσεις και να δημιουργήσουν βλάβες στα ρουλεμάν του κινητήρα ή της εισόδου του κιβωτίου ταχυτήτων.

Οι εδράσεις του οδοντωτού τροχού είναι μικρές και ελαφριές και μπορούν να υποστούν μεγάλες στρεπτικές ροπές για αυτό και είναι δημοφιλείς στους μηχανισμούς υψηλής ισχύος. Είναι ωστόσο ικανές να ασκήσουν σημαντικές ροπές λυγισμού στους άξονες που τις στηρίζουν.

Κατά τον λυγισμό του άξονα μπορεί να δημιουργηθεί πρόβλημα από την λάθος ευθυγράμμιση ενός πινιόν, ή του τροχού ήλιου ενός πλανητικού μηχανισμού και έτσι να επηρεαστεί η ασκούμενη τάση στο γρανάζι με την αύξηση των συντελεστών κατανομής φορτίου C_m και K_m . Αν λόγω αυτού κάποιο γρανάζι λυγίσει και το φορτίο είναι άνισα κατανεμημένο κατά μήκος του πλάτους της επιφάνειας το σφάλμα μετάδοσης μπορεί να αυξηθεί και να δώσει μεγαλύτερο θόρυβο.

3.7)Θραύση των υλικών:

3.7.1)Θραύση ενός τέλει υλικού:

Ας δούμε λοιπόν πως σπάει ένα τέλει υλικό. Θεωρούμε ένα συμπαγές κομμάτι υλικού, ύψους h και με επιφάνεια διατομής A , το οποίο εφελκύεται από μια δύναμη F . Το συμπαγές αυτό κομμάτι χωρίζεται σε δύο ίσα τμήματα, όταν τα άτομα του εφελκύνονται πέρα από το σημείο θραύσης. Για να υπολογίσουμε την δύναμη F_b που χρειάζεται για να φτάσουμε σ αυτό το σημείο, ανατρέχουμε στο συντελεστή του Young Y , ο οποίος συσχετίζει την τάση σ που ασκείται στην επιφάνεια ενός σώματος με την επιμήκυνσή του δη μέσα από την σχέση:

$$\sigma = F/A = (\delta h/h) Y$$

Ας υποθέσουμε ότι το σώμα διασπάται όταν τα άτομα απομακρύνονται κατά 20% της αρχικής τους απόστασης. Τότε, η κρίσιμη τάση $\sigma_c = Y/5$.

Όπως εύκολα παρατηρούμε από απλή αριθμητική αντικατάσταση, η θεωρητική δύναμη όπως υπολογίζεται από την παραπάνω εξίσωση είναι περίπου διπλάσιας τάξης μεγέθους από την πραγματική δύναμη. Αν και είναι φυσικό να μην λαμβάνουμε υπόψη αυτήν την διαφορά μεταξύ των δύο μετρήσεων, αφού αυτές οφείλονται στις μεγάλες στρογγυλοποιήσεις που κάνουμε προκειμένου να φτάσουμε σ αυτήν την εξίσωση, γίνεται μεγάλη προσπάθεια να φτάσουμε σε μια πιο ακριβή ποσοτικά εκδοχή των υπολογισμών για να δείξουμε ότι η εκτίμηση του μεγέθους είναι στην πραγματικότητα αρκετά καλή και το σφάλμα εντοπίζεται αλλού.

3.7.2)Θραύση ενός πραγματικού υλικού:

Τα ελαττώματα των υλικών καθορίζουν την τάση θραύσης, οπότε είναι αναγκαίο να προχωρήσουμε -αντίθετα με ότι κάνουμε στα ιδανικά υλικά – να δώσουμε την μεγαλύτερη προσοχή στα ελαττώματα αυτά (σύμφωνα με τον Inglis). Αν θεωρήσουμε ένα μεγάλο έλασμα από μεταλλικό υλικό με μία οπή σε σχήμα έλλειψης και ασκήσουμε μονοκατευθυνόμενη τάση εφελκυσμού, σ , μακριά από την οπή, παρατηρούμε ότι οι τάσεις γύρω από τις δύο άκρες της έλλειψης είναι πολύ μεγαλύτερες από τις σ κατά ένα παράγοντα $2(1/\rho)^{1/2}$, όπου l είναι το μήκος της οπής και ρ η ακτίνα καμπυλότητάς του. Όπως ένας κεραυνός δημιουργεί τεράστια ηλεκτρικά πεδία, έτσι και μία οπή ή οποιαδήποτε ασυνέχεια στο υλικό δημιουργεί τεράστια τάση γύρω από τα άκρα αυτής. Εφόσον μία ασυνέχεια είναι αρκετά λεπτή, είναι δυνατόν να αποτελεί «απειλή» θραύσης για το τεμάχιο κι ας μην είναι ιδιαίτερα μεγάλη.

3.7.3)Δυναμική ρωγμών:

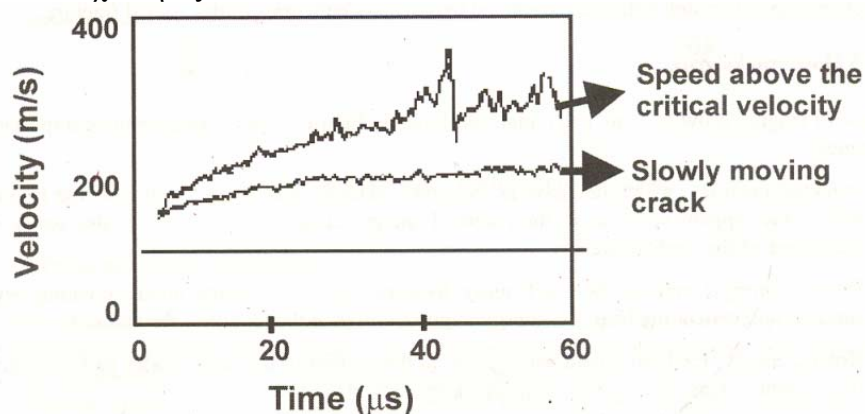
Οι ρωγμές δεν θα αποτελούσαν πρόβλημα αν δεν επεκτείνονταν. Γι αυτό το λόγο είναι φυσικό να μελετάμε με λεπτομέρεια την δυναμική τους. Ιστορικά, οι πρώτοι υπολογισμοί σχετικά με αυτό το θέμα διεξήχθησαν από τον Neville Motte, κατά την έρευνα των καταστροφών στις συγκολλήσεις του πλοίου Liberty κατά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο. Η έρευνα αυτή οδήγησε σε μία εξαιρετικά επιτυχημένη θεωρία διαβάθμισης. Η θεωρία αυτή ανταποκρίθηκε πολύ καλά στις αυξημένες απαιτήσεις που προέκυψαν από την εξέλιξη των μαθηματικών. Το μοναδικό της μειονέκτημα ήταν ότι δεν συμφωνούσε ποτέ με τα πειράματα! Όλες οι εξισώσεις κίνησης για την ρωγμή προέβλεπαν ότι οι ρωγμές θα έπρεπε να επιταχύνονται μέχρι την ταχύτητα του ηχητικού κύματος που ταξιδεύει πάνω από επίπεδη επιφάνεια, ή των σεισμών που ταξιδεύουν πάνω από την επιφάνεια της γης. Πειράματα που χρονολογούνται από το 1937 και μετά έδειξαν ότι οι ρωγμές στο γυαλί ταξίδευαν στην μέγιστη περίπτωση στην μισή αυτής της ταχύτητας. Για ένα πεδίο στο οποίο ο κύριος σκοπός είναι να αποφύγουμε γεγονότα όπως ο

«κομματιασμός» στα δύο ενός μεγάλου τανκερ, το ερώτημα πόσο γρήγορα μπορεί να ταξιδέψει μια ρωγμή κατά μήκος ενός οδόντα μοιάζει να μην απασχολεί παρά μόνο τους μυημένους. Εάν όμως, ο στόχος είναι μία βαθιά κατανόηση των συνθηκών υπό τις οποίες μπορεί να κινηθεί μία ρωγμή, το να υπολογίσουμε την ταχύτητα είναι ένα απαραίτητο πρώτο βήμα. Μία ένδειξη ότι η κίνηση της ρωγμής μπορεί να είναι πιο πολύπλοκη από την κίνηση των σωματιδίων σε ευθείες γραμμές προκύπτει από την εξέταση των νέων επιφανειών που δημιουργούν ρωγμές. Οι επιφάνειες αυτές συχνά έχουν ορατά τραχιά χαρακτηριστικά τα οποία αποκτούν μόνο αφού η ρωγμή έχει καλύψει κάποια απόσταση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 8. Μερικά χρόνια πριν οι Swinney και Gross ανέπτυξαν μια τεχνική που μας έδινε την δυνατότητα να μετρήσουμε την ταχύτητα μιας ρωγμής 20 εκατομμύρια φορές το δευτερόλεπτο, δεκάδες χιλιάδες φορές στην σειρά, και με ακρίβεια περίπου 20 m/ sec. Η μέθοδος περιελάμβανε την τοποθέτηση ενός πολύ λεπτού στρώματος αλουμινίου πάνω σε plexiglass ή δείγμα γυαλιού και κατόπιν την καταγραφή της αντίστασης του καθώς το διέτρεχε μια ρωγμή. Η μεγάλη λεπτομέρεια στις πληροφορίες από τα πειράματα σε μεγάλα δείγματα εύθραυστων υλικών στα οποία είχε σημειωθεί μία χαρακιά στην μία τους πλευρά, έδειξε καθαρά ότι η κίνηση της ρωγμής σε τέτοια υλικά μπορούσε να χωριστεί σε 3 διακριτές φάσεις που περιγράφονται παρακάτω:

Δημιουργία: Μακριές, αιχμηρές, αρχικές χαρακίες μετατρέπονται ραγδαία σε ρωγμές υπό την επίδραση χαμηλών τάσεων, ενώ οι μικρές, αμβλείες χαρακίες αρνούνται να προχωρήσουν προτού η πυκνότητα της ενέργειας από την τάση αυξηθεί έως και κατά δέκα φορές. Πάντως σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις οι ρωγμές επιταχύνονται μέσα σε λιγότερο από ένα msec με ρυθμό που αποτελεί ένα σημαντικό κλάσμα της ταχύτητας του ήχου, τουλάχιστον με 200 m/sec.

Ανάπτυξη: Οι πρώιμες φάσεις της κίνησης της ρωγμής περιλαμβάνουν ήρεμη και επαρκή πρόοδο κατά μήκος του δείγματος. Οι νέες επιφάνειες που μένουν πίσω μετά τη διέλευση της ρωγμής είναι λείες και μοιάζουν με καθρέφτες. Η ταχύτητα της ρωγμής αυξάνεται ομαλά και αργά, όπως φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα 3.7.3Σ1.

Κρίση: Οι ρωγμές που ξεπερνούν ένα κρίσιμο στάδιο στην ταχύτητα ξεκινούν να εκτινάσσονται και μετά να βυθίζονται όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.. Κατά την δημιουργία τους αφήνουν εξαιρετικά τραχιές επιφάνειες και οι τραχύτητες τους κυματίζουν σε συχνότητες εκατοντάδων kHz.



Σχήμα 3.7.3Σ1: Ανάπτυξη ρωγμής σε ένα εύθραυστο υλικό(plexiglass)

Οι ρωγμές ταξιδεύουν διαφορετικά ανάλογα με την δύναμη με την οποία δημιουργούνται(παραπάνω σχήμα). Για σχετικά μικρές δυνάμεις, οι ρωγμές ταξιδεύουν ομαλά και αργά σε σχέση με τον χρόνο. Πέρα από μία κρίσιμη ταχύτητα οι ρωγμές

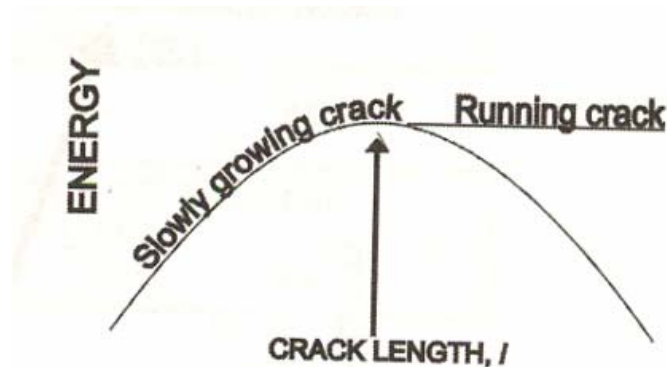
κινούνται με μεγάλη διακύμανση στην ταχύτητά τους. Οι ρωγμές που κινούνται αργά αφήνουν μία λεία επιφάνεια. Η διάδοση ρωγμών σε ταχύτητες μεγαλύτερης της κρίσιμης αφήνουν πίσω τους ένα σύνολο από μικρές διακλαδώσεις που διεισδύουν στο εσωτερικό της επιφάνειας.

Γι αυτό το λόγο οι ρωγμές σε εύθραυστα υλικά διέπονται από μία δυναμική αστάθεια, η οποία τις εμποδίζει να επιταχύνουν μέχρι τις υψηλές ταχύτητες που προβλέπονται από τις κλασσικές θεωρίες δυναμικής θραύσης.

3.7.4) Τρόπος διάδοσης των ρωγμών:

Οι ρωγμές μήκους l διαδίδονται σε ένα έλασμα με ταχύτητα v . Στο φαινόμενο αυτό συμμετέχουν τρεις σημαντικές ενέργειες:

- Δυναμική ενέργεια: Αυτή η ενέργεια αυξάνει όσο η ρωγμή επιμηκύνεται και όσο το μέγεθος της περιοχής στην οποία αυτή (η ρωγμή) συμβαίνει αυξάνεται κατά l^2 . Η δυναμική ενέργεια που απελευθερώνεται αυξάνεται κατά $-l^2$ δηλαδή επίσης αυξάνεται κατά το τετράγωνο της ασκούμενης τάσης.
- Ενέργεια θράυσης: Το να διαδοθεί η ρωγμή, απαιτεί το «σπάσιμο» δεσμών, την δημιουργία νέων επιφανειών και την παραγωγή θερμότητας. Αυτές οι ενεργειακές απαιτήσεις κλιμακώνονται κατά l .
- Κινητική ενέργεια: Η ολική κινητική ενέργεια που οφείλεται στην κίνηση της ρωγμής κλιμακώνεται κατά $l^2 v^2$ καθότι η ποσότητα της μάζας που κινείται καθώς ανοίγει η ρωγμή κλιμακώνεται κατά l^2 .



Σχήμα 3.7.4Σ1: Το μήκος της ρωγμής ως συνάρτηση της ενέργειας

Για ρωγμές που κινούνται πολύ αργά, σημασία έχουν μόνο η δυναμική ενέργεια και η ενέργεια θράυσης και το άθροισμα αυτών των ενεργειών είναι συνάρτηση του l που έχει την μορφή του σχήματος 3.7.4Σ1.

Αφού η δυναμική ενέργεια μειώνεται κατά l^2 και η ενέργεια θράυσης αυξάνεται κατά l , για πολύ μικρές ρωγμές η ενέργεια θράυσης είναι πάντοτε μεγαλύτερη και η συνολική ενέργεια αυξάνεται κατά l . Αυτό είναι ένα ευνοϊκό γεγονός, διαφορετικά όλα τα στερεά αντικείμενα στην πράξη θα ήταν εντελώς ασταθή υπό την επίρροια ακόμη και της μικρότερης μηχανικής τάσης. Όμως τελικά η δυναμική ενέργεια υπερβαίνει την ενέργεια θράυσης στο μήκος κρίσιμης ρωγμής l_c το οποίο καλείται σημείο Griffith και πέρα του οποίου απελευθερώνεται μεγαλύτερη ενέργεια απ αυτή που καταναλώνεται για την επιμήκυνση της ρωγμής. Τώρα η επιμήκυνση είναι ραγδαία. Εφόσον το άθροισμα της δυναμικής ενέργειας και της ενέργειας θράυσης μειώνεται κατά $(l - l_c)^2$ για $l > l_c$ και η

ενέργεια διατηρείται μέσω της μετατροπής της δυναμικής ενέργειας σε κινητική μπορεί κάποιος εύκολα να υπολογίσει ότι η ταχύτητα της ρωγμής θα πρέπει να είναι:

$$V(t) = V_{\max} (1 - (l_c / l))$$

Η κρίσιμη δύναμη που χρειάζεται για τον διαχωρισμό ενός σώματος με ρωγμή μεγέθους l , κλιμακώνεται κατά $l^{-1/2}$. Όπως και με τα αποτελέσματα πολλών άλλων αμφιλεγόμενων μεθόδων διαβαθμίσεως, η παραπάνω εξίσωση προκύπτει καλύτερη απ' ό,τι κανείς θα ανέμενε. Κάτι τέτοιο άλλωστε διαπιστώθηκε και από τα 15 χρόνια συστηματικής μαθηματικής εργασίας του Freund.

3.6.5) Διάδοση ρωγμής στην βάση του οδόντα:

Σύμφωνα με τους ισχύοντες νόμους της γραμμικής ελαστικής θραύσης, το πεδίο τάσης στην άκρη της ρωγμής περιγράφεται πλήρως από τον παράγοντα έντασης της τάσης. Λόγω της πολύπλοκης κατανομής του φορτίου και της γεωμετρίας του οδόντα, ο παράγοντας έντασης τάσεως για μια υποτιθέμενη ρωγμή μπορεί να υπολογιστεί μόνο με αριθμητικές μεθόδους. Η εμπειρία στις δοκιμές των μηχανικών ιδιοτήτων θραύσης του υλικού του γραναζιού έδειξε ότι ένα πάχος γραναζιού (gear thickness) 28mm επιτρέπει να θεωρήσουμε ότι πρόκειται για επίπεδη εντατική κατάσταση. Η αξιοπιστία της μηχανικής γραμμικής ελαστικής θραύσης καταγράφεται μόνιμα ελέγχοντας το μέγεθος της ζώνης διαρροής σε σύγκριση με το απολυτο μήκος της ρωγμής. Αν και η συμπεριφορά της δομής δεν είναι πλέον γραμμική όταν εμφανίζονται πλαστικές ζώνες γύρω από την άκρη της ρωγμής επιτρέπεται να εφαρμόσουμε τις αρχές της μηχανικής γραμμικής ελαστικής θραύσης, εφόσον το μέγεθος της ζώνης διαρροής είναι περιορισμένο. Εάν η αναλογία ω/a υπερβαίνει το 0,4 απαιτείται ένα άλλο κριτήριο θραύσης αφού ο παράγοντας έντασης τάσης χάνει την εγκυρότητά του (ω : μέγεθος της ζώνης διαρροής στην κατεύθυνση που διαδίδεται η ρωγμή και a : μήκος ρωγμής). Ο καταλληλότερος συνδυασμός για τον υπολογισμό του «μονοπατιού» διάδοσης της ρωγμής, της ταχύτητας και του παράγοντα έντασης τάσης σε σχέση με το βάθος της ρωγμής, αποδείχτηκε ότι είναι το πρόγραμμα BERSAFE το οποίο χρησιμοποιεί μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Αυτός ο συνδυασμός περιλαμβάνει την μέθοδο εικονικής επιμήκυνσης ρωγμής (VCE). Για την προ και μετά κατεργασία χρησιμοποιήθηκε το πακέτο προγραμμάτων I-DEAS το οποίο περιέχει εγκαταστάσεις για αυτόματη παραγωγή πλεγμάτων και έγχρωμες παρουσιάσεις τάσεων, μετατοπίσεων κ.λ.π το οποίο διευκόλυνε πολύ την δουλειά. Το ονομαστικό φορτίο (F_b) τοποθετήθηκε στο ψηλότερο σημείο επαφής μονού ζεύγους. Υποθέσαμε ότι η αρχική ρωγμή έγινε στο σημείο της μεγαλύτερης εφελκυστικής τάσης στην επιφάνεια της ρίζας του δοντιού με αρχική ανάπτυξη κάθετη στην επιφάνεια. Η κατεύθυνση της διάδοσης της ρωγμής σε κάποιο τυχαίο σημείο καθορίστηκε σύμφωνα με την υπόθεση ότι η ρωγμή αναπτύσσεται προς την κατεύθυνση του μεγαλύτερου παράγοντα έντασης τάσης. Η επέκταση του μετώπου της ρωγμής καθορίστηκε αρχικά στα 0,2mm και αργότερα αυξήθηκε στα 0,5mm. Οι παραμένουσες τάσεις προσομοιώθηκαν με θερμικά φορτία φορτίζοντας τους μεμονωμένους κόμβους με κατάλληλες θερμοκρασίες. Αυτή η προσομείωση έδωσε αποτελέσματα ίσα με αυτά που θα είχαν προκύψει αν χρησιμοποιούσαμε παραμένουσες τάσεις όπως του εφαρμοζόμενου συστήματος φορτίου. Εφαρμόζοντας την μέθοδο VCE, καθορίσαμε αρχικά τον ρυθμό απελευθέρωσης της δυναμικής ενέργειας G . Αυτή η τιμή στην συνέχεια μετασχηματίστηκε στον παράγοντα έντασης τάσης. Υποθέτουμε ότι ολόκληρη η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται στον παράγοντα έντασης τάσης πραγμα που ανταποκρίνεται στο πρώτο στάδιο ανοίγματος ρωγμής.

Βιβλιογραφία:

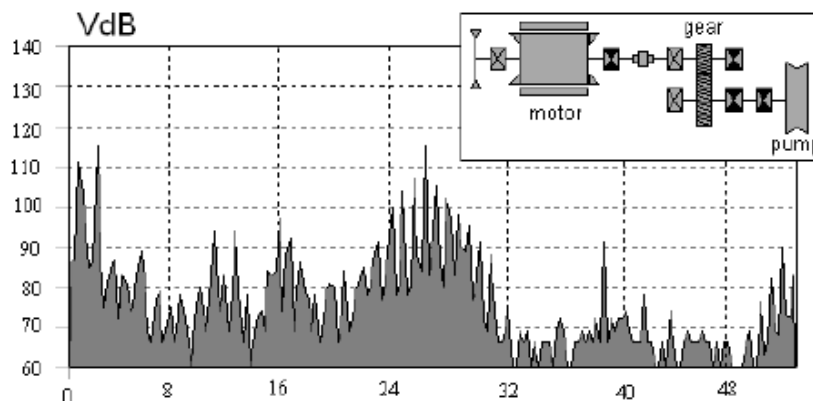
- [1] B. Abersek and J. Flaker,- «How gears break» Published by WITpress, 2004
- [2]Θ. Ν Κωστόπουλος- «Οδοντώσεις και μειωτήρες στροφών», Εκδόσεις Συμείων 1991
- [3]J.Derek Smith-«Gear noise and vibration»,Second Edition
- [4] «Φωτογραφίες καταστροφών σε οδοντωτούς τροχούς», Published in the internet
www.tribology.co.uk
- [5] «Φωτογραφίες καταστροφών σε οδοντωτούς τροχούς», Published in the internet
<http://machinedesign.com>

Κεφάλαιο 4ο

Είδη παραγόμενων συχνοτήτων από τους οδοντωτούς τροχούς:

4.1)Εισαγωγή στη συχνότητα εμπλοκής γραναζιών(GMF):

Η συχνότητα εμπλοκής γραναζιών, που επίσης καλείται συχνότητα εμπλοκής δοντιών, είναι η συχνότητα κατά την οποία τα δόντια των γραναζιών εμπλέκονται μεταξύ τους. Ισούται με τον αριθμό των δοντιών του γραναζιού επί την περιστροφική ταχύτητα της ατράκτου. Υπάρχουν πολλά κιβώτια ταχυτήτων στα οποία το πλάτος της συχνότητας εμπλοκής γραναζιών είναι τόσο μικρό που δεν είναι ορατό στο φάσμα συχνοτήτων. Όταν ένα πρόβλημα του γραναζιού ή ένα πρόβλημα μετάδοσης επηρεάζει την συχνότητα εμπλοκής γραναζιών(GMF), το πλάτος μπορεί να γίνει σημαντικό. Εάν υπάρχει πρόβλημα στο γρανάτζι το οποίο δεν επηρεάζει την σύμπλεξη(π.χ έναρξη ρωγμής), μπορεί να μην δημιουργηθούν μεγαλύτερα πλάτη στην GMF. Τα μεγαλύτερα πλάτη στην GMFυποδεικνύουν ένα πρόβλημα στην εμπλοκή των γραναζιών. Η αιτία γι αυτό το πρόβλημα στην σύμπλεξη μπορεί να ταυτοποιηθεί με την ανάλυση του φάσματος συχνοτήτων και του χρονικού σήματος.



Σχήμα 4.1Σ1: Πλευρικές ζώνες γύρω από την GMF

Οι χαρακτηριστικές συχνότητες εμπλοκής των οδοντωτών τροχών (GMF) συνήθως αναγνωρίζονται εύκολα αλλά ερμηνεύονται δύσκολα. Αυτό συμβαίνει κυρίως για δύο λόγους:

1. Συνήθως δεν είναι δυνατόν να «τοποθετήσουμε» τον ενισχυτή συχνοτήτων κοντά στα προβληματικά γρανάτζια.
2. Σε έναν πολυβάθμιο μειωτήρα στροφών οι συχνότητες που δύναται να εμφανιστούν μπορεί να προέρχονται από τις εξής αιτίες: την εμπλοκή των γραναζιών, τα σφάλματα στην κατασκευαστική τους διαμόρφωση και τις διάφορες συχνότητες που παράγονται από τα υπόλοιπα περιστρεφόμενα μέρη του κιβωτίου ταχυτήτων .

Για την εξακρίβωση των προβλημάτων που υποπτευόμαστε στα γρανάτζια, χρειάζεται ένας αναλυτής φάσματος υψηλής ανάλυσης που θα μας επιτρέψει να λάβουμε ένα φάσμα μεγάλου εύρους συχνοτήτων χωρίς απώλειες των σημαντικών για εμάς δεδομένων των παράπλευρων συχνοτήτων. Οι πλευρικές συχνότητες, είναι όπως προείπαμε πολύ σημαντικές και στις περισσότερες περιπτώσεις επιτρέπουν στον αναλυτή να καθορίσει ποιο από τα δύο εμπλεκόμενα γρανάτζια έχει βλάβη.

4.2) Λανθάνουσες συχνότητες :

Οι συχνότητες αυτές οφείλονται στις ατέλειες που δημιουργούνται από τα εργαλεία διαμόρφωσης των γραναζιών. Ωστόσο, η φυσική σύμφωνα με την οποία δημιουργούνται αυτές οι συχνότητες και ο τρόπος ταυτοποίησής τους κατά την λειτουργία των γραναζιών, σπάνια εξηγούνται. Θα ήταν πολύ βοηθητική μία καλύτερη εξήγηση και περισσότερες δοκιμές μεγαλύτερης ανάλυσης από τους κατασκευαστές γραναζιών.

Ο Smith μιλάει για αρμονικές «φαντάσματα» που προκαλούνται από παραμορφώσεις στην γεωμετρική μορφή της κατατομής. Αυτές υπολογίζονται από τον αριθμό των ανωμαλιών στην κατατομή του δοντιού που βρίσκονται στην ζώνη φόρτισης επί την συχνότητα εμπλοκής οδοντωτών τροχών. Το γεγονός αυτό μπορεί να κάνει το πλάτος της δεύτερης, τρίτης, τέταρτης, πέμπτης, έκτης κ.λ.π. αρμονικής να εμφανίζεται μεγαλύτερο. Ο Smith επίσης τονίζει ότι και κάποιες άλλες λανθάνουσες συχνότητες μπορούν να εμφανιστούν μεταξύ των αρμονικών της συχνότητας εμπλοκής οδόντων. Οι συχνότητες περιγράφονται από τον όρο «κλασματικές συχνότητες» σε επόμενη παράγραφο της παρούσας εργασίας.

Ο Smith πραγματεύεται ότι οι λανθάνουσες συχνότητες εμφανίζονται στο 1,7X και 2,7X της συχνότητας εμπλοκής οδόντων. Υπενθυμίζουμε ότι οι παραπάνω συχνότητες δημιουργούνται από τις ατέλειες που προκαλούν στα παραγόμενα γρανάζια τα εργαλεία διαμόρφωσης και ο τρόπος με τον οποίο κινούνται κατά την διαδικασία της κοπής(μηχανισμός ατέρμονα κοχλία). Θα έπρεπε επίσης να τονίσουμε ότι το $1\frac{3}{4}$ της συχνότητας GMF θα μπορούσε να φαίνεται ίδιο με το 1,7X της GMF όταν η ακρίβεια της μέτρησης είναι αμφιλεγόμενη. Προς το παρόν δεν μπορούμε να πούμε αν υπάρχει διαφορά γιατί οι εργασίες που αναφέρονται σ αυτό δεν αναφέρουν πλάτος, συχνότητα ή ακρίβεια μέτρησης και το χρονικό σήμα δεν παρουσιάζεται. Καταλαβαίνουμε, ότι είναι δύσκολο για τον χρήστη ενός γραναζιού να ταυτοποιήσει κάποια εκπεμπόμενη συχνότητα ως λανθάνουσα γιατί οι ταχύτητες και η γεωμετρία της μηχανής που παρήγαγε το γρανάζι συνήθως δεν του είναι γνωστές. Ανεξάρτητα, αν αυτή η συχνότητα είναι 1,7 ή 1,75 της GMF, τα γρανάζια παρουσιάζουν ένα σφάλμα μετάδοσης. Η διάγνωση θα μπορούσε να είναι ίδια σε κάθε περίπτωση, Τα καινούργια γρανάζια θα έπρεπε να απορρίπτονται όταν εμφανίζονται αυτές οι κλασματικές συχνότητες ενώ, τα εγκατεστημένα γρανάζια που τις εμφανίζουν θα έπρεπε ενδεχομένως να αντικατασταθούν.

Συγκεκριμένα, κάθε έβδομος κύκλος της 1,7X GMF βρίσκεται σε φάση με κάθε τέταρτο κύκλο της GMF, δηλαδή: $1/312=0,0032*4=0,01282$ και $1/546=0,0018315*7=0,01282$. Αυτό οδηγεί σε μια ανεπιθύμητη μεταβολή της κυματομορφής εξαρτώμενη από το πλάτος. Επίσης, το πλάτος κάθε τέταρτου κύκλου είναι υψηλότερο. Κάθε δέκατος έβδομος κύκλος της 1,7X GMF βρίσκεται σε φάση με κάθε δέκατο κύκλο της GMF δηλαδή: $1/530,4=0,001885*17=0,03205$ και $1/312=0,0032*10=0,03205$. Αυτό οδηγεί σε μία ανεπιθύμητη μεταβολή της κυματομορφής εξαρτώμενη από το πλάτος. Επίσης το πλάτος κάθε δέκατου κύκλου της GMF εμφανίζεται υψηλότερο.

4.3)Κλασματικές συχνότητες:

Μερικές φορές τα δεδομένα που παίρνονται από ένα σύστημα οδοντωτών τροχών περιέχουν μία υποδιαίρεση της GMF π.χ την μισή. Σε άλλες περιπτώσεις εμφανίζονται κλάσματα της GMF μεγαλύτερα απ αυτήν(π.χ $1 \frac{1}{2}$). Όταν ένα από τα δύο είδη συχνοτήτων ή και τα δύο παρουσιάζονται το πλάτος κάθε δεύτερης περιόδου είναι υψηλότερο στο χρονικό σήμα. Είναι δύσκολο να εξάγουμε συμπεράσματα από τα χρονικά δεδομένα των μηχανών γιατί κάθε περίοδος είναι διαφορετική, γεγονός που προκύπτει απ το ότι κάθε περίοδος του χρονικού σήματος δημιουργείται από διαφορετικά δόντια.

Προβλήματα γραναζιών που δημιουργούν την $\frac{1}{2}$ και την $1 \frac{1}{2}$ της GMF:

Ο παραπάνω τίτλος μας παραξενεύει καταρχήν αφού αναρωτιόμαστε πως είναι δυνατόν εμφανίζονται στο φάσμα μας αυτές οι συχνότητες αφού δεν είναι δυνατόν να υπάρχει σύμπλεξη των γραναζιών σ' αυτές. Η απάντηση δίνεται αν αναλογιστούμε ότι όταν συμβούν διάφορες μορφές σφαλμάτων μετάδοσης, τότε παράγεται ένα παραμορφωμένο χρονικό σήμα. Το σφάλμα μετάδοσης θα μπορούσε να προέλθει από τις εξής αιτίες που έχουμε αναφέρει και σε άλλο μέρος της εργασίας: Άνισο πλάτος δοντιών, υποχώρηση της ονομαστικής διαμέτρου και σφάλμα στην διαδοχή της σύμπλεξης των δοντιών. Κάποιες εμπειρικές μετρήσεις καταδεικνύουν ότι όταν τέτοια προβλήματα λαμβάνουν χώρα, η περίοδος για την ολοκλήρωση μίας οποιασδήποτε περιστροφής μπορεί να παρουσιάζει διακύμανση στο εύρος της παρατήρησής μας. Κάτι τέτοιο είναι μια αρχική ένδειξη για ανομοιόμορφο πλάτος δοντιού. Σ αυτήν την περίπτωση, το πλάτος κατά μήκος μιας περιόδου, μπορεί να είναι μεγαλύτερο είτε προς την αρνητική είτε προς την θετική κατεύθυνση, είτε και προς τις δύο. Το παραπάνω υποδεικνύει την υποχώρηση της ονομαστικής διαμέτρου ή ένα πρόβλημα στην διαδοχή της σύμπλεξης των δοντιών ή και τα δύο. Όταν το πλάτος κάθε δεύτερης περιόδου είναι υψηλότερο προς την θετική κατεύθυνση αποτελεί ένδειξη για υποχώρηση της ονομαστικής διαμέτρου. Όταν το πλάτος κάθε δεύτερης περιόδου είναι υψηλότερο προς την αρνητική κατεύθυνση αποτελεί ένδειξη προβλήματος στην διαδοχή σύμπλεξης δοντιών. Όταν το πλάτος κάθε δεύτερης περιόδου είναι υψηλότερο και προς τις δύο κατευθύνσεις, υπάρχει ένδειξη και για τα δύο προβλήματα. Αυτό προϋποθέτει ότι παρατηρείται η κατεύθυνση του μετατροπέα και ότι τα δεδομένα συλλέγονται από την σωστή πλευρά του κιβωτίου ταχυτήτων. Ένα φάσμα FFT σ αυτά τα παραμορφωμένα χρονικά σήματα μπορεί να παράγει συχνότητες στο $\frac{1}{2} \times GMF$ στο GMF και/ή στο $1 \frac{1}{2} \times GMF$.

Το $\frac{1}{2}$ και το $1 \frac{1}{2}$ της GMF μπορούν να προκληθούν όταν τα δόντια στα συμπλεκόμενα γρανάζια έχουν κοινό διαιρέτη το 2 και το ένα από τα γρανάζια είναι ελαττωματικό. Όταν συμβαίνει αυτό κάθε δεύτερο δόντι μπορεί να φθαρεί. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να μην απαντάται πολύ συχνά. Αυτές οι κλασματικές συχνότητες συνήθως εμφανίζονται σε γρανάζια που δεν έχουν άλλο κοινό διαιρέτη εκτός του 1, πράγμα που υποδηλώνει ότι ορισμένα γρανάζια μπορεί να παραλαμβάνονται από τον κατασκευαστή με άνισο πλάτος δοντιών. Αυτό δεν σημαίνει ότι θα έχουμε άνισο πλάτος σε κάθε δεύτερο δόντι σε όλη την περίμετρο του γραναζιού. Είναι πιο συνηθισμένο να είναι άνισα ορισμένα δόντια σε ένα ή περισσότερα εντοπισμένα σημεία στην περίμετρο του γραναζιού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε «υποτίμηση» του πλάτους των κλασματικών συχνοτήτων γιατί αυτές οι συχνότητες μπορεί να μην είναι παρούσες σ όλη την περιστροφή του γραναζιού και σε κάθε περίοδο μέσα στην παρατήρησή μας ή σε ολόκληρη την περίοδο μέσα στην παρατήρησή μας όταν εμφανίζονται.

Όταν τα γρανάζια έχουν άνισο πλάτος δοντιών, το πλάτος κάθε δεύτερης περιόδου είναι υψηλότερο και η χρονική διάρκεια για κάθε περίοδο είναι διαφορετική. Ένα FFT σ ένα τέτοιο σήμα μπορεί να αποδώσει ένα $\frac{1}{2}$ ή $1\frac{1}{2}$ της GMF. Από την στιγμή που το FFT «υποθέτει» ότι οι διάφορες διακριτές συχνότητες αθροίστηκαν προς την σύνθετη κυματομορφή, μία περίληψη του πως αυτά τα σήματα προστίθενται και αφαιρούνται μπορεί να είναι χρήσιμη. Στον ηλεκτρονικό κόσμο, ο χρόνος, η φάση, οι συχνότητες και το πλάτος επηρεάζουν την ανεπιθύμητη μεταβολή της κυματομορφής ενός σήματος. Στον κόσμο της μηχανολογίας, το σφάλμα μετάδοσης καθορίζει την συχνότητα, τον χρόνο, την φάση και το πλάτος κάθε περιόδου.

Γενικά για την εμφάνιση της $\frac{1}{2} X$ GMF μπορούμε να εστιάσουμε στα εξής:

- ο Τα δόντια που παράγουν την περίοδο χαμηλού πλάτους, μπορεί να είναι πολύ αδύνατα.
- ο Τα δόντια που παράγουν την περίοδο μεγάλου πλάτους μπορεί να είναι πολύ χοντρά και να παρουσιάζεται σ αυτά μια υποχώρηση της ονομαστικής τους διαμέτρου.

Όταν η $1\frac{1}{2} X$ GMF εμφανίζεται:

- ο Τα δόντια που παράγουν την περίοδο χαμηλού πλάτους μπορεί να είναι πολύ χοντρά.
- ο Τα δόντια που παράγουν την περίοδο μεγάλου πλάτους μπορεί να είναι πολύ λεπτά και να παρουσιάζουν υποχώρηση της ονομαστικής τους διαμέτρου.

Όταν εμφανίζεται η $\frac{1}{2}$ και η $1\frac{1}{2}$ της GMF:

- ο Το πάχος των δοντιών από το μηδενικό σημείο και πάνω μπορεί να μην είναι σωστό.
- ο Τα δόντια που παρήγαγαν την περίοδο χαμηλού πλάτους μπορεί να είναι πολύ χοντρά στο διάστημα από το μηδενικό σημείο έως το σημείο μετάβασης στο αυξάνον και στο φθίνον τμήμα.
- ο Τα δόντια που παρήγαγαν την περίοδο μεγάλου πλάτους μπορεί να είναι πολύ λεπτά στο διάστημα από το μηδενικό σημείο ως το σημείο μετάβασης στο αυξάνον και φθίνον τμήμα. Αυτά τα δόντια μπορεί να παρουσιάζουν υποχώρηση της ονομαστικής διαμέτρου.

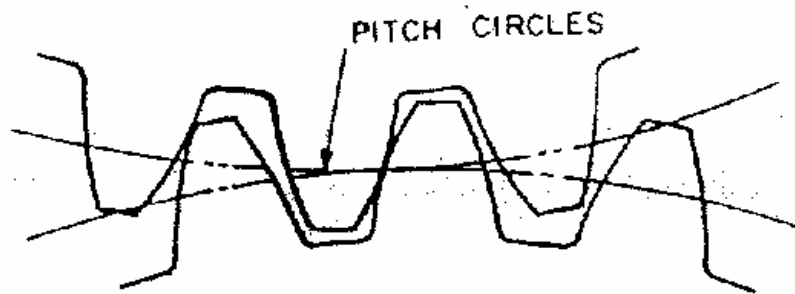
4.4) Διαμόρφωση των περιόδων του εκτεμπόμενου φάσματος της συχνότητας εμπλοκής γραναζιών(GMF):

Για ακριβείς διαγνώσεις βλαβών των περιστρεφόμενων μηχανών είναι απαραίτητη η κατανόηση του τρόπου δημιουργίας κάθε συχνότητας που δημιουργείται κατά την διάρκεια μιας περιόδου. Ωστόσο, η παραπάνω διαδικασία, συχνά υποβαθμίζεται ή στην καλύτερη περίπτωση δεν γίνεται κατανοητή. Για παράδειγμα είναι γνωστός ο τρόπος υπολογισμού της συχνότητας εμπλοκής γραναζιών(αριθμός οδόντων *ταχύτητα γραναζιού), ενώ δεν είναι τόσο γνωστό το πως δημιουργείται ή το ακριβές σημείο που ξεκινάει και τελειώνει μία περίοδος. Αυτή η έλλειψη γνώσης εμποδίζει τις ακριβείς διαγνώσεις βλαβών στα γρανάζια και συχνά οδηγεί στην εμφάνιση κλασματικών τιμών της συχνότητας εμπλοκής γραναζιών($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, και $1\frac{3}{4}$ κ.λ.π. τα οποία κατά την ανάλυση χαρακτηρίζονται ως «περίεργες» συχνότητες ή συχνότητες «φαντάσματα»(αναλυτικά γι αυτές θα αναφερθούμε σε επόμενη ενότητα).

Οι μετρήσεις δόνησης δεν είναι άμεση μέτρηση επηρεάζονται από την συνάρτηση μεταφοράς. Ωστόσο, η συνάρτηση μεταφοράς επηρεάζει μόνο το πλάτος και

όχι την συχνότητα. Για παράδειγμα, το πλάτος δόνησης δύναται να δώσει θετικό ή αρνητικό σφάλμα ανάλογα με την ευκαμψία, την απόσβεση, τον συντονισμό της μηχανής και άλλους τρόπους απόσβεσης όπως οι μηχανικές επαφές μεταξύ των στοιχείων μηχανών και τα στεγνωτικά. Η συχνότητα εξαρτάται από τον χρόνο, την φάση, τις διάφορες διαμορφώσεις και τις άλλες ανεπιθύμητες μεταβολές της κυματομορφής του χρονικού σήματος. Γι αυτό τον λόγο, οι αποκοπές, οι αρμονικές, οι αυξήσεις κι οι μειώσεις στο χρονικό σήμα, η χρονική διαφορά μεταξύ των θετικών και των αρνητικών της κάθε περιόδου και οι άλλες ανεπιθύμητες μεταβολές της κυματομορφής δεν επηρεάζονται από την συνάρτηση μεταφοράς.

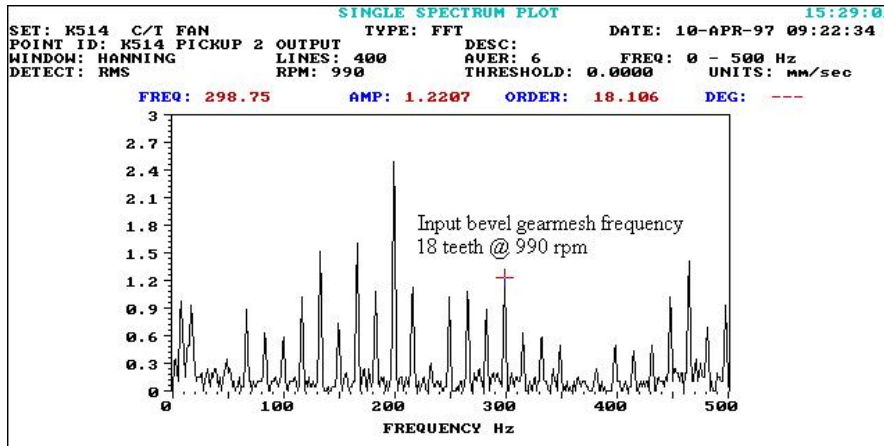
Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας θα μελετήσουμε την διαδικασία σύμπλεξης δοντιών και το εκπεμπόμενο απ αυτήν φάσμα, μόνο για μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς ευθείας οδόντωσης. Αυτή η ανάλυση μπορεί εύκολα μετά, να επεκταθεί και για τους άλλους τύπους γραναζιών. Στα περισσότερα γρανάζια, οποιαδήποτε δεδομένη στιγμή ένα δόντι εξέρχεται από την σύμπλεξη, ένα δόντι βρίσκεται στην σύμπλεξη με κάποιο άλλο και ένα άλλο οδεύει προς την σύμπλεξη. Τα γρανάζια συμπλέκονται από την βάση προς την κορυφή ενός δοντιού του πινιόν και από την κορυφή προς την βάση ενός δοντιού του συνεργαζόμενου τροχού. Κάθε περίοδος του χρονικού σήματος ξεκινά από το σημείο μετάπτωσης ενός δοντιού(transition point), η οποία αποτελεί την πιο αρνητική αιχμή στο παραγόμενο σήμα. Σε κάθε περίοδο του χρονικού σήματος η πιο θετική αιχμή παρουσιάζεται την στιγμή που η συνεργασία μεταξύ των οδόντων βρίσκεται στην ονομαστική διάμετρο αυτών. Στο σημείο του φθίνοντος τμήματος της περιόδου που παρουσιάζεται η αρνητικότερη αιχμή είναι η στιγμή κατά την οποία τα δύο δόντια αποσυμπλέκονται. Η βασική διαδικασία σύμπλεξης που ξεκινά από την βάση προς την κορυφή ενός δοντιού του πινιόν και από την κορυφή προς την βάση ενός δοντιού του συνεργαζόμενου γραναζιού έχει επίσης εφαρμογή και στις άλλες μορφές γραναζιών με περισσότερες όμως ιδιαιτερότητες. Το σχήμα 4.4Σ1 παρουσιάζει ένα απλοποιημένο σχέδιο δύο συμπλεκόμενων γραναζιών. Την στιγμή που κάθε περίοδος του χρονικού σήματος βρίσκεται στο σημείο 0(σημείο εκφυγής του οδόντα)του αύξοντος τμήματός της, τα δόντια βρίσκονται στο μέσον της απόστασης μεταξύ της βάσης του οδόντα και της ονομαστικής διαμέτρου του πινιόν και στο μέσο της απόστασης μεταξύ του άκρου και της ονομαστικής διαμέτρου στο συνεργαζόμενο γρανάζι. Το μηδενικό σημείο στο φθίνον τμήμα της περιόδου βρίσκεται στο μέσο της απόστασης μεταξύ της ονομαστικής διαμέτρου και του άκρου στο δόντι του πινιόν και στο μέσο της απόστασης μεταξύ της ονομαστικής διαμέτρου και της βάσης του δοντιού στο συνεργαζόμενο γρανάζι. Τελευταία επικρατεί η άποψη ότι κάθε περίοδος ξεκινά από το σημείο μετάπτωσης του δοντιού(βάση του δοντιού στο πινιόν και άκρο του δοντιού στο συνεργαζόμενο γρανάζι).Αυτό είναι το πιο αρνητικό σημείο του αύξοντος τμήματος σε κάθε περίοδο. Κάθε περίοδος τελειώνει στο άκρο του δοντιού του πινιόν και στην βάση του δοντιού του συνεργαζόμενου γραναζιού. Αυτό είναι το πιο αρνητικό σημείο του φθίνοντος τμήματος σε κάθε περίοδο.



Σχημα 4.4Σ1: Απλοποιημένο σχέδιο δύο συμπλεκόμενων γραναζιών

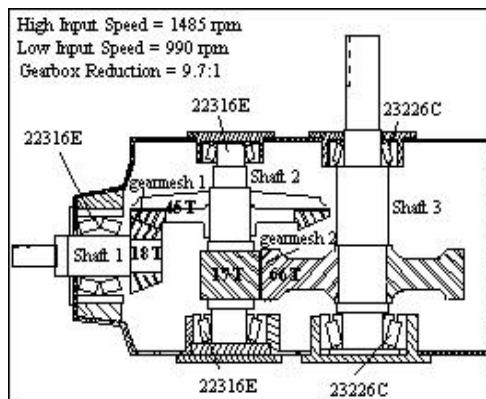
Κάθε περίοδος της συχνότητας εμπλοκής γραναζιών αντιπροσωπεύει την μορφή της κατατομής του πινιόν και την μορφή της κατατομής του συνεργαζόμενου τροχού. Αν υπήρχε κάποιο σφάλμα κατά την μετάδοση της ισχύος διαμέσου του κιβωτίου ταχυτήτων, θα ήταν αδύνατον να εμφανιστούν πανομοιότυπες κατατομές για διαδοχικά ζεύγη συμπλεκόμενων δοντιών, αφού κάποια ή κάποιες απ αυτές θα είχε παραμορφωμένη (σε σχέση με την ιδανική) γεωμετρική γεωμετρική μορφή. Σ αυτήν την περίπτωση κάθε περίοδος της συχνότητας εμπλοκής γραναζιών θα έπρεπε να είναι λίγο διαφορετικής μορφής από τις υπόλοιπες περιόδους. Μια συγκεκριμένη περίοδος επαναλαμβάνεται μόνο όταν δύο συγκεκριμένα δόντια που την δημιουργούν συμπλέκονται ξανά. Αυτό το γεγονός αποτυπώνεται με την συχνότητα σύμπτωσης οδόντων (HTF) και προϋποθέτει τα δόντια από τα δύο γρανάζια να δημιουργήσουν μία συχνότητα εμπλοκής γραναζιών. Τότε, το προβληματικό γρανάζι αναγνωρίζεται από την διαφορά της συχνότητας μεταξύ των πλευρικών ζωνών γύρω από την συχνότητα εμπλοκής γραναζιών. Στην περίπτωση που και τα δύο συνεργαζόμενα γρανάζια έχουν βλάβη, διαφορετικές συχνότητες θα εμφανίζονται στην ταχύτητα επιστροφής και των δύο γραναζιών. Οι πλευρικές ζώνες θα εμφανίζονται όταν υπάρχει ένα επαναλαμβανόμενο πρόβλημα (ανωμαλία) στην ταχύτητα περιστροφής του γραναζιού. Στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότερα του ενός επαναλήψιμα προβλήματα (ανωμαλίες), οι διαφορετικές συχνότητες θα έπρεπε να εμφανίζονται σε πολλαπλάσια της ταχύτητας περιστροφής του γραναζιού, εξαρτώμενες από τον αριθμό των προβλημάτων.

Ως παράδειγμα παραθέτουμε το ιστορικό της επόμενης περίπτωσης το οποίο δείχνει την ανεκτίμητη βοήθεια που προσφέρει η ανάλυση φάσματος για τον καθορισμό ενός προβληματικού γραναζιού σ ένα κιβώτιο ταχυτήτων συνδεδεμένο σε σειρά με έναν ανεμιστήρα. Τα δεδομένα δόνησης συλλέγονται μέσω του ηλεκτροκινητήρα με την βοήθεια ενός αναλυτή φάσματος κραδασμών και ενός ταχυμέτρου μαγνητικής στήριξης. Λόγω της δυσκολίας πρόσβασης στο κιβώτιο ταχυτήτων με ανεμιστήρα, τα μόνιμα στηριγμένα ταχύμετρα προσαρμόζονται στον άξονα εισόδου και εξόδου των φωλιών των ρουλεμάν και τα καλώδιά τους καταλήγουν σε μία ασφαλή τοποθεσία και συνδέονται στο όργανο μέτρησης των κραδασμών.



Σχήμα 4.4Σ2: Φάσμα κραδασμών που υποδηλώνει βλάβη γραναζιού.

Από το παραπάνω φάσμα και γνωρίζοντας την χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα, μπορέσαμε να αναγνωρίσουμε την συχνότητα εμπλοκής του κωνικού οδοντωτού τροχού εισόδου. Η αρμονική 16,5Hz του άξονα εισόδου είναι ορατή και από τις δύο πλευρές της συχνότητας εμπλοκής του κωνικού γραναζιού εισόδου. Από αυτήν την πληροφορία και από τεχνικά δεδομένα από το κιβώτιο, καταλήξαμε ότι ο κωνικός οδοντωτός τροχός εισόδου έχει υποστεί κάποιο βαθμό βλάβης των δοντιών του γραναζιού.



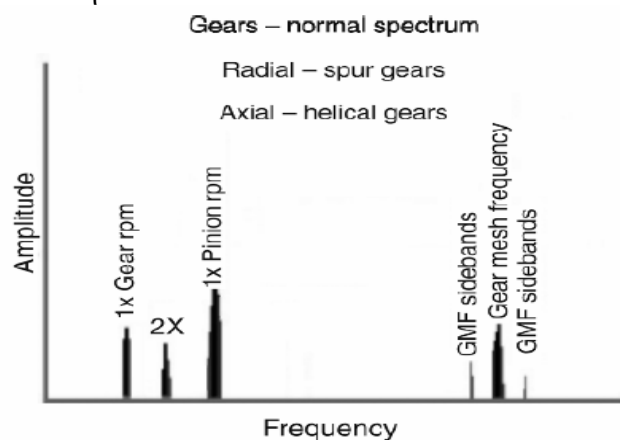
Σχήμα 4.4Σ3: Τομή του κιβωτίου ταχυτήτων του παραδείγματός μας.

Η εξέταση του κιβωτίου ταχυτήτων απέδειξε ότι η ανάλυση ήταν ακριβής, με εμφανείς τις βλάβες σε αρκετά από τα δόντια του κωνικού οδοντωτού τροχού (εικόνα 4.4Σ4).



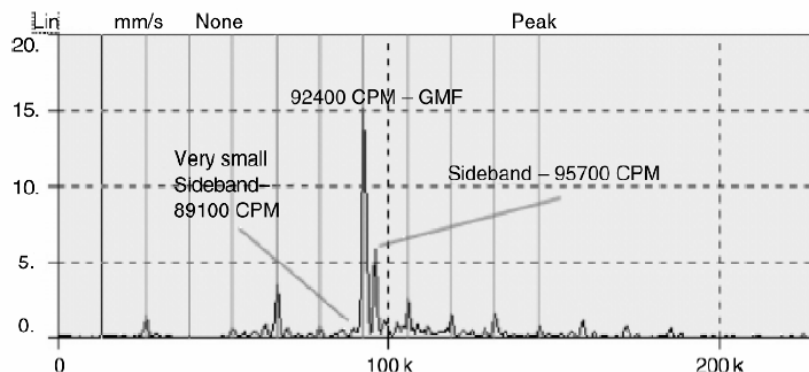
Εικόνα 4.4Σ4: Εκτεταμένες φθορές του κωνικού πινιόν.

Ας εμβαθύνουμε λοιπόν περισσότερο στο θέμα της παραπάνω εισαγωγής:
 Σε μία βαθμίδα οδοντωτών τροχών η ισχύς μεταδίδεται από την είσοδο και με κάποιες απώλειες(ανάλογα με την περίπτωση) προς την έξοδο μέσω των οδόντων των γραναζιών που είναι σε επαφή. Ως εκ τούτου, σημαντικές δυνάμεις εμφανίζονται στην επιφάνεια των συμπλεκόμενων δοντιών. Αυτές οι δυνάμεις προκαλούν την παραμόρφωση των δοντιών υπό την επίδραση του φορτίου και μετά την επαναφορά τους αν η παραμόρφωση δεν είναι πλαστική. Τα επίπεδα τοπικής πίεσης είναι υψηλά και οι βλάβες καταπόνησης «συσσωρεύονται». Αν τα δόντια είχαν τέλεια γεωμετρική μορφή και άρα με σχεδόν μηδενικές γεωμετρικές αποκλίσεις, η κυκλική φόρτιση και εκφόρτιση κατά την λειτουργία του γραναζιού θα προκαλούσε πολύ μικρό επίπεδο δονήσεων. Στο παρακάτω σχήμα 4.4Σ5 απεικονίζεται το φάσμα συχνοτήτων μιας βαθμίδας οδοντωτών τροχών κατά την «ιδανική περίπτωση».



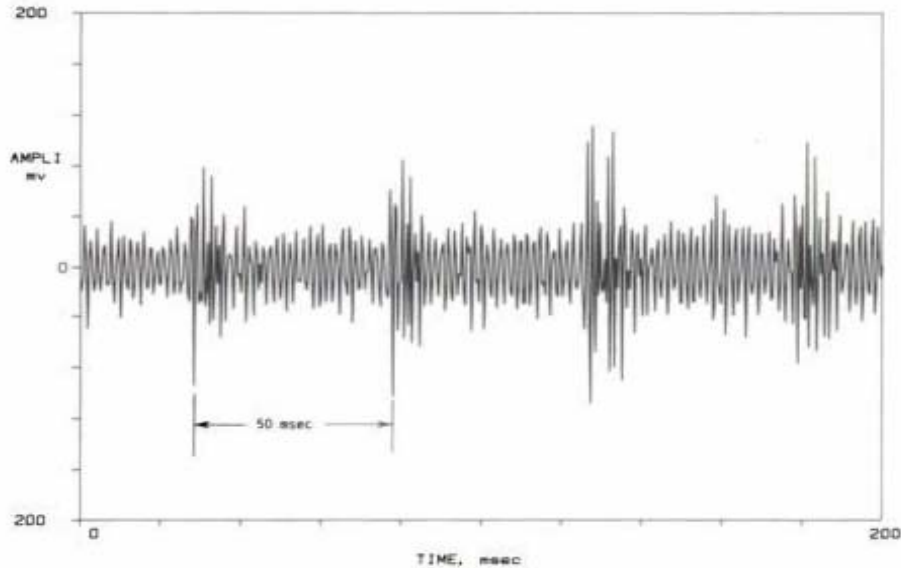
Σχήμα 4.4Σ5: «Φυσιολογικό» φάσμα μιας βαθμίδας οδοντωτών τροχών.

Το φυσιολογικό φάσμα δείχνει τις συχνότητες 1X και 2X των ατράκτων καθώς και την συχνότητα εμπλοκής των γραναζιών(GMF). Είναι πιθανόν να εμφανιστούν πλευρικές ζώνες της συχνότητας κάποιας ατράκτου γύρω από την συχνότητα εμπλοκής των οδόντων. Σημειώνουμε ακόμα ότι σε περίπτωση βλάβης, οι αιχμές στην συχνότητα εμπλοκής των οδόντων θα είναι στην ακτινική κατεύθυνση σε τροχούς με ευθύγραμμους οδόντες και στην αξονική κατεύθυνση σε τροχούς με ελικοειδείς οδόντες. Η παρουσία μη τέλειων γραναζιών είναι η αιτία που προκαλεί την δόνηση. Έτσι λοιπόν το πραγματικό φάσμα παίρνει την εξής μορφή:



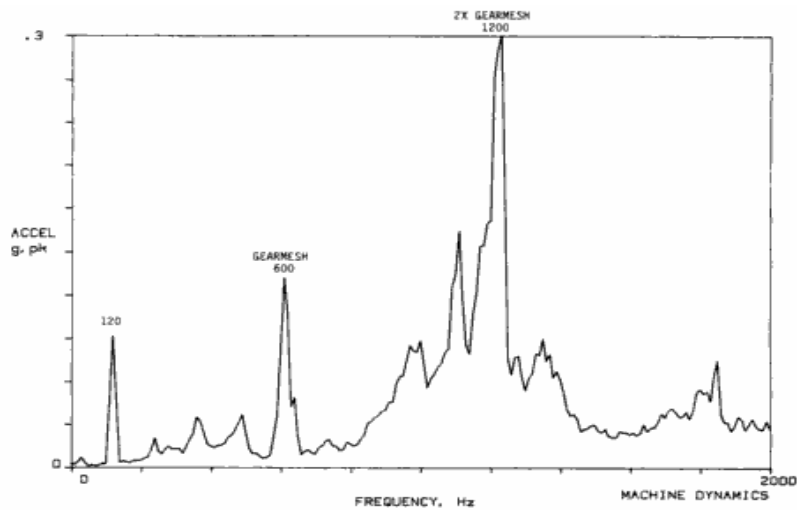
Σχήμα 4.4Σ6: Φάσμα FFT μιας «θορυβώδους» βαθμίδας γραναζιών με το πινιόν να περιστρέφεται στις 3300rpm και να έχει 28 οδόντες.

Η φασματική απεικόνιση της δόνησης των γραναζιών είναι η κρίσιμη πληροφορία για την κατανόηση των ελαττωμάτων τους. Όπως προείπαμε, ένα συγκεκριμένο ελάττωμα σ ένα συγκεκριμένο δόντι γραναζιού, θα προκαλέσει απότομη αύξηση δύναμης στην συχνότητα 1X της ταχύτητας περιστροφής. Το παρακάτω σχήμα(σχήμα 4.4Σ7) είναι μια φασματική απεικόνιση ως προς τον χρόνο ενός γραναζιού 30 δοντιών μ ένα ελαττωματικό δόντι.



Σχήμα 4.4Σ7: Καταγραφή ως προς τον χρόνο ενός γραναζιού με ελαττωματικό δόντι.
ταχύτητα περιστροφής: 1200rpm(20Hz), 30 δόντια

Το ελάττωμα συγκεκριμένα προκλήθηκε από την ολική αφαίρεση(αποκοπή από την ρίζα) του δοντιού και την επιπεδοποίηση(ξύρισμα) της επιφάνειάς του. Ένας κρουστικός παλμός διακρίνεται καθαρά κάθε φορά που αυτό το ελαττωματικό δόντι έρχεται σε επαφή. Η ταχύτητα του γραναζιού ήταν 1200rpm(20Hz) και η χρονική διάρκεια μιας περιστροφής είναι 50msec. Ωστόσο, εκτός και αν μιλάμε για πολύ εκτεταμένη βλάβη, η ενέργεια που δημιουργείται απ αυτό το ελάττωμα είναι μικρής διάρκειας και μοιάζει στιγμιαία. Μπορεί και να μην εμφανιστεί καθόλου στην 1X συχνότητα περιστροφής, και μάλιστα σ αυτήν την περίπτωση το ελαττωματικό δόντι δεν προκαλεί καμία αλλαγή στο επίπεδο των παραγόμενων δονήσεων. Το παρακάτω σήμα(σχήμα 4.4Σ8) είναι ένα φάσμα συχνοτήτων για το ίδιο γρανάζι. Η προκύπτουσα δόνηση στην ταχύτητα περιστροφής είναι πολύ μικρή στα 20Hz. Θα διαμορφώσει ωστόσο, την συχνότητα εμπλοκής των οδόντων και θα εμφανιστούν πλευρικές ζώνες της συχνότητας κάποια ατράκτου γύρω από την συχνότητα εμπλοκής των οδοντωτών τροχών.



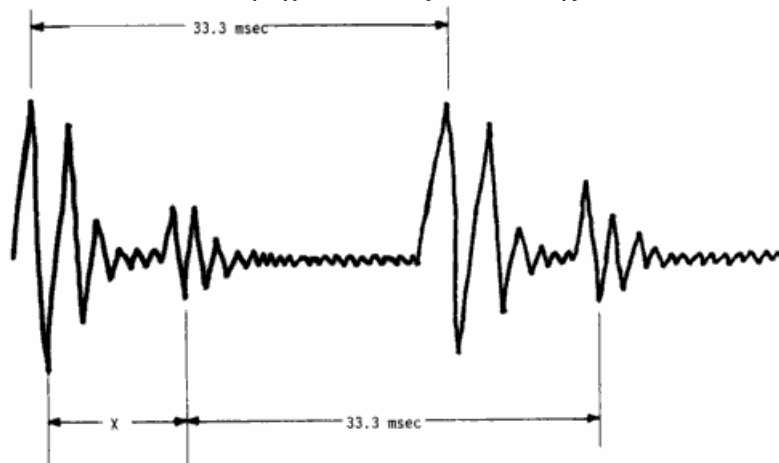
Σχήμα 4.4Σ8: Ανάλυση φάσματος συχνότητων από ένα γρανάζι μ ένα ελαττωματικό δόντι.

Είναι ευκόλως εννοούμενο, ότι οι συχνότητες εμπλοκής γραναζιών είναι υψηλές, συνήθως πάνω από 1000Hz, όποτε είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός επιταχυνσιόμετρου που θα μπορεί να τις ανιχνεύσει και η απεικόνιση της επιτάχυνση είναι απαραίτητη έτσι ώστε να γίνουν ορατές. Τα γρανάζια του παραπάνω σχήματος δημιούργησαν μία συχνότητα εμπλοκής γραναζιών στα 600Hz. Αυτή υπολογίζεται αν πολλαπλασιάσουμε τον αριθμό των δοντιών επί την ταχύτητα περιστροφής του γραναζιού. Σ' αυτήν την περίπτωση λοιπόν, η συχνότητα εμπλοκής των γραναζιών θα είναι:
 $20\text{Hz} * 30\text{δόντια} = 600\text{Hz}$

Πρέπει να ξεκαθαρίσουμε, ότι υπάρχει μόνο μία κοινή συχνότητα εμπλοκής γραναζιών για δύο συνεργαζόμενα γρανάζια. Αν και ο άξονας υψηλής ταχύτητας έχει λιγότερα δόντια, η ταχύτητα με την οποία θα περιστρέφεται επί τον αριθμό των δοντιών του, θα δίνει το ίδιο γινόμενο συχνότητας εμπλοκής γραναζιών των 600Hz που υπολογίστηκε παραπάνω.

Η συχνότητα 2X εμπλοκής γραναζιών, των 1200Hz για το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι επίσης παρούσα. Η 2X συνήθως εμφανίζεται μεγαλύτερου πλάτους από την 1X στην απεικόνιση επιτάχυνσης και είναι ένας καλύτερος δείκτης που μας πληροφορεί για την εμφάνιση βλάβης σ ένα γρανάζι. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα οι πλευρικές ζώνες της συχνότητας εμπλοκής γραναζιών, περιέχουν σημαντικές πληροφορίες για την κατάσταση των μεμονωμένων δοντιών του γραναζιού. Συχνά, είναι απαραίτητο για τον εντοπισμό των προαναφερθέντων πλευρικών ζωνών να εστιάσουμε στην συχνότητα εμπλοκής γραναζιών. Το πλάτος της προκαλούμενης δόνησης στην συχνότητα εμπλοκής των γραναζιών ποικίλει ανάλογα με το φορτίο. Γι αυτό τον λόγο όταν κρίνουμε την κατάσταση των γραναζιών χρησιμοποιώντας το πλάτος της προκαλούμενης δόνησης είναι σημαντικό να παίρνουμε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στις ίδιες συνθήκες φορτίου ώστε να προκύπτουν συγκρίσιμα δεδομένα. Όταν έχουμε προβληματική χάρη μεταξύ των κατατομών και μειωθεί το φορτίο των τροχών τότε το πλάτος της αιχμής στην συχνότητα εμπλοκής των γραναζιών αυξάνεται. Αντίθετα όταν υπάρχει backlash και αυξηθεί το φορτίο των τροχών, τότε η αιχμή στην συχνότητα εμπλοκής των γραναζιών και η αιχμή στην φυσική συχνότητα της μηχανής θα μειωθούν.

Όσον αφορά τώρα στην βλάβη ενός σπασμένου δοντιού σ ένα γρανάζι, είναι προφανές ότι ένα σπασμένο δόντι δεν μπορεί να «μεταδώσει» κανένα φορτίο. Αυτή η στιγμιαία διακοπή στην παροχή της στρεπτικής ροπής, που συμβαίνει λόγω της παραπάνω βλάβης, προκαλεί μία αιχμή στο φάσμα μας στην συχνότητα 1X της ταχύτητας περιστροφής, η οποία εμφανίζεται σαν πλευρικές ζώνες στην συχνότητα εμπλοκής γραναζιών. Το διάστημα των πλευρικών ζωνών προσδιορίζεται από την ταχύτητα περιστροφής. Τα ελαττώματα αυτού του είδους, όπως π.χ σπασμένα, χαραγμένα ή φαγωμένα δόντια γραναζιών(οι βλάβες αυτές περιγράφονται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο), φαίνονται καλύτερα στις φασματικές απεικονίσεις ως προς τον χρόνο. Σ αυτήν την περίπτωση πραγματοποιείται επαφή μετάλλου με μέταλλο είτε σ αυτό το ελαττωματικό δόντι είτε όταν το επόμενο ζεύγος δοντιών παραλαμβάνει απότομα το φορτίο. Αυτού του τύπου οι βλάβες, εμφανίζονται ως κρουστικοί παλμοί στην απεικόνιση ως προς τον χρόνο. Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των κρουστικών παλμών, ισούται με το χρονικό διάστημα που απαιτείται έτσι ώστε το ελαττωματικό δόντι να πραγματοποιήσει μια πλήρη περιστροφή. Ως παράδειγμα αναφέρουμε το σχήμα 4.4Σ9 το οποίο είναι ένα υποθετικό σχεδιάγραμμα χρόνου μιας βαθμίδα μετωπικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης.



Σχήμα 4.4Σ9: Υποθετική(ιδανική) καταγραφή ως προς τον χρόνο ενός γραναζιού με δύο ελαττωματικά δόντια που περιστρέφεται με 1800rpm (περίοδος=33,3msec).

Η ταχύτητα περιστροφής είναι 1800rpm(30Hz) που αντιστοιχεί σε μία περίοδο 33,3 msec. Αυτό είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ των κρουστικών παλμών της ίδιας μορφής. Εμφανίζονται δύο είδη κρουστικών παλμών στην διάρκεια μιας περιόδου πράγμα που σημαίνει ότι εμφανίζονται ανωμαλίες σε δύο δόντια . Το χρονικό διάστημα x είναι ανάλογο με το μήκος του τόξου, κατά μήκος της περιφέρειας του τροχού, μεταξύ των ελαττωματικών δοντιών. Τέτοια σοβαρά προβλήματα γραναζιών θα προκαλέσουν επιταχυνόμενη φθορά των μεταλλικών μερών και θα έπρεπε να επιβεβαιώνονται από έναν έλεγχο των γραναζιών ως προς την φθορά.

Τέλος, οι κρούσεις μετάλλου με μέταλλο στα ελαττωματικά δόντια γραναζιών είναι ισοδύναμες με το χτύπημα των βαθμίδων των γραναζιών με ένα σφυρί, λόγω των σημαντικών κρουστικών δυνάμεων που συνοδεύουν και τις δύο αυτές διαδικασίες. Αυτές οι κρούσεις θα προκαλέσουν συντονισμό(θα αναφερθεί σε άλλο μέρος της εργασίας) της κατασκευής(των γραναζιών, των αξόνων ή ακόμα και των φωλιών των ρουλεμάν). Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι τα κιβώτια ταχυτήτων υψηλής ποιότητας θα

έπρεπε να είναι σχετικά ελεύθερα από σοβαρούς συντονισμούς. Αυτό επιτυγχάνεται με το να χτίζουμε συμπαγείς και σκληρές εδράσεις και με το να τις στηρίζουμε με παρόμοιο τρόπο. Οι συνέπειες του να έχουμε σοβαρούς συντονισμούς στα κιβώτια ταχυτήτων είναι η επιταχυνόμενη φθορά των γραναζιών λόγω της σχετικής κίνησης μεταξύ των μερών που συνεργάζονται, η οποία επηρεάζει την ευθυγράμμιση σε ένα περιβάλλον λειτουργίας.

Όπως έχουμε τονίσει και νωρίτερα, κατά την παραγωγή των γραναζιών εμφανίζονται γεωμετρικές αποκλίσεις που τις περισσότερες φορές έχουν να κάνουν με την μορφή της προκύπτουσας κατατομής των οδόντων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, κατά την διάρκεια των πρώτων ωρών λειτουργίας, τα δόντια φθείρονται και μπορούμε να περιμένουμε ότι η συχνότητα εμπλοκής των γραναζιών θα μειωθεί. Όσο τα γρανάζια φθείρονται οι συχνότητες παραμένουν ίδιες αλλά τα πλάτη αυξάνονται. Οι αιχμές της συχνότητας εμπλοκής γραναζιών διευρύνονται και αποκτούν αποκτούν πλευρικές ζώνες στην ΙΧ της ταχύτητας περιστροφής.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε δύο γεγονότα που αφορούν τις βλάβες των γραναζιών και το εκπεμπόμενο φάσμα που αυτά παράγουν σε τέτοιες περιπτώσεις.

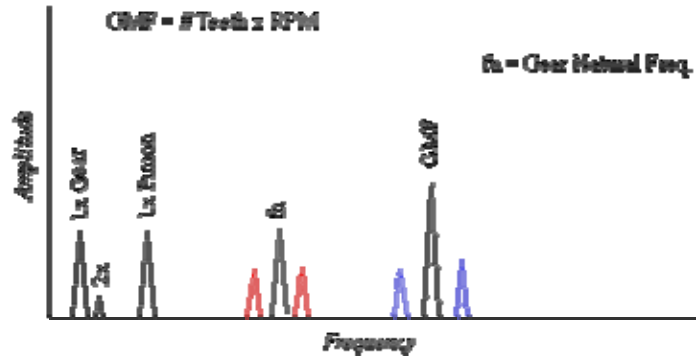
--Το πρώτο είναι ότι όσο τα φορτία τριβής μεγαλώνουν(→φθορά γραναζιού), τόσο αυξάνεται ο εκπεμπόμενος θόρυβος(αυξημένο πλάτος), αλλά συνεχίζεται η μετάδοση ισχύος. Σε κάποιο σημείο ξεκινούν να αναπτύσσονται ρωγμές και αυτά είναι τα σημάδια που θα οδηγήσουν σε μία καταστροφική βλάβη. Συνήθως αρκεί να καταγράψουμε τις συχνότητες των γραναζιών και να παρακολουθήσουμε τα πλάτη τους να μεγαλώνουν λόγω της φυσιολογικής φθοράς. Με την εμπειρία και ένα προηγούμενο ιστορικό της διάταξης στο οποίο μπορούμε να βασιστούμε θα είμαστε σε θέση να προβλέψουμε σε ποιο σημείο θα καταστραφεί ένα γρανάζι. Μια απότομη αλλαγή στην ανάλυση φάσματος συχνοτήτων είναι πολύ σημαντική. Η αλλαγή μπορεί να είναι μια απότομη μείωση προς ένα χαμηλότερο πλατό. Η απότομη πτώση του πλάτους της δόνησης υποδεικνύει ότι μία δραματική μείωση στη σκληρότητα έχει εξασθενήσει την δυνατότητα του κιβωτίου στην μετάδοση της ισχύος. Η ρωγμή έχει διαδοθεί πολύ περισσότερο αφήνοντας το γρανάζι ή τον άξονα πολύ «ελαστικό» και ικανό να απορροφά τις δυνάμεις λυγίζοντας περισσότερο.

--Το δεύτερο σχετικά με τις βλάβες των γραναζιών είναι ότι αυτά σχεδιάζονται για να διαρκέσουν όσο η ζωή της μηχανής. Εάν δεν το επιτύχουν αυτό πρέπει αυτό πρέπει να υποπτευθούμε κάποια άλλη αιτία όπως είναι η αζυγοσταθμία, η κακή ευθυγράμμιση ή η ανεπαρκής λίπανση.

4.5)Μορφή φάσματος κραδασμών για κάθεμια βλάβη:

Μπορούμε τώρα να κατηγοριοποιήσουμε τις (περισσότερες) βλάβες των γραναζιών(έχουμε αναφερθεί σε άλλο κεφάλαιο) με την (ιδανική) σε κάθε περίπτωση μορφή των εκπεμπόμενων φασμάτων συχνοτήτων. Έχουμε λοιπόν:

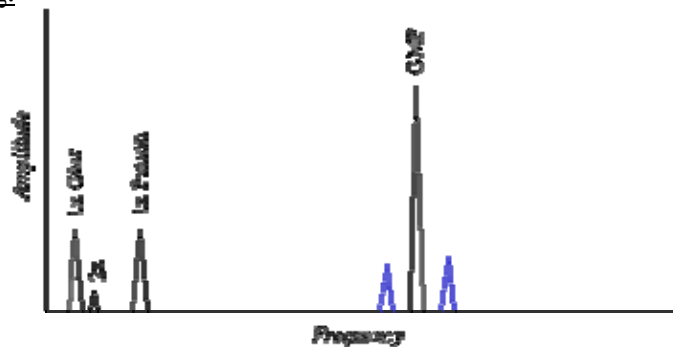
4.5.1) Φθορά σε οδόντα:



Σχήμα 4.5.1Σ1: Σκαρίφημα φάσματος κραδασμών σε περίπτωση φθοράς στο δόντι.

Όταν αρχίζει η φθορά στους οδόντες των τροχών συμβαίνουν τα εξής: Στην αρχή αυξάνουν οι αιχμές στις πλευρικές ζώνες γύρω από την συχνότητα εμπλοκής των οδόντων. Οι πλευρικές ζώνες αυτές αντιστοιχούν στην συχνότητα της ατράκτου του οδοντωτού τροχού που έχει το πρόβλημα της φθοράς των οδόντων. Το δεύτερο πράγμα που μπορεί να συμβεί είναι να αρχίζει να διεγείρεται η φυσική συχνότητα του οδοντωτού τροχού. Η αιχμή αυτή θα έχει ευρύτερη βάση στο φάσμα και θα εμφανίσει πλευρικές ζώνες.

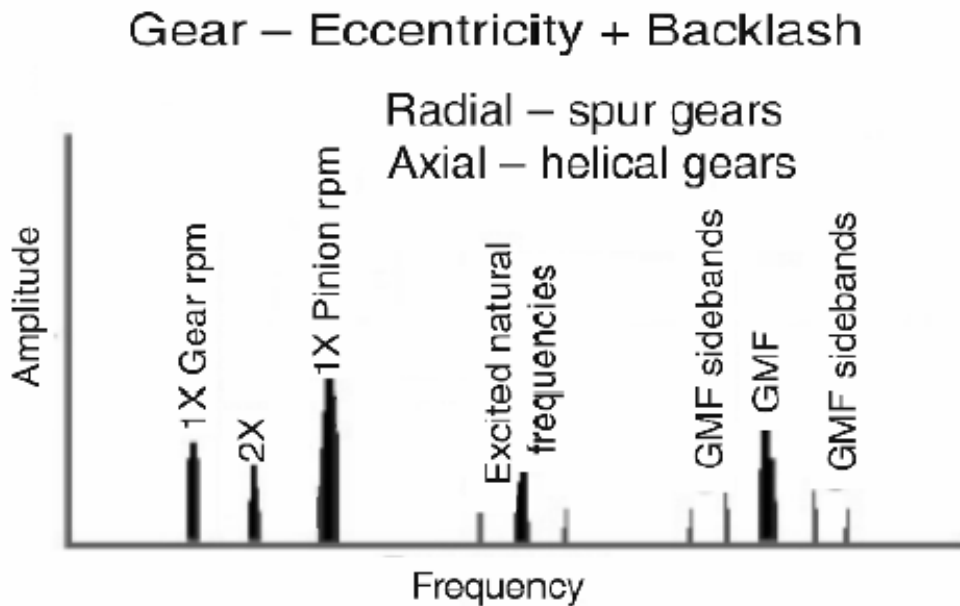
4.5.2) Φορτίο οδόντος:



Σχήμα 4.5.2Σ1: Σκαρίφημα επίδρασης του φορτίου στο εκπεμπόμενο φάσμα κραδασμών

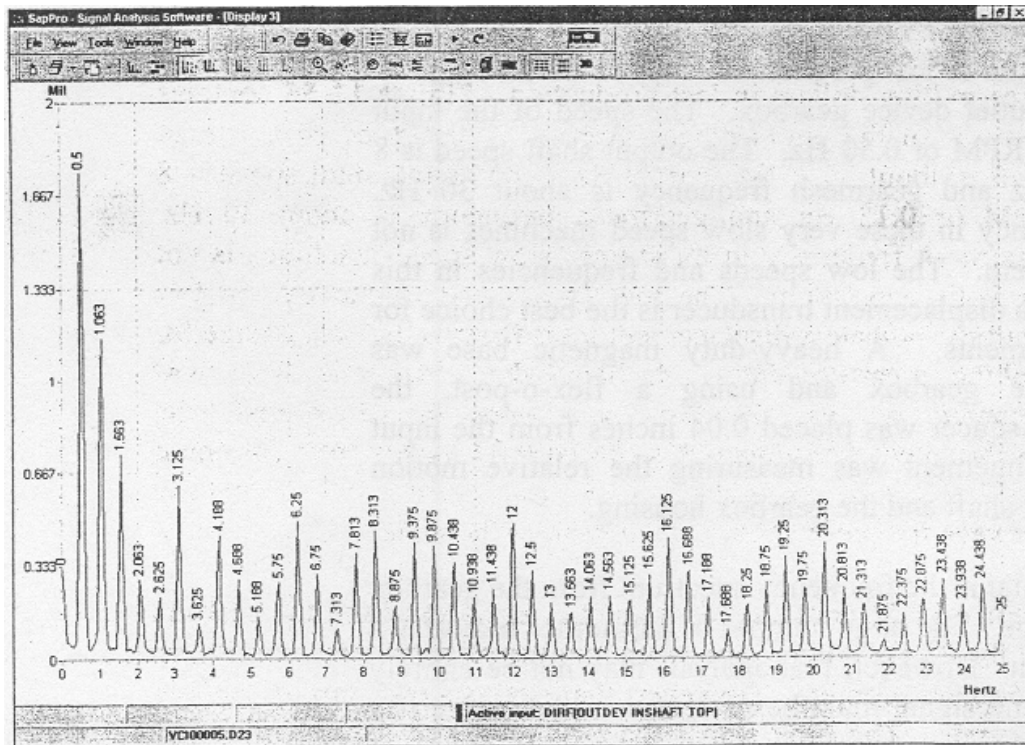
Σ' αυτή την περίπτωση οι συχνότητες εμπλοκής των οδόντων έχουν πολύ μεγάλη ευαισθησία ως προς το φορτίο. Το μέγεθος της αιχμής στην GMF εξαρτάται ακόμα και από την ευθυγράμμιση των ατράκτων. Η ύπαρξη μεγάλης αιχμής στην συχνότητα εμπλοκής των οδόντων δεν σημαίνει οπωσδήποτε ύπαρξη πρόβληματος στους οδοντωτούς τροχούς και ιδιαίτερα στην περίπτωση που οι πλευρικές συχνότητες παραμένουν χαμηλές και δεν εμφανίζεται καμία φυσική συχνότητα των γραναζιών στο φάσμα μας. Κάθε ανάλυση λοιπόν, θα πρέπει να πραγματοποιείται στο μέγιστο φορτίο λειτουργίας.

4.5.3) Οδοντωτοί τροχοί με εκκεντρότητα και χάρη μεταξύ των κατατομών:

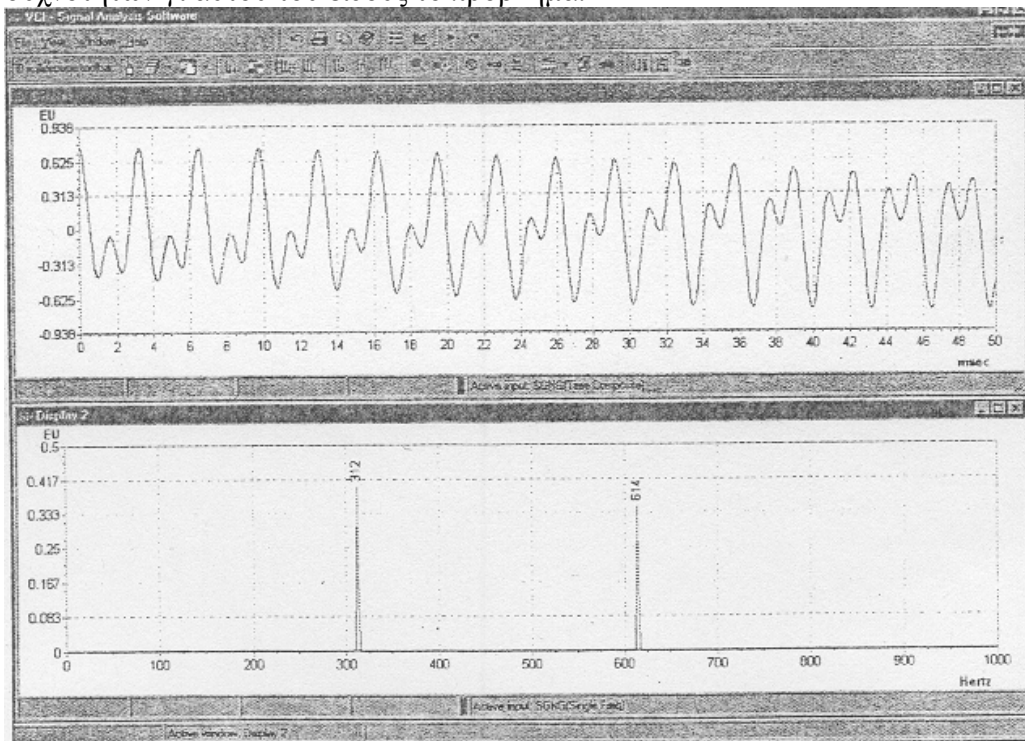


Σχήμα 4.5.3Σ1: Σκαρίφημα επίδρασης της εκκεντρότητας και της χάρης μεταξύ των κατατομών στο εκπεμπόμενο φάσμα κραδασμών.

Η εκκεντρότητα των οδοντωτών τροχών γίνεται εμφανής στο φάσμα συχνοτήτων μέσω των αυξημένων πλευρικών συχνοτήτων της ατράκτου του προβληματικού τροχού που εμφανίζονται γύρω από την GMF. Η χάρη μεταξύ των κατατομών και οι μη παράλληλοι άξονες οι οποίοι επιτρέπουν στην περιστροφή ενός γραναζιού να διαμορφώσει την ταχύτητα περιστροφής του άλλου. Το προβληματικό γρανάτζι διακρίνεται από το διάκενο μεταξύ των συχνοτήτων πλευρικών ζωνών. Ακατάλληλη χάρη μεταξύ των κατατομών συνήθως διεγείρει την GMF και τις φυσιολογικές συχνότητες γραναζιών και δημιουργούνται και στις δύο πλευρικές ζώνες συχνοτήτων στο 1X της συχνότητας της ατράκτου. Εάν το πρόβλημα είναι η χάρη μεταξύ των κατατομών τα πλάτη της GMF συχνά μειώνονται με την αύξηση του φορτίου. Το σχήμα 4.5.3Σ2 περιέχει το φάσμα συχνοτήτων από το κιβώτιο ταχυτήτων εύρους 25Hz. Ο μεγάλος αριθμός αρμονικών υποδηλώνει ένα πρόβλημα χαλαρότητας. Πρέπει να τονίσουμε ακόμα ότι τα γρανάτζια με προβλήματα χαλαρότητας και τα ταλαντούμενα γρανάτζια παράγουν συνήθως μια διακριτή δεύτερη αρμονική της GMF. Όταν η χαλαρότητα βρίσκεται μέσα στα επιτρεπτά όρια, αλλά υπάρχει κάποιο πρόβλημα φορτίου τα γρανάτζια μπορεί να ταλαντεύονται εμπρός-πίσω με τον ίδιο τρόπο. Όταν υπάρχουν αυτού του είδους τα προβλήματα το πλάτος της GMF, αλλά και η δεύτερη αρμονική της μπορεί να είναι αρκετά υψηλά.



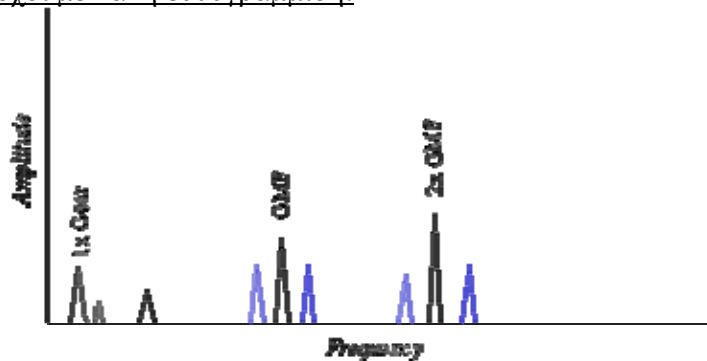
Σχήμα 4.5.3Σ2: Φάσμα από ένα κιβώτιο ταχυτήτων εύρους 25Hz.
 Στο παρακάτω σχήμα (4-13) βλέπουμε το χρονικό σήμα και το φάσμα
 συχνοτήτων γι αυτό του είδους το πρόβλημα.



Σχήμα 4.5.3Σ3: Χαρακτηριστικό χρονικό σήμα κα φάσμα συχνοτήτων για πρόβλημα
 χαλαρότητας.

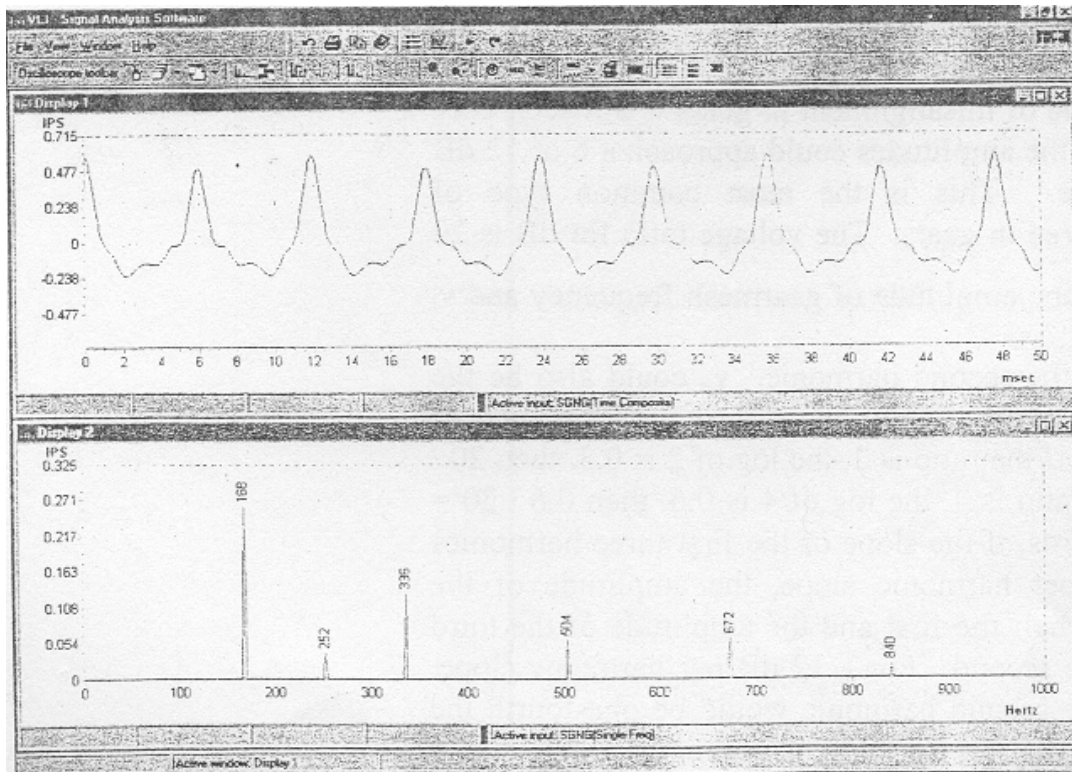
Αυτά τα σήματα δημιουργήθηκαν από έναν υπολογιστή όπως άλλωστε υποδεικνύεται και από την αλλαγή φάσης κατά 180° της δεύτερης αρμονικής. Γενικά, τα δεδομένα από μία μηχανή μπορεί να εμφανίζουν κάποια διαφορά φάσης μεταξύ της πρώτης(κύριας) και της δεύτερης αρμονικής όχι όμως της τάξης των 180° . Παρατηρούμε ότι, το πλάτος του χρονικού σήματος είναι 0,5 από την αρνητική κατεύθυνση. Το πλάτος της GMF στο χρονικό σήμα υποδηλώνει το ποσό της δύναμης που ακήθηκε σε καθένα από τα δόντια του γραναζιού μας. Βέβαια, και όσον αφορά το φάσμα συχνοτήτων μπορούμε να σημειώσουμε ότι, το πλάτος στο φάσμα αυτό εμφανίζεται μικρότερο από το πραγματικό γιατί το FFT υποθέτει ότι οι δύο συχνότητες ήταν διακριτές πριν αθροιστούν. Η δεύτερη αρμονική δύναται να δημιουργηθεί είτε αν η σύμπλεξη των δοντιών δεν γίνεται με τον κατάλληλο τρόπο εκεί όπου αρχίζει η ανάκαμψη στην καμπύλη. Σ αυτές τις περιπτώσεις η δεύτερη αρμονική μπορεί να εμφανίζεται και κοντά στο αύξον ή στο φθίνον του τμήματος, ενώ, ενδέχεται και το πλάτος της να είναι πολύ χαμηλό.

4.5.4)Οδοντωτοί τροχοί με κακή ευθυγράμμιση:



Σχήμα 4.5.4Σ1:Σκαρίφημα επίδρασης της ευθυγράμμισης στο εκπεμπόμενο φάσμα.

Οι οδοντωτοί τροχοί με κακή ευθυγράμμιση, συχνά προκαλούν αρμονικές της GMF με μεγάλες αιχμές στην διπλάσια και τριπλάσια αρμονική της GMF . Ακόμα, προκαλούν μεγάλες αιχμές στην GMF και δημιουργούν πλευρικές ζώνες συχνοτήτων γύρω απ αυτήν. Επομένως, συνίσταται να θέσουμε το πεδίο συχνοτήτων(frequency range Fmax) αρκετά μεγάλο για να περιλάβουμε στο φάσμα αυτές τις συχνότητες. Σ' αυτό το σημείο αξίζει ν' αναφέρουμε ότι θα μπορούσε το πλάτος κάθε αρμονικής να εμφανίζεται πάνω-κάτω το ίδιο και μία ή δύο αρμονικές να είναι υψηλότερες ή χαμηλότερες απ' όλες τις υπόλοιπες, μόρφη κακής ευθυγράμμισης που δεν συναντάμε τόσο συχνά(η πειραματική μας διαδικασία ανέδειξε ένα τ'τοιο συμπέρασμα). Επίσης, η κλίση των πλατών θα μπορούσε να προσεγγίζει τα 6 ή 12 dB ανά αρμονική καμπύλη του διαγράμματος, μορφή που αποτελεί και την συχνότερα παρατηρούμενη μορφή κακής ευθυγράμμισης στα γρανάζια. Τέλος, το διαταραγμένο σήμα που παράγεται θα μπορούσε να παρουσιάζει και τις 4X και 5X της GMF. Το σχήμα 4.5.4Σ2 περιέχει το χρονικό σήμα και το φάσμα συχνοτήτων για ένα τυπικό πρόβλημα κακής ευθυγράμμισης σε γρανάζια.



Σχήμα 4.5.4Σ2:Χρονικό σήμα και φάσμα συχνοτήτων για ένα τυπικό πρόβλημα ευθυγράμμισης σε γρανάζια.

Το πλάτος των τριών πρώτων αρμονικών της GMF προσεγγίζει τα 6dB ανά αρμονική. Η τέταρτη και η Πέμπτη αρμονική είναι επίσης παρούσες. Ακόμα, διακρίνεται και η φασματική γραμμή στα 252Hz, η οποία αντιστοιχεί στο $1\frac{1}{2}$ της GMF. Όσον αφορά το χρονικό σήμα βλέπουμε ότι είναι ελλειπές(σύντομο) στην βάση του. Επίσης, η χρονική περίοδος για το τμήμα της βάσης-ή αλλιώς το αρνητικό μισό- της περιόδου, εμφανίζεται πολύ μακρύτερη από το τμήμα της κορυφής-ή αλλιώς το θετικό μισό- της περιόδου. Αυτό υποδηλώνει ότι απαιτείται πολύ λίγος χρόνος για να περάσουν τα δόντια από την ονομαστική διάμετρο. Ο περισσότερος χρόνος σε κάθε περίοδο χρησιμοποιείται πριν και μετά την ονομαστική διάμετρο. Μια συνηθισμένη απορία πάνω σ' αυτό το θέμα είναι το γιατί τελικά οι τρεις πρώτες αρμονικές της ταχύτητας περιστροφής υποδηλώνουν κακή ευθυγράμμιση μεταξύ των συνδέσμων μετάδοσης κίνησης ή κακή ευθυγράμμιση των ρουλεμάν, ενώ, οι τρεις πρώτες αρμονικές της GMF υποδηλώνουν κακή ευθυγράμμιση μεταξύ των γραναζιών. Η απάντηση μπορεί να είναι το ότι η κακή ευθυγράμμιση προκαλεί σύνδεση και στις δύο περιπτώσεις ή τουλάχιστον το ότι το χρονικό σήμα είναι παρόμοιο και στις δύο περιπτώσεις.

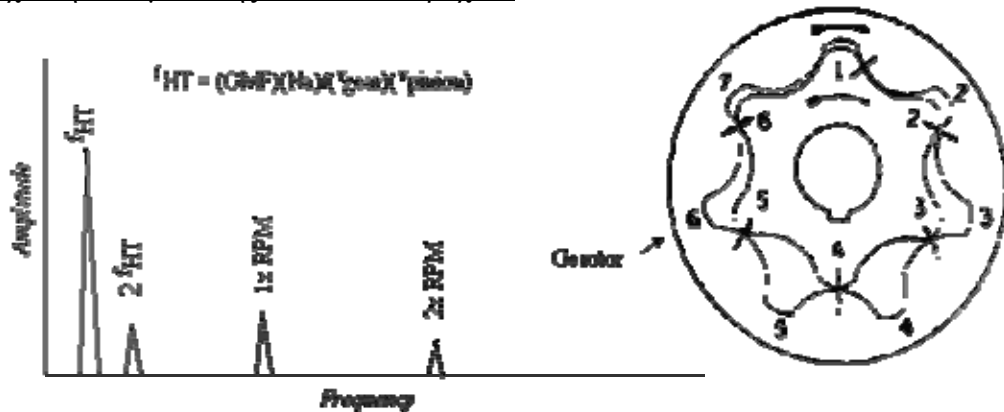
4.5.5) Ραγισμένο ή σπασμένο δόντι:



Σχήμα 4.5.5S1: Σκαρίφημα επίδρασης του σπασίματος ή ραγίσματος ενός δοντιού σ' ένα γρανάτζι.

Ένα ραγισμένο ή σπασμένο δόντι οδοντωτού τροχού προκαλεί μεγάλη αιχμή στην συχνότητα περιστροφής του τροχού, διεγείρει την φυσική συχνότητα του τροχού και αναπτύσσει πλευρικές ζώνες γύρω από την GMF. Οι πλευρικές ζώνες γύρω από την GMF αποτελούν και μία καλή ένδειξη για την «τοπολογία» του προβλήματος πάνω στο γρανάτζι μας, αλλά και για τον αριθμό των βλαβών που αυτό έχει. Για παράδειγμα, όταν ένα γρανάτζι έχει έναν σπασμένο οδόντα, οι πλευρικές ζώνες που θα αναπτυχθούν γύρω από την GMF θα είναι η ταχύτητα περιστροφής του σπασμένου οδόντα. Όταν έχουμε δύο σπασμένους οδόντες (π.χ με μεταξύ τους γωνία ίση με 90°), αυτό που αναμένουμε να δούμε είναι να έχουν αναπτυχθεί σχεδόν οι ίδιες πλευρικές ζώνες γύρω από την GMF, με μόνες διαφορές ότι αυτές θα έχουν λίγο μεγαλύτερο πλάτος και λίγο μεγαλύτερο πλάτος στο πεδίο των συχνοτήτων. Αν τώρα η γωνία μεταξύ των σπασμένων οδόντων δεν είναι 90° αλλά 180° αυτό που αναμένουμε να δούμε στο προκύπτον φάσμα μας θα είναι ότι σε σχέση με πριν δεν θα έχει μεταβληθεί καθόλου το πλάτος του κραδασμού, αλλά, θα έχει μεταβληθεί (έχοντας μεγαλώσει) το εύρος συχνοτήτων των πλευρικών ζωνών. Ο καλύτερος βέβαια τρόπος για να δούμε την επίδραση ενός τέτοιου δοντιού είναι μέσω της κυματομορφής (χρονικό σήμα). Εάν π.χ. ο τροχός έχει 13 οδόντες ένας από τους 13 παλμούς της κυματομορφής θα είναι διαφορετικός. Στην κυματομορφή θα έχουμε 12 μικρούς παλμούς και ένα μεγάλο παλμό. Η χρονική διαφορά μεταξύ των μεγάλων παλμών ισούται με την περίοδο της ατράκτου του τροχού, διότι το σπασμένο δόντι έρχεται σε επαφή μία φορά ανά περιστροφή.

4.5.6) Συχνότητα σύμπτωσης οδοντωτών τροχών:



Σχήμα 4.5.6 Σ1: Σκαρίφημα επίδρασης της συχνότητας σύμπτωσης οδοντωτών τροχών.

Η συχνότητα σύμπτωσης οδοντωτών τροχών είναι εξαιρετικά αποτελεσματική για την ανίχνευση βλαβών και στους δύο συνεργαζόμενους τροχούς, οι οποίες μπορεί να συνέβησαν κατά την διαδικασία κατασκευής ή λόγω κακών χειρισμών. Μπορεί να προκαλέσει αρκετά υψηλή δόνηση, όμως, εφόσον συμβαίνει σε χαμηλές συχνότητες, κυρίως μικρότερες των 600rpm, συχνά δεν γίνεται αντιληπτή. Μια βαθμίδα γραναζιών μ' αυτή τη βλάβη εκπέμπει έναν «υπόκωφο» ήχο από το πινιόν. Η μέγιστη ένταση του φαινομένου παρουσιάζεται όταν το ελαττωματικό πινιόν και τα φθαρμένα δόντια εμπλέκονται ταυτόχρονα (σε ορισμένα πινιόν αυτό ενδέχεται να συμβαίνει ανά 10 με 20 περιστροφές του μεγάλου τροχού, ανάλογα με τον τύπο για τη f_{HT} , όπου το T_{Gear} και T_{Pinion} αναφέρονται στον αριθμό των δοντιών του γραναζιού και του πινιόν αντίστοιχα, N_a είναι οι φορές που παρατηρούμε ταυτόχρονη σύμπλεξη των ελαττωματικών πινιόν με τα σπασμένα δόντια για ένα δεδομένο συνδυασμό δοντιών που αντιστοιχεί στο ελάχιστο κοινό πολλαπλάσιο του αριθμού των δοντιών σε κάθε γρανάτζι.

$$\text{Hunting Tooth Frequency} = \frac{\text{GMF} \times N}{(\text{no. of pinion teeth}) \times (\text{no. of gear teeth})}$$

Σ αυτό του είδους τις βλάβες εμπίπτουν και οι λειάνσεις/ επιπεδοποιήσεις που παρουσιάζονται στην κατατομή του δοντιού. Όλες οι παραπάνω βλάβες που συνήθως προκαλούνται κατά την διαδικασία κατασκευής μπορούν να προκαλέσουν την εμφάνιση περισσότερων κάποιες φορές των 3 αρμονικών της GMF. Τα μικρά σημάδια στην επιφάνεια της κατατομής (ατέλειες που προκαλούνται από ένα ελαττωματικό κόπτη) δεν μπορούν να δημιουργήσουν όπως δημιουργούν τα μεγαλύτερα. Τέτοια σημάδια στην επιφάνεια του δοντιού μπορούν να προκαλέσουν αρμονικές υψηλότερες της GMF.

Υπενθυμίζουμε ότι αναλυτικά για τα είδη των βλαβών των γραναζιών αναφερόμαστε σε άλλο κομμάτι της παρούσας εργασίας.

Βιβλιογραφία:

- [1] Victor Wowk,- «Machinery vibration» Published by McGraw-Hill, Inc, 1991
- [2]Θ. Ν Κωστόπουλος ,Συμπληρωματικό Δ Τεύχος του μαθήματος συντήρησης μηχανών του 9 εξαμήνου της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, Δημήτρης Τσαντιώτης
- [4] «Φωτογραφίες φασμάτων συχνότητας σε οδοντωτούς τροχούς με βλάβη», Published in the internet <http://www.vibanalysis.co.uk/vibanalysis/gears/gears.html>
- [5] «Εισαγωγικό μέρος GMF», Published in the internet http://www.dliengineering.com/vibman/gloss_gearmeshfrequency1.htm

Κεφάλαιο 5ο

Παραγόμενες συχνότητες από τους κινητήρες:

5.1)Κραδασμοί κινητήρων

Το φάσμα δόνησης που παράγουν οι περιστρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές είναι όμοιο από πολλές απόψεις με το φάσμα δόνησης που παράγουν οι υπόλοιπες περιστρεφόμενες μηχανές, όμως διαφέρει στο ότι, εκτός από τις συχνότητες δόνησης που παράγονται από την ταχύτητα λειτουργίας και από τα περιστρεφόμενα ρουλεμάν, παράγεται και πλήθος άλλων συχνοτήτων δόνησης. Αυτές οι συχνότητες δημιουργούνται από τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που είναι σύμφυτες με την λειτουργία της μηχανής. Υπάρχουν ηλεκτρικά μηχανήματα τα οποία, ενώ τροφοδοτούνται με συχνότητα 50

Hz, παράγουν μηχανικούς κραδασμούς στα 100 Hz, 150Hz και γενικότερα στις αρμονικές των 50Hz. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται επίσης στους μετασχηματιστές ενέργειας και προκαλείται από τη διαστολή και κατάρρευση του μαγνητικού πεδίου στα ελάσματα σιδήρου των κινητήρων. Εάν ο κραδασμός των 100 Hz των κινητήρων είναι σημαντικός, τότε μπορούν να γίνουν οι παρακάτω κινήσεις :

- Απομόνωση του κινητήρα.
- Αλλαγή με ένα κινητήρα καλύτερης ποιότητας.
- Μετατροπή σε κινητήρα τριών φάσεων, αφού μπορεί να ισοσταθμιστεί καλύτερα ηλεκτρικά ώστε να αποδίδει ομαλότερη περιστροφή.
- Αντικατάσταση με δακτυλίους-ρουλεμάν κινητήρα .

Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι οι κραδασμοί που οφείλονται σε προβλήματα του ηλεκτρικού κυκλώματος των κινητήρων μπορούν να ελεγχθούν αποσυνδέοντας την ενεργειακή τροφοδότηση του μηχανήματος και παρατηρώντας εάν οι κραδασμοί και ο θόρυβος που δημιουργείται εξαφανίζονται αμέσως ή σταδιακά μειώνονται. Μια απότομη διακοπή των κραδασμών έπειτα από την αποσύνδεση, αποδεικνύει την ύπαρξη ηλεκτρικών κραδασμών. Αντιθέτως, εάν οι κραδασμοί εξακολουθούν να είναι έντονοι και σταδιακά μειώνονται καθώς ο στροφέας επιβραδύνει την περιστροφή του, τότε πρόκειται για μηχανικό πρόβλημα που αφορά την περιστροφή, όπως για παράδειγμα αζυγοσταθμία , κακή ευθυγράμμιση ή πρόβλημα στα ρουλεμάν.

5.2)Διπλάσια γραμμική συχνότητα δόνησης

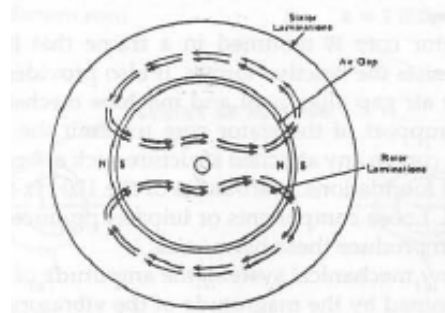
Η μαγνητική ροή που παράγεται από τους αγωγούς του ηλεκτρικού ρεύματος στις AC μηχανές εναλλάσσεται στη γραμμική συχνότητα. Η δύναμη που παράγεται από τη ροή μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της μαγνητικής ροής (ή αλλιώς το τετράγωνο της μαγνητικής πυκνότητας). Επομένως, αν η ροή δίνεται από τον τύπο $B=B_0 \sin \omega t$, τότε η δύναμη $F=(B)^2 = (B_0 \sin \omega t)^2$ και άρα $F=B^2 / 2 (1+\cos 2\omega t)$. Η δύναμη έχει μία σταθερά συνιστώσα (μία συνεχή συνιστώσα όπως δηλώνεται και από το 1) και μία δεύτερη συνιστώσα που είναι το διπλάσιο της γραμμικής συχνότητας όπως δηλώνεται από τον όρο $\cos 2\omega t$. Γι' αυτό το λόγο όλες οι AC μηχανές παράγουν διπλάσια γραμμική συχνότητα δόνησης. Σε συστήματα παροχής ισχύος που λειτουργούν στα 60Hz η συχνότητα δόνησης είναι 120Hz. (100 Hz στα συστήματα των 50Hz αντίστοιχα). Σε έναν επαγωγικό κινητήρα, οι πόλοι στο τύλιγμα του στάτη (δηλ. του επαγωγέα) παράγουν μία περιστρεφόμενη μαγνητική δύναμη η οποία επιδρά κατά μήκος του κενού αέρα που

παρεμβάλλεται ανάμεσα στο στάτορα(επαγωγέα) και στο ρότορα(επαγωγίμο). Αυτό δημιουργεί στον στάτορα δόνηση συχνότητας 120Hz, και ο τρόπος που διαμορφώνεται η κίνηση δόνησης του πυρήνα του στάτορα καθορίζεται από τον αριθμό των πόλων στο τύλιγμά του. Ο αριθμός των πόλων στο τύλιγμα και η γραμμική συχνότητα καθορίζουν επίσης και την σύγχρονη(δηλαδή την με τον ίδιο ακριβώς τρόπο μεταβαλλόμενη)ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και την ταχύτητα λειτουργίας του κινητήρα ή της γεννήτριας.

$$\text{RPM} = 7200 / \text{αριθμός πόλων (για ένα σύστημα των 60Hz)}$$

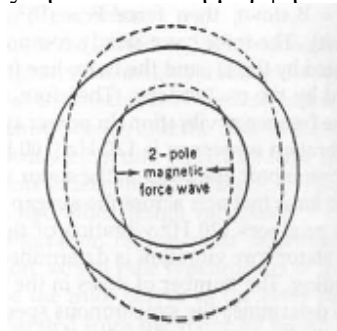
Σύμφωνα με τα παραπάνω, ένα τύλιγμα με δύο πόλους θα δημιουργεί έναν κινητήρα των 3600 RPM, ένα τύλιγμα 14 πόλων θα δημιουργεί έναν κινητήρα των 514 RPM, κ.ο.κ.

Ένα τύλιγμα με δύο πόλους έχει ένα βόρειο και ένα νότιο πόλο και παράγει ένα μαγνητικό πεδίο όπως αυτό του σχήματος 5.2Σ1.



Σχήμα 5.2Σ1: Απλή περίπτωση παραγόμενου μαγνητικού πεδίου από έναν κινητήρα 2 πόλων.

Η συγκέντρωση της μαγνητικής ροής οδηγεί στη δημιουργία μιας δύναμης η οποία παραμορφώνει το στάτορα προς την ελλειπτική μορφή που φαίνεται στο σχήμα 5.2Σ2.



Σχήμα 5.2Σ2: Παραμόρφωση του στάτορα λόγω μαγνητικής ροής

Το κύμα της διπολικής αυτής δύναμης παραμορφώνει τον στάτορα και διαμορφώνει ένα σχήμα με τέσσερα σημεία τομής μεταξύ των δύο καμπυλών, καθένα από τα οποία αποτελεί σημείο μηδενικής μαγνητικής απόκλισης και μηδενικής δόνησης. Εφόσον το μαγνητικό πεδίο είναι περιστρεφόμενο στα 3600 RPM, ο στάτορας παραμορφώνεται παίρνοντας το σχήμα περιστρεφόμενης έλλειψης. Οπτικοποιώντας επομένως τη διάταξη, αντιλαμβανόμαστε ότι ένα σημείο στήριξης του πυρήνα του στάτορα θα υποβαλλόταν σε δύο κύκλους δόνησης κατά τη διάρκεια ενός ολόκληρου κύκλου(δηλ. μιας περιόδου) της περιστρεφόμενης έλλειψης.

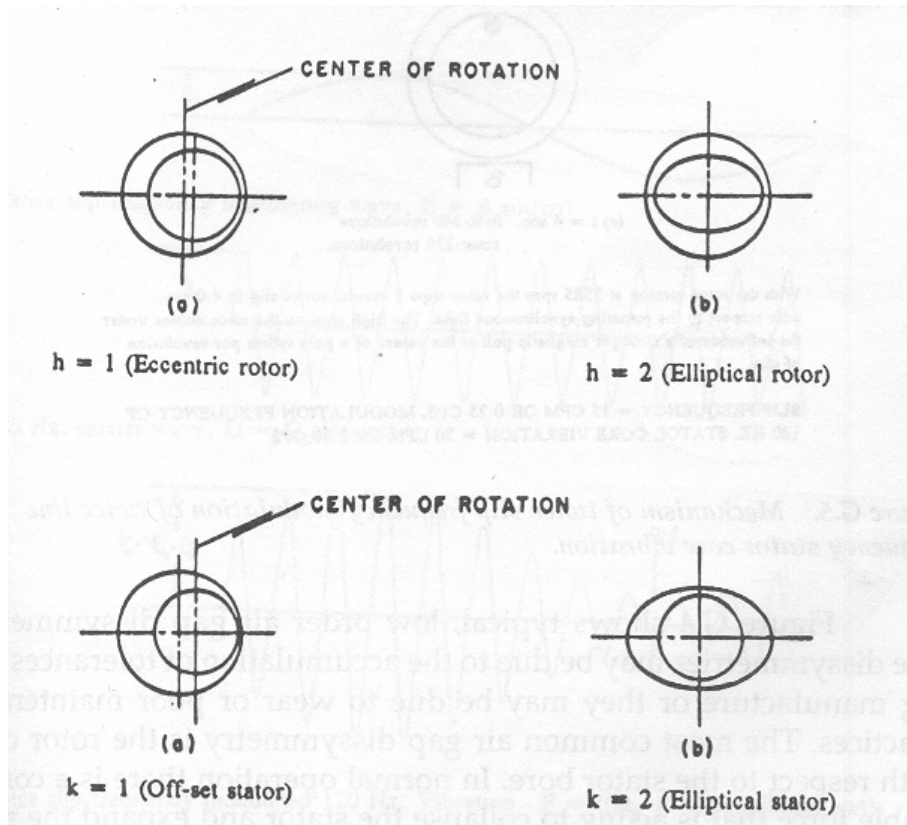
Με αντίστοιχο τρόπο ένας κινητήρας έξι πόλων στο τύλιγμα του στάτη θα δημιουργήσει ένα περιστρεφόμενο στα 1200RPM μαγνητικό πεδίο. Το κύμα της δύναμης των έξι πόλων θα διαμορφώσει στο στάτορα ένα σχήμα με 12 σημεία τομής μεταξύ των δύο καμπυλών.

Αν οι στάτορες με δύο και με έξι πόλους έχουν την ίδια διάμετρο, η περιφερειακή χορδή (το πολικό βήμα) θα είναι διαφορετικό για κάθε πόλο. Το πολικό βήμα του τυλίγματος με δύο πόλους θα ισούται με την περιφέρεια διαιρεμένη δια 2, ενώ το πολικό βήμα του τυλίγματος με έξι πόλους θα ισούται με την περιφέρεια διαιρεμένη δια 6. Παρόμοια, η απόσταση μεταξύ των σημείων τομής των δύο καμπυλών στην διαδρομή της κίνησης που προκαλείται από τη δόνηση θα είναι διαφορετικά. Εδώ η απόσταση μεταξύ των σημείων τομής των δύο καμπυλών θα ισούται με την περιφέρεια διαιρεμένη δια 4 και δια 12 για τους στάτορες με 2 και 6 πόλους αντίστοιχα. Αυτή είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος που πρέπει να λάβουμε υπόψιν, καθότι η (μαγνητική) απόκλιση του πυρήνα του στάτορα είναι ανάλογη με την ανάκλαση μιας δέσμης ηλεκτρονίων.

Ο πυρήνας του στάτορα εδράζεται σε ένα πλαίσιο το οποίο συγκρατεί τον ίδιο τον πυρήνα και παράλληλα αντιτίθεται στην αντιδραστική ροπή στρέψης. Επίσης συντελεί στη διαμόρφωση της απαραίτητης δομής για την διατήρηση του ευθυγραμμισμένου διάκενου αέρος και της μηχανικής ακεραιότητας της μηχανής. Τα σημεία στήριξης του πυρήνα του στάτορα μεταδίδουν την ακτινική δόνηση των 120 Hz του πυρήνα σε οποιαδήποτε προσαρτημένη σε αυτόν κατασκευή, όπως είναι π.χ. τα υποστηρίγματα των ρουλεμάν, τα περιβλήματα και τα θεμέλια-βάσεις στήριξης της διάταξης. Μερικές φορές μπορεί να καταγραφούν και αρμονικές των 120Hz. Αυτές οι αρμονικές μπορεί να παράγονται από χαλαρά συνδεδεμένα εξαρτήματα ή ως αντίκτυπο εξαρτημάτων που δονούνται.

Όπως σε κάθε μηχανικό σύστημα, το πλάτος της παραγόμενης δόνησης καθορίζεται από το μέγεθος της δύναμης που προκαλεί τη δόνηση και από τα χαρακτηριστικά δυναμικής απόκρισης του συστήματος. Ο διαχωρισμός μεταξύ των συχνοτήτων φόρτισης και συντονισμού είναι πολύ βασικός για να μπορέσουμε να αντιληφθούμε δονήσεις ή ήχους χαμηλών επιπέδων. Οι πυρήνες του στάτορα συνήθως χρειάζεται να είναι παχείς δακτύλιοι και ως τέτοιοι διαθέτουν πλήθος συχνοτήτων συντονισμού. Η πρώτη τάξης συχνότητα συντονισμού του δακτυλίου έχει τέσσερα σημεία τομής μεταξύ των δύο καμπυλών και το ελλειπτικό σχήμα που περιγράφηκε παραπάνω. Όσο η τάξη της συχνότητας συντονισμού αυξάνεται, τόσο αυξάνονται και τα σημεία τομής μεταξύ των δύο καμπυλών: 6,8,10,...24...56, κλπ. Για ένα συγκεκριμένο μέγεθος δακτυλίου, η συχνότητα συντονισμού αυξάνεται όσο αυξάνονται τα σημεία τομής μεταξύ των δύο καμπυλών. Οι συχνότητες συντονισμού του δακτυλίου αποτελούν συνάρτηση της διαμόρφωσης του τρόπου λειτουργίας, της διαμέτρου του ουδέτερου άξονα, η ροπή αδράνειας της χρήσιμης ή καθαρής διατομής, του μέτρου ελαστικότητας του υλικού, κλπ. Για μια συγκεκριμένη λειτουργική διαμόρφωση, όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του στάτορα, τόσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα συντονισμού. Επίσης για ένα συγκεκριμένο μέγεθος μηχανής, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των σημείων τομής μεταξύ των δύο καμπυλών στο δυναμικό κύμα, τόσο χαμηλότερη θα είναι η απόκριση δόνησης σε αυτό. Μηχανές μεγάλης ταχύτητας είναι πολύ πιθανότερο να παράγουν δονήσεις σε υψηλά επίπεδα της τάξεως των 120Hz απ' ό,τι μηχανές χαμηλής ταχύτητας.

Σε όλη την παραπάνω θεώρηση υποθέσαμε ότι το διάκενο αέρος είναι ομοιόμορφο. Σε πραγματικές συνθήκες το διάκενο αέρος δεν είναι ποτέ τελείως ομοιόμορφο και μάλιστα σε βαθμό κάποιων μοιρών αυτό είναι ασύμμετρο.



Σχήμα 5.2Σ3: Ασυμμετρίες του διακένου αέρος ανάμεσα σε στάτορα και ρότορα.

Το σχήμα 5.2Σ3 δείχνει τυπικές, χαμηλής τάξης ασυμμετρίες του διακένου αέρος. Οι ασυμμετρίες αυτές μπορεί να οφείλονται στη συσσώρευση σφαλμάτων σε ορισμένα μεγέθη κατά την κατασκευή, τα οποία βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων τιμών σφάλματος και δεν διορθώθηκαν, ή στη φθορά ή ακόμη και σε κακές πρακτικές συντήρησης. Η πιο συνηθισμένη ασυμμετρία διακένου αέρος είναι η μετατόπιση του στάτορα σε σχέση με την εσωτερική του διάμετρο. Στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας, υπάρχει μια σημαντική δύναμη που με την επίδρασή της τείνει να (κάμψει) παραμορφώσει τον στάτορα και να επεκτείνει τον ρότορα. Η δύναμη αυτή μπορεί να κυμαίνεται ακόμη και γύρω στο εύρος των $2.46 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^2$. Η δύναμη αυτή αποτελεί συνάρτηση της πυκνότητας μαγνητικής ροής του διακένου αέρος καθώς επίσης και του μήκους του διακένου. Όσο μικρότερο είναι το διάκενο αέρος, τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη. Εάν ο ρότορας έχει υποστεί κάποια μετατόπιση στην εσωτερική διάμετρο του στάτορα, δημιουργείται μια μη εξισορροπημένη μαγνητική δύναμη η οποία τείνει να ενώσει το στάτορα με το ρότορα. Μάλιστα σε κάποιες καταστάσεις αυτό εν τέλει συμβαίνει, και τότε ο ρότορας τρίβεται πάνω στο στάτορα με αποτέλεσμα σοβαρές- αν όχι καταστροφικές βλάβες.

Η μη εξισορροπημένη μαγνητική δύναμη είναι μία σταθερή ή αλλιώς συνεχής δύναμη, όμως διαθέτει επίσης και μία συνιστώσα των 120Hz. Το μέτρο και η σπουδαιότητα της συνιστώσας αυτής αποτελούν συνάρτηση του μέτρου της μη εξισορροπημένης μαγνητικής δύναμης και του αριθμού των πόλων στο τύλιγμα. Όπως θα μπορούσε κανείς και διαισθητικά να υποθέσει, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των πόλων, τόσο μικρότερη και λιγότερο σημαντική θα καθίσταται η συνισταμένη των

120Hz. Η μη εξισοροπημένη μαγνητική δύναμη εξαρτάται από το μέγεθος, τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά στη σχεδίαση της μηχανής και από το μέγεθος της ασυμμετρίας του αέριου διάκενου. Σε μεγάλες μηχανές, η συνεχής συνιστώσα μπορεί να είναι και τάξεως αρκετών χιλιάδων κιλών.

Η συνιστώσα των 120Hz δημιουργεί μια διαδρομή δόνησης με δύο σημεία τομής μεταξύ των δύο καμπυλών. Με την επίδρασή της προκαλεί την δόνηση του ρότορα και του στάτορα με τρόπο μπρος-πίσω. Αυτό μπορεί πολλές φορές να οδηγήσει σε εκτεταμένη δόνηση, ειδικά σε κατακόρυφες μηχανές.

Αν η ασυμμετρία του αέριου διάκενου προκαλείται από το ρότορα, θα εμφανιστεί μια διαφορετική συμπεριφορά. Για π.χ., αν η άτρακτος του ρότορα σε έναν επαγωγικό κινητήρα είναι έκκεντρη σε σχέση με το κέντρο της περιστροφής του, το σημείο με το ελάχιστο αέριο διάκενο θα περιστρέφεται με την ταχύτητα του ρότορα, η οποία είναι μικρότερη από την σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου. (Επίσης μια σπασμένη μπάρα στο ρότορα θα μπορούσε να παράγει μια μαγνητική ασυμμετρία που θα οδηγούσε στο ίδιο φαινόμενο). Καθώς το σημείο με το ελάχιστο αέριο διάκενο περιστρέφεται, ολισθαίνει πέρα από τους μαγνητικούς πόλους. Στο κέντρο των πόλων η μαγνητική έλξη θα είναι μέγιστη, ενώ ανάμεσα στους πόλους θα είναι ελάχιστη, όπως φαίνεται στην εικόνα.

Αυτό προκαλεί μία διαμόρφωση πλάτους στην μεγέθους 120Hz δόνηση του πυρήνα.

Αυτή είναι και η αιτία του τυπικού παλμικού ήχου ή της δόνησης που συχνά συνδέεται με τους μεγάλους επαγωγικούς κινητήρες δύο πόλων και 3600 RPM.

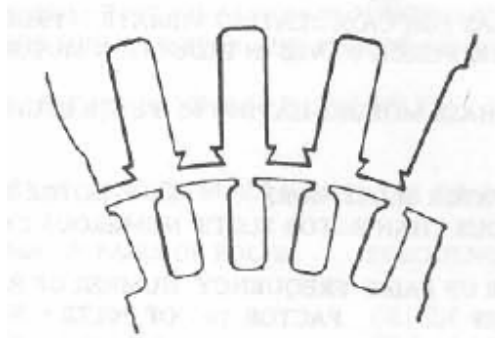
Οι αγωγοί που φέρουν ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργούν τα δικά τους μαγνητικά πεδία και τις αντίστοιχες δυνάμεις των 120Hz που μπορούν να προκαλέσουν τη δόνηση παρακείμενων μαγνητικών εξαρτημάτων. Για π.χ., διαφράγματα αέρα που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τα τυλίγματα του στάτορα μπορεί να δονηθούν σε μεγάλο βαθμό. Αντίστοιχα προβλήματα κατά την εκκίνηση των κινητήρων μπορεί να εμφανίσουν και οι ανεμιστήρες του ρότορα.

Τα τυλίγματα του στάτορα είναι αγωγοί που φέρουν ηλεκτρικό ρεύμα μέσα σε μαγνητικά πεδία και ως τέτοιοι υφίστανται σχετικά υψηλών επιπέδων δυνάμεις των 120Hz. Τυλίγματα που έχουν στυλωθεί και υποστηριχθεί με τον κατάλληλο τρόπο δεν θα δονηθούν εκτεταμένα, όμως χαλαρά τοποθετημένα τυλίγματα μπορεί να δονηθούν σε μεγάλο βαθμό και να υποστούν βλάβες λόγω γδαρσίματος (απόξεσης) της μόνωσής τους ή καταπόνησης των αγωγών.

Μεταβολές του μεγέθους των δονήσεων των 120Hz μπορεί να αποτελούν προειδοποιητικά σημάδια που υποδηλώνουν ότι κάποιο από τα εξαρτήματα της κατασκευής έχει αρχίσει να χαλαρώνει (λασκάρει) και ότι χρειάζεται κάποια επιδιορθωτική εργασία. Χαλαρά εξαρτήματα που οδηγούνται σε δόνηση από δυνάμεις των 120Hz μπορεί να δημιουργήσουν αντίκτυπο που παράγει δόνηση πλούσια σε αρμονικές των 120Hz.

5.3) Δόνηση των επαγωγικών κινητήρων στη συχνότητα που παράγεται κατά την ύπαρξη εγκοπών στις επιφάνειες του στάτορα:

Τα τυλίγματα του στάτορα δημιουργούν μια μαγνητεγερτική δύναμη (MMF, το μαγνητικό ανάλογο της ηλεκτρεγερτικής δύναμης) η οποία δημιουργεί τη μαγνητική ροή που κινεί τον κινητήρα. Εκτός από τη βασική μαγνητική ροή στη γραμμική συχνότητα, τα τυλίγματα παράγουν επίσης αρμονικές στη γραμμική συχνότητα (αρμονικές χωρικής ζώνης και ζώνης φάσης καθώς και αρμονικές κορεσμού). Η παρουσία εγκοπών στις επιφάνειες του στάτορα και του ρότορα δημιουργούν διακυμάνσεις στην ευκολία μαγνητικής διαπερατότητας στο διάκενο αέρος.



Σχήμα 5.3Σ1: Τυπική μορφή εγκοπών του ρότορα και του στάτορα.

Το σχήμα 5.3Σ1 δείχνει τυπικές εγκοπές στο ρότορα και στο στάτορα. Η μαγνητική ροή στο διάκενο αέρος δίνεται από τον πολλαπλασιασμό της MMF επί την ευκολία μαγνητικής διαπερατότητας. Οι δυνάμεις που ασκούνται κατά μήκος του αέριου διακένου είναι συνάρτηση του τετραγώνου της πυκνότητας μαγνητικής ροής. Οι διακυμάνσεις στη MMF και στην ευκολία μαγνητικής διαπερατότητας υποδεικνύονται από μια σειρά ημιτονοειδών και συνημιτονοειδών κυμάτων, όπως μπορεί να συμβεί και με τα δυναμικά κύματα. Οι μαθηματικοί υπολογισμοί είναι πολύ επίπονοι και καταλήγουν σε μεγάλο αριθμό δυναμικών κυμάτων, τα οποία έχουν ευρεία ποικιλία συχνοτήτων και πολλούς διαφορετικούς αριθμούς πόλων. Οι σειρές αποτελεσμάτων μπορούν να μειωθούν σημαντικά, αν απορρίψουμε όλα τα δυναμικά κύματα εκτός από αυτά που διαθέτουν έναν μικρό αριθμό πόλων (σχετικά μικρό πολικό βήμα). Η απόκριση του πυρήνα του στάτορα όταν το πολικό βήμα είναι πολύ μικρό είναι η ελάχιστη, οπότε δεν παράγεται καμία σημαντική δόνηση.

5.4) Συχνότητες συντονισμού του πυρήνα του στάτορα:

Το επίπεδο της δόνησης ή του ήχου που θα παράγει καθένα από το πλήθος των κυμάτων της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης εξαρτάται από το μέγεθος του κύματος δύναμης αλλά, επίσης και από τα χαρακτηριστικά δυναμικής απόκρισης του πυρήνα του στάτορα. Το πλάτος των περισσοτέρων κυμάτων δύναμης είναι αρκετά μικρό. Η εκτεταμένη δόνηση είναι συχνά το αποτέλεσμα της σύμπτωσης ή της σχεδόν σύμπτωσης της συχνότητας ενός κύματος δύναμης με μία συχνότητα συντονισμού του πυρήνα του στάτορα. Η ενίσχυση του συντονισμού είναι περισσότερο σημαντική όταν ο αριθμός των πόλων στο κύμα δύναμης ταυτίζεται με το σχήμα της διαδρομής της συχνότητας συντονισμού. Για παράδειγμα όταν το κύμα δύναμης που έχει 12 πόλους και η συχνότητά του ταυτίζονται με την συχνότητα συντονισμού του πυρήνα ενός στάτορα που έχει 12 πόλους. Ο υπολογισμός των συχνοτήτων συντονισμού του πυρήνα ενός στάτορα είναι δύσκολος και ανακριβής σε πολλές περιπτώσεις λόγω των πολλών μεταβλητών που σχετίζονται με αυτό. Επιπλέον, μηχανικές ασυμμετρίες στον πυρήνα ή στο πλαίσιο του στάτορα μπορεί να παράγουν αρκετές συχνότητες συντονισμού με την ίδια μορφή. Όπως σε κάθε μηχανικό σύστημα η συχνότητα συντονισμού είναι μία συνάρτηση της τετραγωνικής ρίζας του λόγου της ακαμψίας προς την μάζα του εκάστοτε συστήματος. Ο πυρήνας του στάτορα συνίσταται από το γιοκ, ένα πηνίο που βρίσκεται τοποθετημένο γύρω από τον μαγνητικό σωλήνα και έχει ως σκοπό την εκτροπή της δέσμης των ηλεκτρονίων, το οποίο στην ουσία αποτελεί ένα κύλινδρο με παχιά τοιχώματα ο οποίος έχει εγκοπές στην εσωτερική διάμετρο. Οι εγκοπές συγκρατούν τα τυλίγματα. Τα τυλίγματα και τα δόντια που σχηματίζονται από τις εγκοπές προσδίδουν μάζα αλλά όχι απαραίτητα και την ανάλογη ακαμψία στον πυρήνα. Επιπλέον, η ακαμψία του πλαισίου στο οποίο εδράζεται ο πυρήνας και η μέθοδος της συγκράτησης του πυρήνα στο πλαίσιο αποτελούν ακόμα μερικές δύσκολα υπολογίσιμες μεταβλητές. Λόγω της φύσης αυτών των μεταβλητών, αυτές μπορεί να αλλάξουν μετά από ένα χρονικό διάστημα λόγω της επίδρασης της θερμοκρασίας, της φθοράς, του γδαρσίματός τους κλπ γεγονός που προκαλεί αλλαγή στην δόνηση του κινητήρα. Η ακαμψία του πυρήνα είναι συνάρτηση εκτός των άλλων του μέτρου ελαστικότητας του υλικού του πυρήνα. Ο πυρήνας φτιάχνεται από ελάσματα πυριτιούχου ατσαλιού(ημιαγώγιμο υλικό). Αναλόγος με το μέγεθος του κινητήρα, την ηλικία και τον κατασκευαστή τα ελάσματα μπορεί να είναι είτε μονοκόμματοι ολοκληρωμένοι κύκλοι, είτε, κυκλικά τμήματα που συνενώνονται έτσι ώστε να σχηματίσουν έναν ολοκληρωμένο κύκλο. Στην δεύτερη περίπτωση πυρήνα που προαναφέραμε, το ενεργό μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται αναλογα με την αξονική πίεση που συγκρατεί τα ελάσματα μεταξύ τους. Επομένως, καθώς ο πυρήνας και οι διατάξεις σύσφιξης χαλαρώνουν με τον χρόνο και την θερμοκρασία, το εναργό μέτρο ελαστικότητας προφανώς μειώνεται και αυτό χαμηλώνει με την σειρά του τις συχνότητες συντονισμού. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί γιατί η δόνηση και ο ήχος που παράγονται από έναν κινητήρα μπορεί να αλλάξει ,ενώ όλα τ'άλλα παραμένουν τα ίδια. Μια αύξηση στις παραγόμενες συχνότητες από τον πυρήνα μπορεί να παρατηρηθεί αν ο κινητήρας συμπίεστεί ή αν εμποτιστεί σε συνθήκες υπόπιασης με ρυτίνη όπου, σε τέτοιες περιπτώσεις τα ελάσματά του κινητήρα τείνουν να συνενώνονται μεταξύ τους για να αυξάνουν την ακαμψία του συνόλου. Αλλαγές μπορούν ακόμα να δημιουργηθούν όταν τα τυλίγματα του στάτορα αντικαθίστανται με τυλίγματα που έχουν διαφορετικές ιδιότητες από τα αρχικά. Για παράδειγμα αντικαθιστώντας ένα αρχικό τύλιγμα που είχε μαλακή μόνωση χωρίς την θεραπεία εμποτισμού υποπίεση, με ένα τύλιγμα εμποτισμένο

υπόπωση με μία πολύ δυνατή ρυθμική θα προσδώσει στον στάτορα διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η καλύτερη σύζευξη μεταξύ των τυλιγμάτων και του πυρήνα, αυξάνουν την ενεργό μάζα του πυρήνα , όμως η καλύτερη γέμιση των εγκοπών μπορεί να αυξήσει την ενεργό ακαμψία. Ο αποχωρισμός του πυρήνα από το πλαίσιο μπορεί να αλλάξει σημαντικά τα χαρακτηριστικά του συστήματος πυρήνα πλαισίου καθώς και των παραγόμενων συχνοτήτων αυτών.

Βιβλιογραφία:

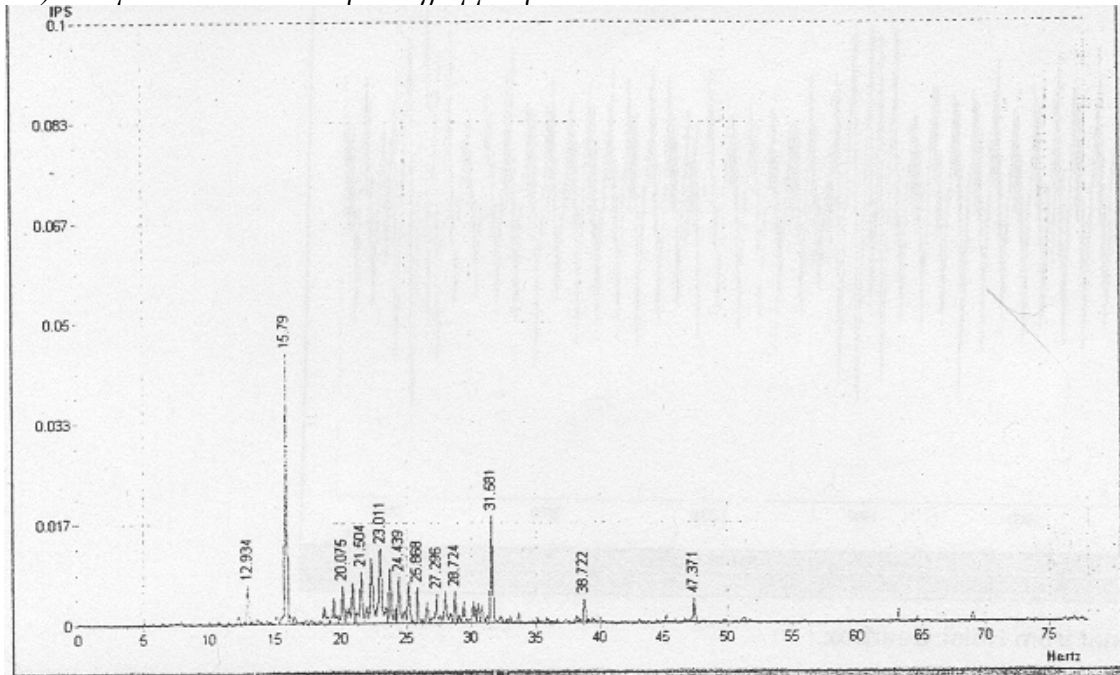
[1] Steve Goldman, P.E,- «Vibration Spectrum Analysis», Second Edition, Published by Industrial Press, Inc, 1999.

[2] Διπλωματική εργασία με θέμα «Διάγνωση βλαβών σε περιστρεφόμενα στοιχεία μηχανών», *Τσαντιώτης Δημήτρης, Αθήνα 2005.*

Κεφάλαιο 6ο

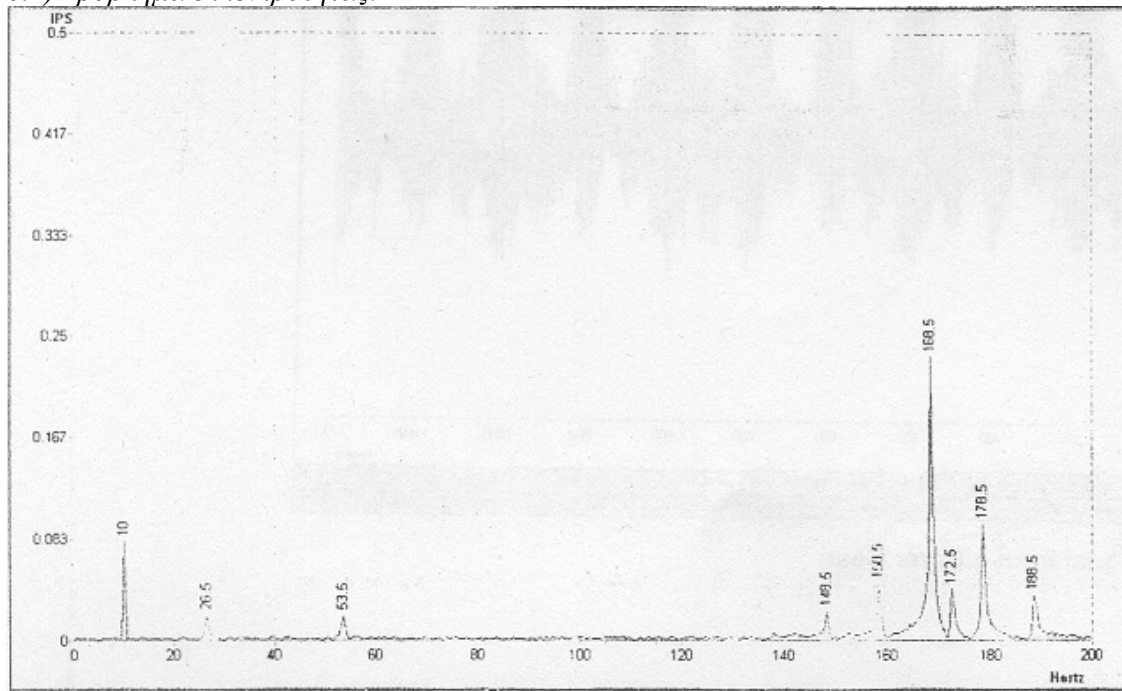
Χαρακτηριστικά π.χ φασμάτων κραδασμών:

6.1) Σπασμένο δόντι & Κακή ευθυγράμμιση:



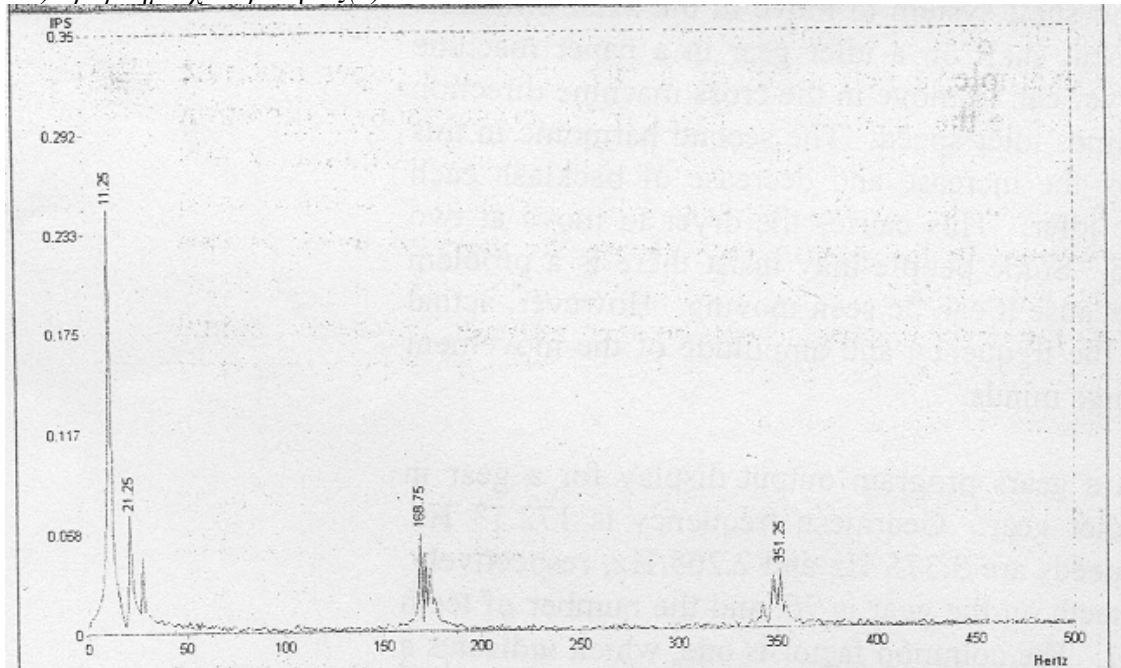
Απεικονίζει ένα φάσμα εύρους 78Hz. Η φασματική γραμμή στα 12,93Hz είναι η GMF του δεύτερου ενδιάμεσου άξονα και των γραναζιών του άξονα εξόδου. Λόγω του χαμηλού πλάτους της GMF και των πλευρικών ζωνών δεν υποδηλώνεται κάποιο πρόβλημα. Αξίζει να σημειώσουμε ότι, η GMF, 45,23Hz μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης ατράκτου, δεν είναι παρούσα. Αυτό υποδηλώνει ότι σε εκείνο το σημείο βρίσκονται ένα καλό ζεύγος συμπλεκόμενων γραναζιών που δεν παράγει την GMF. Η διαφορά συχνότητας μεταξύ των φασματικών γραμμών ανάμεσα απ' τα 18,65Hz και 30,15Hz είναι περίπου 0,72 Hz. Αυτή είναι η ταχύτητα περιστροφής της δεύτερης ατράκτου. Η φασματική γραμμή με το μεγαλύτερο πλάτος στα 22,93Hz είναι η κεντρική συχνότητα της φυσικής συχνότητας που διεγείρεται από ένα σπασμένο δόντι σε ένα από τα γρανάζια στην δεύτερη άτρακτο. Ωστόσο, πριν να μπορέσουμε να αποφανθούμε για κάποιο σπασμένο δόντι σ' ένα από τα γρανάζια στην δεύτερη άτρακτο, θα πρέπει να εμφανίζεται κάποιος παλμός στο χρονικό σήμα. Οι τρεις πρώτες αρμονικές της ταχύτητας του κινητήρα είναι διακριτές και προσεγγίζουν τα 6dB ανά αρμονική. Αυτό υποδεικνύει σε κάποιο βαθμό κακή ευθυγράμμιση μεταξύ ενός ή και των δύο κινητήρων και του άξονα εισόδου. Η κακή ευθυγράμμιση είναι δυνατόν να ταυτοποιηθεί σ αυτά τα χαμηλά πλάτη. Εάν η κακή ευθυγράμμιση αναγνωριζόταν και διορθωνόταν σ αυτό το σημείο, η δυνατότητα συντήρησης και η αξιοπιστία του μηχανισμού θα βελτιωνόταν.

6.2) Πρόβλημα εκκεντρότητας:



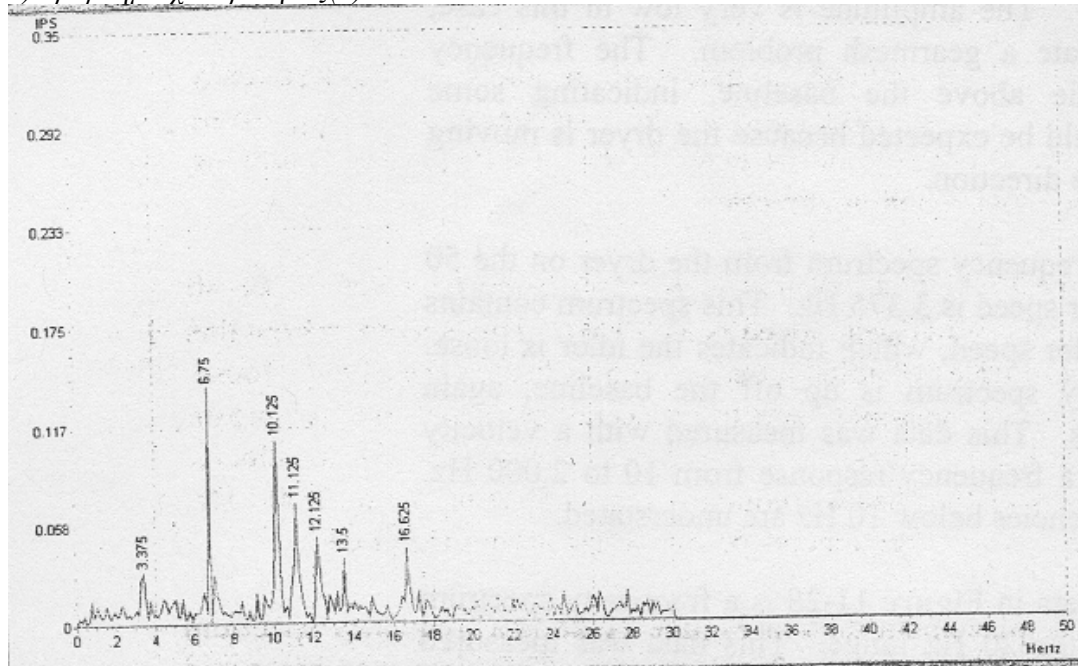
Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει ένα φάσμα συχνοτήτων ενός γραναζιού, στο οποίο μπορεί κανείς εύκολα να ξεχωρίσει πέντε διακριτές αιχμές. Το γρανάζι έχει 84 δόντια και περιστρέφεται με 2,008Hz. Η GMF είναι $2,008 \cdot 5 = 10\text{Hz}$. Η φασματική γραμμή επομένως βρίσκεται στα 10Hz. Επίσης, πρέπει να σημειώσουμε ότι η GMF έχει μία φασματική γραμμή στο άνω τμήμα στα 178,7 και στα 188,67 με συχνότητα διαφοράς λοιπόν 10Hz. Αυτό υποδηλώνει ότι το γρανάζι είναι εκκεντρο. Οι πλευρικές ζώνες των 10Hz είναι παρούσες στο κάτω τμήμα της GMF. Το πλάτος σ' αυτές τις πλευρικές ζώνες είναι μικρότερο. Οι αιχμές στα 26,5Hz και 53,5Hz προκαλούνται από ένα μικρό ελάττωμα στο ρουλεμάν.

6.3) Πρόβλημα χαλαρότητας(1):



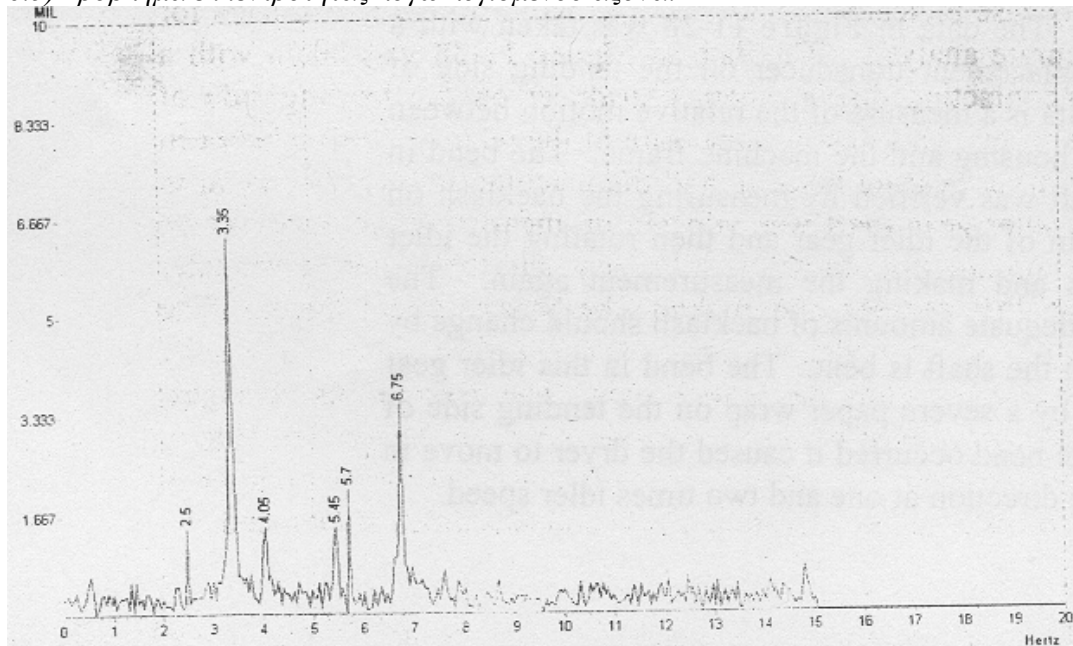
Το παραπάνω φάσμα συχνοτήτων είναι εύρους 500Hz. Σημειώνουμε ότι η φασματική γραμμή στα 171,67Hz είναι η GMF. Το πλάτος της είναι πολύ μικρό σ αυτή την περίπτωση και δεν υποδηλώνει πρόβλημα στην σύμπλεξη των δοντιών του γραναζιού. Το φάσμα συχνοτήτων είναι λίγο ψηλότερα από την γραμμή βάσης, γεγονός που υποδεικνύει καποια χαλαρότητα.

6.4) Πρόβλημα χαλαρότητας(2):



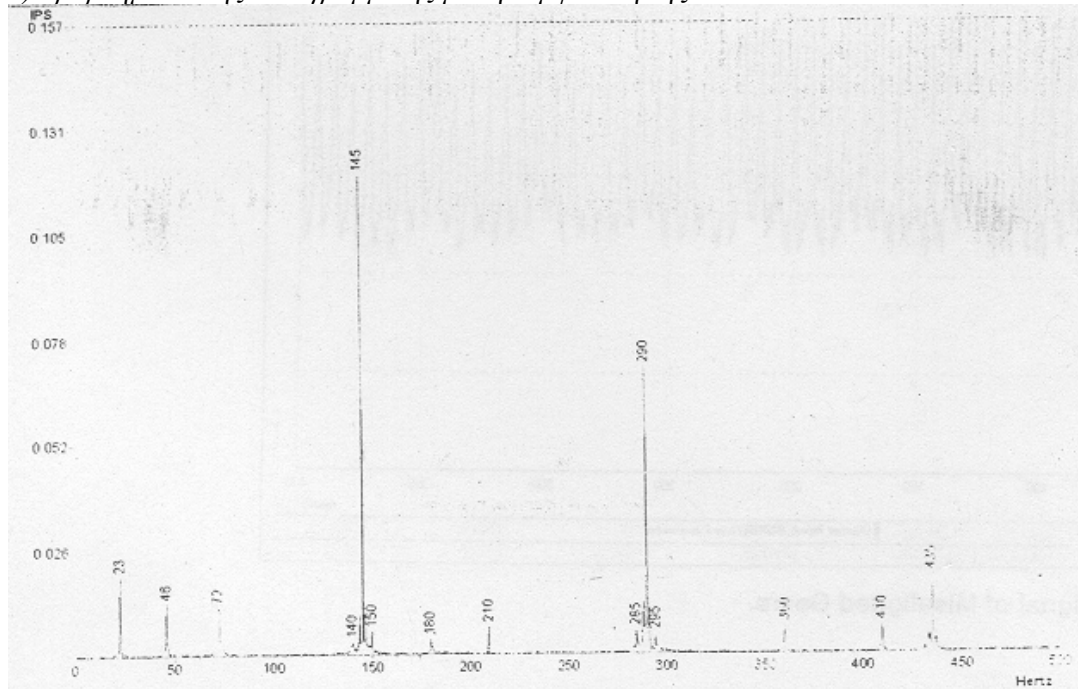
Είναι ένα φάσμα συχνοτήτων εύρους 50 Hz. Η ταχύτητα του ενδιάμεσου γραναζιού είναι 3,375Hz. Το φάσμα περιλαμβάνει πέντε πολλαπλάσια της ταχύτητας ενδιάμεσου γραναζιού, γεγονός που υποδηλώνει ότι το ενδιάμεσο γρανάζι είναι χαλαρό. Επίσης, το φάσμα συχνοτήτων είναι πάνω και κάτω από την γραμμή βάσης, υποδεικνύοντας για άλλη μια φορά χαλαρότητα. Αυτά τα δεδομένα μετρήθηκαν με έναν μεταλλάκτη ταχύτητας με απόκριση συχνότητας από 10 έως 2000Hz. Γι' αυτό το λόγο όλες οι συχνότητες κάτω από τα 10 Hz υποτιμούνται(παρουσιάζονται μικρότερες).

6.5) Πρόβλημα εκκεντρότητας λόγω λυγισμένου άξονα:



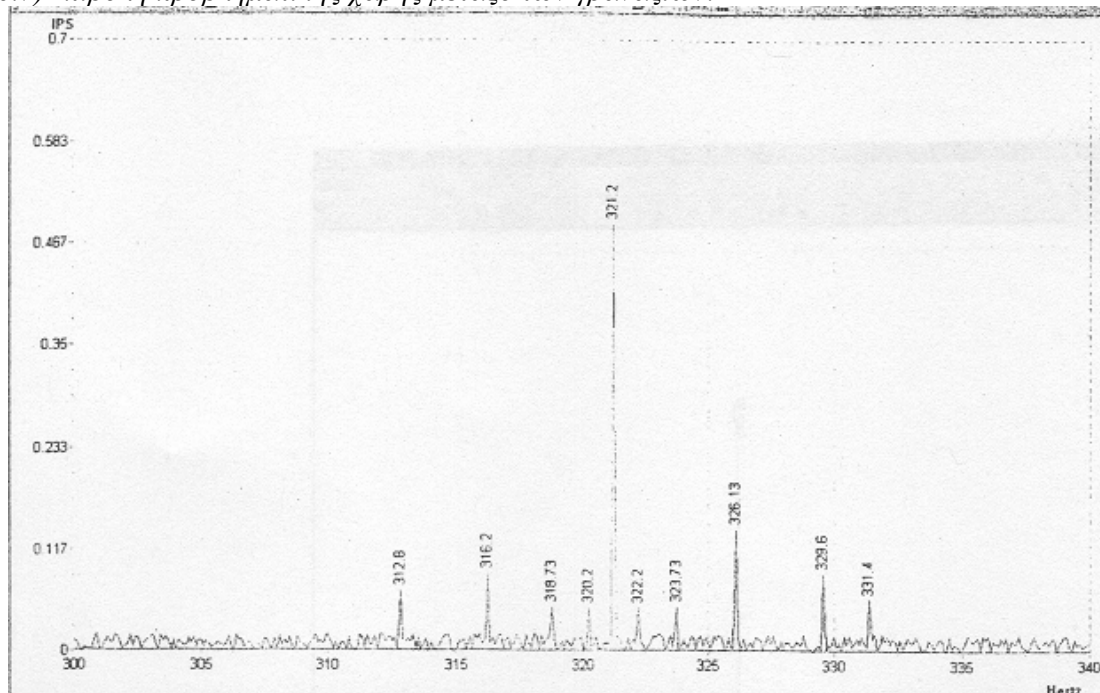
Τα δεδομένα μετατόπισης στην παραπάνω εικόνα είναι ένα φάσμα εύρους 20Hz. Τα δεδομένα αυτά μετρήθηκαν με έναν μεταλλάκτη μετατόπισης που έχει μία απόκριση συχνότητας από 0 έως περίπου 1000Hz. Αυτή είναι μία μέτρηση σχετικής κίνησης μεταξύ του πλαισίου της μηχανής και της φωλιάς του ρουλεμάν στην αξονική κατεύθυνση. Το φάσμα συχνοτήτων είναι πάνω και κάτω από την γραμμή βάσης, γεγονός που υποδηλώνει χαλαρότητα. Ωστόσο, η πρώτη και η δεύτερη αρμονική της ενδιάμεσης ταχύτητας είναι διακριτές. Αυτό υποδηλώνει ότι το ενδιάμεσο γρανάζι εδράζεται πάνω σ' ένα λυγισμένο άξονα(πρόβλημα εκκεντρότητας). Αυτή η περίπτωση υποδεικνύει την ανάγκη χρησιμοποίησης δύο διαφορετικών μεταλλακτών για ακριβείς αναλύσεις. Τα δεδομένα που πάρθηκαν για την εξαγωγή του παραπάνω σχήματος, προέκυψαν με έναν μεταλλάκτη μετατόπισης χωρίς επαφή(noncontacting displacement transducer). Αυτά τα δεδομένα είναι μια μέτρηση της σχετικής κίνησης μεταξύ της φωλιάς του ρουλεμάν και του πλαισίου της μηχανής. Ο λυγισμός του άξονα του ενδιάμεσου γραναζιού επαληθεύτηκε με την μέτρηση της χάρης μεταξύ των κατατομών στην κορυφή και στη βάση του ενδιάμεσου γραναζιού και με την μετέπειτα περιστροφή του ενδιάμεσου γραναζιού κατά 180° και την επανάληψη της μέτρησης. Τα υπερβολικά και τα ανεπαρκή ποσά χάρης μεταξύ των κατατομών θα έπρεπε να μεταβληθούν κατά 180° εάν ο άξονας είναι λυγισμένος.

6.6) Πρόβλημα κακής ευθυγράμμισης με την εμφάνιση της $1 \frac{1}{2} X GMF$:



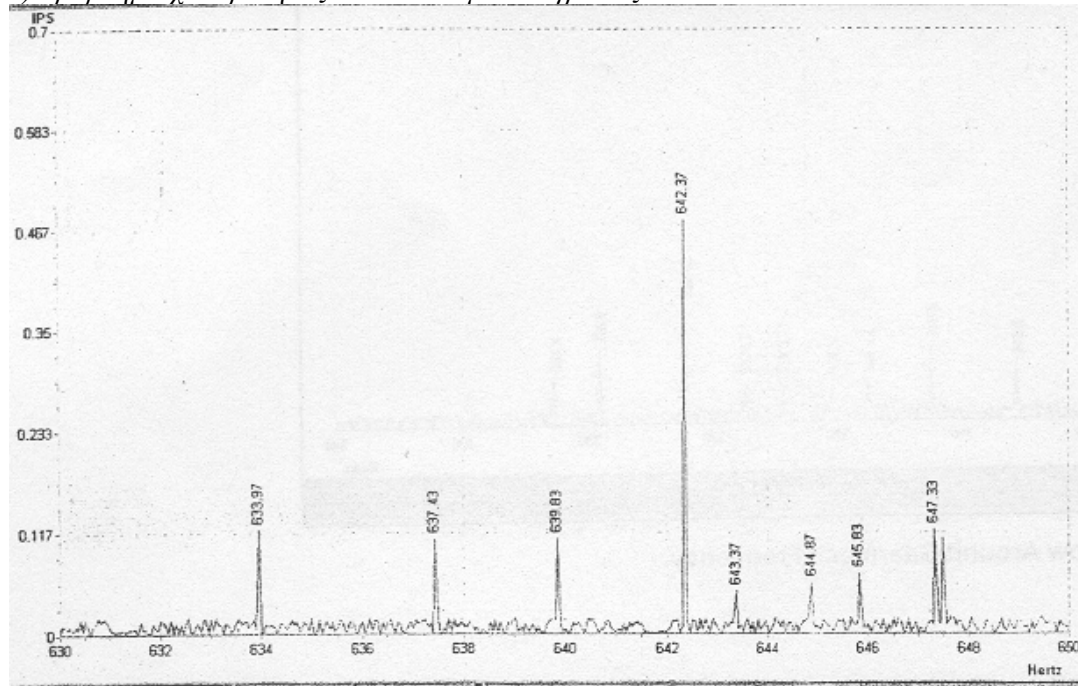
Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται ένα φάσμα συχνοτήτων κακώς ευθυγραμμισμένων γραναζιών. Το γρανάκι έχει 77 δόντια και η ταχύτητα περιστροφής είναι 1,883Hz. Τότε, η GMF είναι $77 \cdot 1,883 = 144,99\text{Hz}$. Είναι ορατές πέντε αρμονικές και η $1 \frac{1}{2}$ της GMF. Το πλάτος στις πρώτες τρεις αρμονικές προσεγγίζει τα 6dB ανά αρμονική. Η τέταρτη και η πέμπτη αρμονική δεν είναι ορατές στο εύρος των 500Hz και άρα δεν φαίνεται να υπάρχει περίπτωση λειάνσεων/ επιπεδοποιήσεων ή κατασκευαστικών σφαλμάτων διαμόρφωσης που οφείλονται στα κοπτικά εργαλεία. Σε κάθε φασματική γραμμή, η συχνότητα είναι στενού/περιορισμένου εύρους και περιλαμβάνει πλευρικές ζώνες όπως αυτές παρουσιάζονται στο φάσμα. Η συχνότητα διαφοράς είναι η ταχύτητα του γραναζιού. Πρέπει να αναφέρουμε ότι αυτή είναι μια περίπτωση όπου εμφανίζεται η διαμόρφωση διπλών πλευρικών ζωνών(DBS).

6.7) Επιβολή προβληματικής χάρης μεταξύ των γραναζιών:



Παραπάνω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα εύρους 40 Hz γύρω από την GMF. Η συχνότητα διαφοράς μεταξύ 321,2 και 323,7Hz είναι περίπου η συχνότητα περιστροφής του γραναζιού (περίπου 2,5Hz). Η συχνότητα διαφοράς μεταξύ 321,2 και 326,1Hz και 321,2 και 316,2Hz είναι περίπου 5Hz είναι η ταχύτητα του ενδιάμεσου γραναζιού. Το ότι οι πλευρικές ζώνες στο μεγαλύτερο πλάτος ισούται με την ταχύτητα του ενδιάμεσου γραναζιού στο ανώτερο τμήμα της GMF, υποδηλώνει ότι μπορεί η χάρη μεταξύ των κατατομών να προκαλείται από το ενδιάμεσο γρανάζι. Το μικρότερο πλάτος της ταχύτητας του ενδιάμεσου γραναζιού στο χαμηλότερο σημείο της GMF υποδηλώνει χαλαρότητα ή ταλάντωση σ' αυτήν την περίπτωση. Εφόσον, τα πλάτη είναι μεγαλύτερα στο ανώτερο τμήμα απ' ότι στο χαμηλότερο τμήμα της GMF, τα ενδιάμεσα γρανάζια μπορεί να αποτελούν το αίτιο της προβληματικής χάρης μεταξύ των κατατομών.

6.8) Πρόβλημα χαλαρότητας-Ταλαντευόμενων γραναζιών:



Παραπάνω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα εύρους 20Hz γύρω από το 2 X GMF. Η συχνότητα διαφοράς μεταξύ 642,37 και 644,8Hz και μεταξύ 642,37 και 639,8Hz είναι περίπου 2,5Hz, που είναι και η ταχύτητα του γραναζιού. Η συχνότητα διαφοράς μεταξύ 642,37 και 647,3Hz και μεταξύ 642,37 και 637,4Hz είναι περίπου 5Hz, που είναι η ταχύτητα του ενδιάμεσου γραναζιού. Το μεγαλύτερο πλάτος της ταχύτητας του γραναζιού στην χαμηλότερη πλευρά της 2 X GMF υποδηλώνει σ' αυτήν την περίπτωση χαλαρότητα ή ταλάντωση. Το μεγάλο πλάτος στο 2 X GMF είναι μια καλή ένδειξη για χαλαρότητα ή ταλαντευόμενα γραναζία. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω ανάλυση στο πεδίο του χρόνου.

Βιβλιογραφία:

- [1] James I. Taylor,- «The Gear Analysis Handbook» Published by The Vibration Institute's Technical Publications , First Edition

Κεφάλαιο 7ο

Μετατροπείς σημάτων για μετρήσεις δόνησης:

7.1)Εισαγωγή:

Η ποιότητα των δεδομένων δόνησης που συλλέγονται και η αξιοπιστία της ανάλυσης εξαρτώνται άμεσα από την κατάλληλη επιλογή και από τον όποιο εδράζεται ο μετατροπέας πάνω στο σημείο της μέτρησης. Γι' αυτό τον λόγο πρέπει να σταθμίσουμε προσεκτικά τις αποφάσεις που θα πάρουμε σχετικά με την επιλογή του κατάλληλου μετατροπέα.

Η κατάλληλη συλλογή των δεδομένων δόνησης για την διάγνωση και την παρακολούθηση της καλής κατάστασης των μηχανών στηρίζεται στην κατάλληλη επιλογή των μετατροπέων. Οι τρεις πιο κοινοί τύποι μετατροπέων είναι οι μετατροπείς θέσης, ταχύτητας, επιτάχυνσης καθώς και μετατροπείς πιεζοηλεκτρικής δύναμης, πίεσης και ταχύτητας και μικρόφωνα.

7.2)Επιλογή μετρούμενης παραμέτρου:

Κατά την πρώτη περίοδο που η εφάρμοστηκε η προληπτική συντήρηση, ο μετατροπέας ταχύτητας ήταν ο ευρύτερα διαθέσιμος ήταν ο μετατροπέας ταχύτητας, οπότε η επιλογή της μετρούμενης παραμέτρου γινόταν ασυνείδητα. Μια πιο προσεκτική εξέταση αυτού του ζητήματος δείχνει ότι η παρακολούθηση της μετατόπισης, της ταχύτητας ή των επιπέδων επιτάχυνσης θα έπρεπε να ήταν μία συνάρτηση των τιμών του πλάτους σε σχέση με τις συχνότητες που η μηχανή μπορεί να παράγει. Η επιλογή όμως, του αν θα μετρήσουμε μετατόπιση, ταχύτητα ή επιτάχυνση δεν είναι τόσο προφανής όσο θα ήλπιζε κανείς.

7.3)Σύγκριση μετατροπέων κίνησης:

Δυστυχώς ο τρόπος λειτουργίας των διαφόρων μορφών μετατροπέων είναι τέτοιος ώστε αυτοί να έχουν περιορισμένο εύρος συχνοτήτων. Το ότι μπορεί να ενδιαφέρεται κάποιος για ένα εύρος συχνοτήτων όπως για π.χ 5-2000Hz δεν σημαίνει ότι ο μετατροπέας ταχύτητας είναι η προφανής επιλογή. Πρέπει να λαμβάνει συνεχώς υπόψιν τα πολλά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από μία κακή επιλογή μετατροπέα. Οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται συχνότερα για την μέτρηση των κραδασμών είναι: Μετατροπείς θέσης, μετατροπείς ταχύτητας σεισμικής μάζας και επιταχυνσιομετρα.

7.3.1Μετατροπείς θέσης:

Ο μετατροπέας θέσης είναι μια συσκευή που παράγει ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στην άκρη της. Όταν η άκρη αυτή προσεγγίσει ένα μεταλλικό στόχο προκαλείται παρεμβολή στο μαγνητικό πεδίο η οποία αλλάζει την τιμή του σήματος εξόδου. Από την στιγμή που η έξοδος του μετατροπέα είναι μια μη γραμμική συνάρτηση του κενού μεταξύ του άκρου του μετατροπέα που είναι υπεύθυνο για την παραγωγή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και του «στόχου», τότε χρειάζεται ένα ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο να γραμμικοποιεί την έξοδο. Πρέπει τέλος να σημειώσουμε ότι ο μετατροπέας θέσης απλώς αναγνωρίζει το διάκενο και δεν διακρίνει αν ο άξονας-στόχος περιστρέφεται ή απλά παλινδρομεί εμπρός-πίσω.

7.3.1.1)Πλεονεκτήματα: Αποτελούν ένα πολύ καλό τρόπο για την παρακολούθηση παραμέτρων όπως το πάχος του φιλμ λαδιού στα ακτινικά ρουλεμάν. Αποτελούν ένα συνηθισμένο τρόπο για την παρατήρηση της τροχιάς αξόνων γιατί μετρούν απευθείας το κενό μεταξύ ενός σταθερού μέλους στο οποίο εδράζονται και του άξονα. Έτσι, εάν κάποιος εδράσει δύο μετατροπείς θέσης με κατάλληλες γωνίες μεταξύ τους ώστε ο ένας μετατροπέας να παρατηρεί την κατακόρυφη κίνηση του άξονα και ο άλλος την οριζόντια το εξαγόμενο σήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να οδηγήσει τους κατακόρυφους και οριζόντιους ενισχυτές ενός παλμογράφου να αποδώσουν με όσο το δυνατόν πιο πιστό τρόπο τις τροχιές των στρεφόμενων αξόνων. Οι μετατροπείς θέσης είναι επίσης χρήσιμοι για την διενέργεια μετρήσεων δόνησης σε άξονες χαμηλής ταχύτητας που εδράζονται σε αυτολίπαντα ρουλεμάν. Αυτό συμβαίνει γιατί μπορούν να αναγνωρίσουν κατευθείαν το πρόβλημα του άξονα αντί να προσπαθούν να ανιχνεύσουν κάθε μικρή κίνηση μεταξύ του φιλμ λαδιού και της φωλιάς του ρουλεμαν.

7.3.1.2)Μειονεκτήματα: Οι μετρητές θέσεις θα έπρεπε να χρησιμοποιούνται μόνο σε συχνότητες των μερικών εκατοντάδων Hz. Η αποκλειστική χρήση αυτών των συσκευών για την παρακολούθηση της δόνησης μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια όλων των πληροφοριών μεγαλύτερου πλάτους(πληροφορίες σε συχνότητες πτερυγίων για της αντλίες και σύμπλεξης για τα γρανάζια). Συνηθίζεται σε κάποιες εγκαταστάσεις να τοποθετούνται σε συστήματα ελέγχου τροχιάς φίλτρα χαμηλής διόδου ώστε να αποκόπτεται οποιαδήποτε πληροφορία πάνω απο την πέμπτη τάξη για να έχουμε ευκρίνεια στην παρατήρηση των φαινομένων χαμηλής ταχύτητας. Πρέπει πάντως να έχουμε κατά νου πως μία βλάβη μπορεί να προκληθεί και σε κάποιο μηχανισμό που παράγει κραδασμούς υψηλότερης συχνότητας για τις οποίες ο μετατροπέας αυτός δεν ενδείκνυται. Πρέπει να αναφέρουμε ακόμα ότι στην περίπτωση που το υλικό του άξονα δεν είναι μαγνητικά ομοιόμορφο ο μετατροπέας θέσης θα αναγνωρίσει ένα σήμα στο 1X rpm ακόμα και σε έναν τέλεια ευθυγραμμισμένο(μηδενικής δόνησης) άξονα. Αυτό καθιστά αναγκαία την συγκέντρωση πληροφοριών από μία διάταξη του μετατροπέα θέσης και του άξονα που λειτουργεί με χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, προτού εξάγουμε οποιαδήποτε συμπεράσματα σχετικά με την υγεία της μηχανής. Ασυνέχειες όπως π.χ γρατζουνιές-εγκοπές και κοιλώματα στην επιφάνεια του στρεφόμενου άξονα έχουν την ίδια επίδραση με την μαγνητική ομοιομορφία που προαναφέραμε. Υπάρχουν επίσης και κάποια μοντέρνα συστήματα μετατροπέων θέσης που επιτρέπουν να αποθηκεύσει τις πληροφορίες των χαμηλών ταχυτήτων τις οποίες θα τις αντιστοιχήσει με ένα αρχικό επίπεδο κραδασμών το οποίο δεν θα λαμβάνεται υπόψη σ όλες τις μελλοντικές μετρήσεις. Αυτοί αναγνώσκουν την σχετική κίνηση μεταξύ του ακροδέκτη του παλμογράφου και του στόχου, γι αυτό είναι αναγκαίο να εδράσουμε τον ακροδέκτη με τέτοιο τρόπο ώστε να μην δονείται ο ίδιος αλλά να μετρά μόνο την επιθυμητή δόνηση του στόχου. Τέλος, σημαντικό μειονέκτημα μπορεί να θεωρηθεί το ότι ένας μετατροπέας θέσης τοποθετημένος ώστε να παρατηρεί την δόνηση του άξονα θα αγνοεί τελείως την δόνηση των σταθερά προσαρτημένων στην διάταξη στοιχείων μηχανής. Για π.χ μία τουρμπίνα με δεκάδες μετατροπείς θέσεις που παρατηρούν το στρεφόμενο σύστημα, μπορεί να έχει τα πτερύγια του στάτορα με ρωγμές, γεγονός που θα αγνοηθεί από το σύστημα παρακολούθησης δόνησης μέχρι κάποιο από τα πτερύγια του στάτορα να σπάσει και να διέλθει μέσα από τα πτερύγια του ρότορα. Σε μία τέτοια περίπτωση, αυτό το σύστημα παρακολούθησης είναι μικρής αξίας.

7.3.2)Μετατροπέας ταχύτητας σεισμικής μάζας:

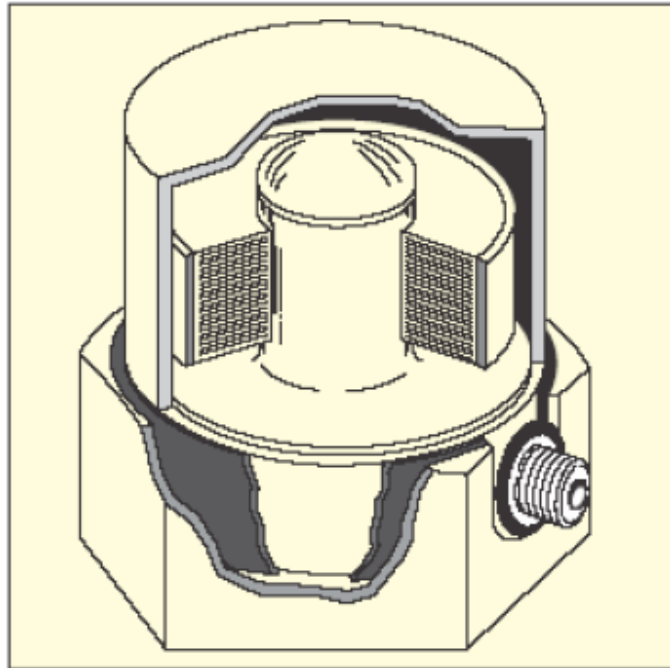
Πριν την εμφάνιση των πιεζοηλεκτρικών επιταχυνσιόμετρων οι περισσότεροι τεχνικοί δόνησης χρησιμοποιούσαν μετατροπείς ταχύτητας σεισμικής μάζας. Ένας τέτοιος μετατροπέας κατασκευάζεται από μία μαγνητική μάζα περιτυλιγμένη με αγώγιμο υλικό η οποία εμβαπτίζεται σε μπάνιο λαδιού. Με τον ίδιο τρόπο όπως μία γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ισχύ εκμεταλλευόμενη το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, ο πιεζοκρύσταλλος παράγει ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργεί μία τάση στο αγώγιμο υλικό που είναι περιτυλιγμένο γύρω από την μαγνητική μάζα. Η τάση εξόδου είναι ανάλογη της ταχύτητας της επιφάνειας πάνω στην οποία εδράζεται ο μετατροπέας ταχύτητας σεισμικής μάζας.

7.3.2.1)Πλεονεκτήματα: Οι τεχνικοί είναι εξοικειωμένοι με τη χρήση του και βολεύονται με το σχήμα του, που είναι σαν κουτάκι μπύρας. Εφόσον το σήμα δημιουργείται από μόνο του, δεν είναι απαραίτητος ένας τροφοδότης ισχύος ή ένας ενισχυτής φορτίου.

7.3.2.2)Μειονεκτήματα: Η ευαισθησία τους στους παρατηρούμενους κραδασμούς κατά την αξονική διεύθυνση(εφόσον ο μετατροπέας τοποθετηθεί κατακόρυφα θα μπορεί επίσης να διακρίνει και κάποια κίνηση κατά τον οριζόντιο άξονα) αποτελεί ένα μειονέκτημα. Έπειτα το γεγονός ότι κάποιες κατασκευές μπορούν να παράγουν κραδασμούς μόνο προς μία κατεύθυνση(μια κατασκευή που αγοράστηκε για να εδραστεί κατακόρυφα μπορεί να μη δουλέψει όταν εδραστεί στην οριζόντια κατεύθυνση και αντίστροφα). Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι ότι η απόκριση συχνότητάς τους εξασθενεί περίπου στα 2 Hz καθώς και το ότι το μέγεθός τους είναι αρκετά μεγάλο έτσι ώστε να προκληθεί φορτίο μάζας σε μικρές,ελαφριές επιφάνειες έδρασης. Οι απλοί μετατροπείς ταχύτητας μπορεί να μην έχουν τα παραπάνω προβλήματα,είναι όμως πολύ πιο ακριβοί.

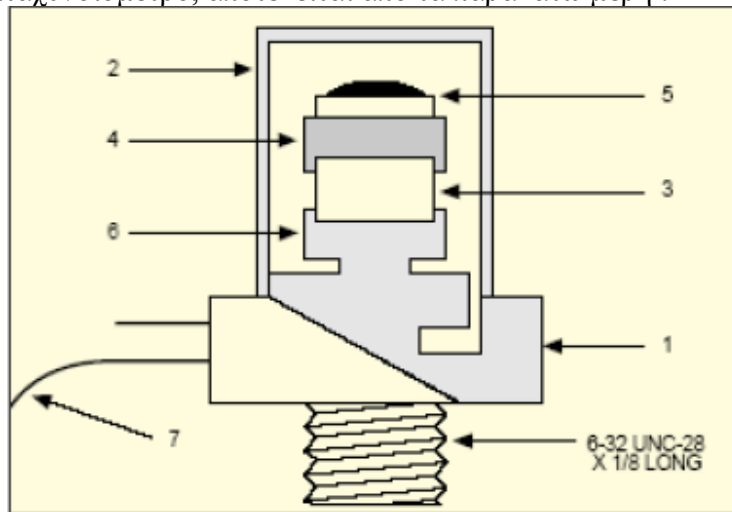
7.3.3)Επιταχυνσιόμετρα:

Φτιάχνονται από μία πολύ μικρή μάζα η οποία εδράζεται πάνω σε έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο. Ο κρύσταλλος συμπεριφέρεται ως ένα σκληρό ελατήριο και παράλληλα έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί ένα φορτίο ανάλογο της επιτάχυνσης. Όμοια λοιπόν, με τον μηχανικό αισθητήρα τα όργανα αυτά όταν επιταχυνθούν ασκούν μία αδρανειακή δύναμη στον πιεζοκρύσταλλο. Τα όργανα αυτά(Σχήμα 7.3.3Σ1) είναι τα πλέον πρακτικά για την μέτρηση κραδασμών.



Σχήμα 7.3.3Σ1: Τυπική μορφή επιταχυνσιόμετρου

Ένα τυπικό επιταχυνσιόμετρο, αποτελείται από τα παρακάτω μέρη :



Σχήμα 73.3Σ2: Μέρη επιταχυνσιόμετρου.

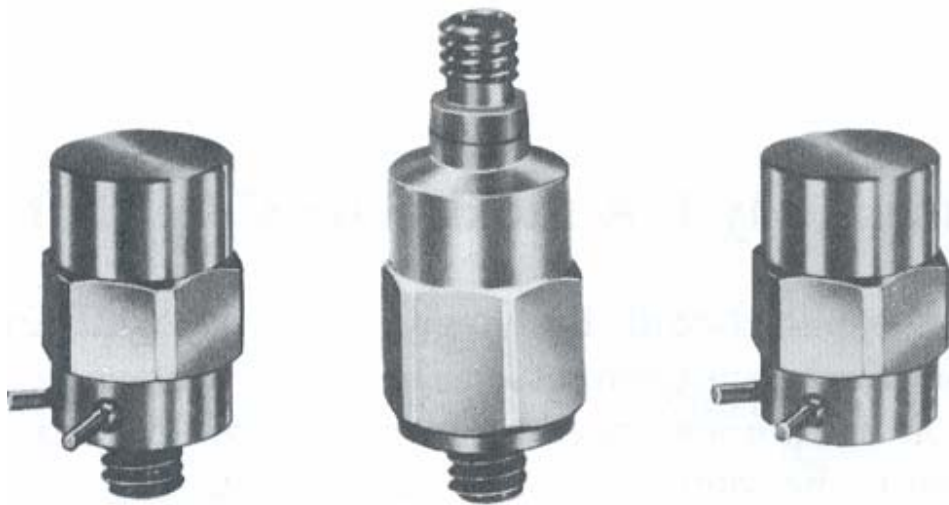
Αριθμός	Εξάρτημα
1	Βάση επιταχυνσιόμετρου
2	Καπάκι επιταχυνσιόμετρου
3	Πιεζοκρύσταλλος
4	Μάζα
5	Ηλεκτρικό κύκλωμα
6	Εσωτερική μόνωση βάσης
7	Καλώδιο

Πίνακας 7.3.3Π1: Αντιστοιχία αριθμών σχήματος 2-μερών επιταχυνσιόμετρου.

Στα πρώιμα επιταχυνσιόμετρα το φορτίο χαμηλής ενέργειας περνούσε μέσω ενός καλωδίου στον ενισχυτή σήματος προκειμένου να μεταλλαχθεί σε μία τάση ανάλογη της επιτάχυνσης. Εφόσον το φορτίο από μόνον του είναι εξαιρετικά μικρό, το σήμα εξόδου του επιταχυνσιόμετρου κυμαινόταν ανάλογα με το μήκος του καλωδίου του ενισχυτή, τις συστροφές(κόμπι) του καλωδίου, το αν το καλώδιο περνούσε πάνω από μία αιχμηρή μεταλλική γωνία, την στιγμιαία μεταβολή που αυτό θα προκαλούσε κοντά σ ένα ηλεκτρικό πεδίο(όπως αυτό που δημιουργείται από ένα ηλεκτρικό κινητήρα) και τέλος με το λέρωμα των συνδέσεων στο μετατροπέα από διαφόρων ειδών έλαια. Τα επιταχυνσιόμετρα συνήθως αυτοκαταστρέφονταν εάν έπεφταν κάτω γιατί δεν κανενός είδους εσωτερική ηλεκτρονική προστασία. Όλα τα παραπάνω προβλήματα οδήγησαν στην άνοδο του ετατροπέα ταχύτητας. Στο χωρητικό επιταχυνσιόμετρο η επιτάχυνση προκαλεί μία μεταβολή στην χωρητικότητα μεταξύ της σεισμικής μάζας και των ηλεκτροδίων. Η αλλαγή στην χωρητικότητα μετατρέπεται σ' ένα υψηλής τάσης και χαμηλού εναλλασσόμενου ρεύματος σήμα εξόδου από τα ενσωματωμένα ηλεκτρονικά.

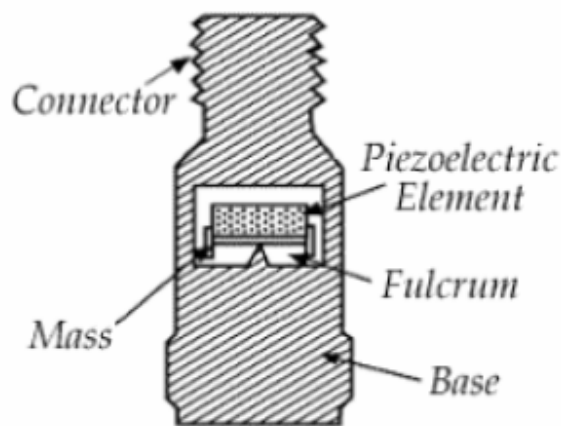
7.3.3.1)Πλεονεκτήματα: Με την έλευση των πιεζοηλεκτρικών επιταχυνσιόμετρων ολοκληρωμένου κυκλώματος και χαμηλού εναλλασσόμενου ρεύματος, τα παραπάνω προβλήματα που προέρχονταν από το καλώδιο και από την τυχόν πτώση της συσκευής επιλύθηκαν. Εντός του καλύμματος του επιταχυνσιόμετρου χτίζεται ένα ολοκληρωμένο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο εξάγει μια τάση ανάλογη της επιτάχυνσης.Για την τροφοδότηση του κυκλώματος απαιτείται μόνο μια πηγή ισχύος που λειτουργεί με μπαταρία. Τα καλώδια μπορούν να είναι ακόμη και μακρύτερα από 61 μέτρα χωρίς να παρατηρείται εξασθένηση του σήματος. Στην αγορά υπάρχουν διαθέσιμα και κάποια επιταχυνσιόμετρα που είναι απομονωμένα από το περιβάλλον τους ώστε να εκμηδενιστεί η πιθανότητα προβλημάτων από συνδέσεις γείωσης ή άλλες ηλεκτρονικές παρεμβολές.Πολλά επιταχυνσιόμετρα δίνουν μηδενικές αποκρίσεις σε χαμηλές συχνότητες στα 1 ή 2Hz και σε υψηλές συχνότητες στα 10 ή 20 Hz. Αν κάποιος ενδιαφέρεται για χαμηλότερες συχνότητες, μπορεί να χρησιμοποιήσει ειδικά σεισμικά επιταχυνσιόμετρα χαμηλής συχνότητας.Τα περισσότερα επιταχυνσιόμετρα είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε ο κρύσταλλος να βρίσκεται κανονικά υπό συμπίεση. Εάν η επιφάνεια πάνω στην οποία εδράστηκε το επιταχυνσιόμετρο υπόκειται σε μικρές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας της, είναι δυνατόν να προκύψει ένα παρασιτικό σήμα μικρής σημασίας. Στην απίθανη περίπτωση που αυτό αποτελέσει πρόβλημα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο σχέδιο στο οποίο ο κρύσταλλος θα είναι τοποθετημένος σε ένα διάτρητο μεταλλικό κουτί. Ένα τέτοιο σχέδιο δεν είναι ευαίσθητο στην παραμόρφωση της βάσης που προκαλείται από τις θερμικές διακυμάνσεις στην επιφάνεια έδρασης.

7.3.3.2)Μειονεκτήματα: Το κυριότερο μειονέκτημα σε ένα επιταχυνσιόμετρο ολοκληρωμένου ηλεκτρικού κυκλώματος είναι ότι τα εξαρτήματα του ενσωματωμένου ενισχυτή καταστρέφονται σε θερμοκρασίες ανώτερες των 218 °C. Σε αυτή την περίπτωση αναγκάζεται κανείς να χρησιμοποιήσει ένα επιταχυνσιόμετρο τύπου ενισχυτή-φορτίου, το οποίο παρουσιάζει όλα τα προαναφερθέντα προβλήματα.Μιας και πλέον έχουν κατασκευαστεί ενισχυτές φορτίου μικρότεροι σε μέγεθος από ένα μολύβι, μια λύση σε πολλά από αυτά τα προβλήματα θα ήταν να εδράσουμε μία από αυτές τις μικρές μονάδες όσο το δυνατόν εγγύτερα στο επιταχυνσιόμετρο χωρίς να αγγίζει την καυτή μετρούμενη επιφάνεια.



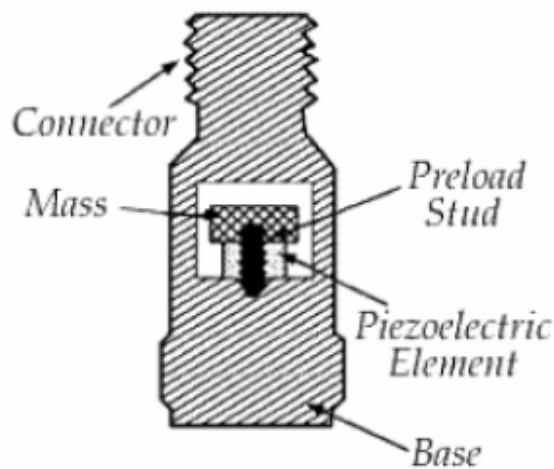
Σχήμα 7.3.3.2Σ1: Μορφή επιταχυνσιόμετρου PCB 303A

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 7.3.3.2Σ2), 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.



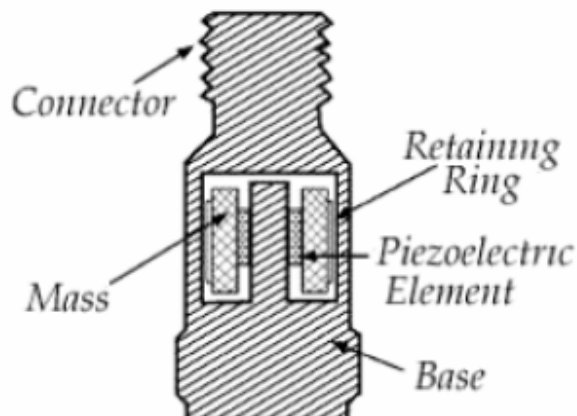
Σχήμα 7.3.3.2Σ2: Καμπτικό μοντέλο

Το συμπιεστικό μοντέλο (Σχήμα 7.3.3.2Σ3) είναι το απλούστερο και ευκολότερο στην κατανόηση. Ο κρύσταλλος, quartz ή κεραμικός, τοποθετείται ενδιάμεσα της σεισμικής μάζας και μιας άκαμπτης βάσης.



Σχήμα 7.3.3.2Σ3: Συμπιεστό μοντέλο

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 7.3.3.2Σ4) 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.



Σχήμα 7.3.3.2Σ4: Διατμητικό μοντέλο

7.3.4) Ολοκλήρωση σήματος:

Επικρατεί η αντίληψη ότι παρά τα πλεονεκτήματά τους τα επιταχυνσιόμετρα δεν δίνουν ασφαλή συμπεράσματα σε σύγκριση με τους μετατροπείς ταχύτητας. Η λανθασμένη αυτή πεποίθηση στηρίζεται σε κάποιες παρανοήσεις που θα επιχειρήσουμε να διευκρινίσουμε στην συνέχεια. Για τον σκοπό αυτό θα θεωρήσουμε ότι η τάξη των μηχανών ενδιαφέροντος προς τον αναλυτή δόνησης εγγυάται την χρήση της ταχύτητας ως της σωστής παραμέτρου πλάτους(π.χ χαμηλής ταχύτητας περιστροφής φυγόκεντρες αντλίες).

7.3.5) Ανάκτηση δεδομένων κραδασμών:

Είναι λάθος να υποθέσουμε ότι για την συλλογή δεδομένων ταχύτητας πρέπει να χρησιμοποιήσουμε υποχρεωτικά έναν μετατροπέα ταχύτητας. Μάλιστα αυτό αποτελεί μία κακή επιλογή λόγω των αδυναμιών αυτού του τύπου μετατροπέων. Μία καλύτερη μέθοδος προκύπτει από την χρησιμοποίηση ενός επιταχυνσιόμετρου στην θέση του μετατροπέα ταχύτητας και η ολοκλήρωση του σήματος αυτού. Ο όρος ολοκλήρωση προέρχεται από την βασική σχέση μεταξύ της ταχύτητας και της επιτάχυνσης(η ταχύτητα είναι το ολοκλήρωμα της επιτάχυνσης. Δύο μέθοδοι ολοκλήρωσης σήματος χρησιμοποιούνται σήμερα στην πράξη, η ψηφιακή και η αναλογική.

7.3.5.1) Ψηφιακή ολοκλήρωση: Ο αναλυτής διαβάζει το χρονοεξαρτώμενο σήμα επιτάχυνσης και δημιουργεί ένα φάσμα συχνοτήτων μέσω ενός υπολογισμού FFT. Η μετατροπή σε δεδομένα ταχύτητας γίνεται από τον αναλυτή ο οποίος διαθέτει έναν συγκεκριμένο αριθμό γραμμών(ας πούμε 400), με την χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$V = A / (2 \pi f).$$

Καθένα από τα 400 επίπεδα επιτάχυνσης διαιρείται με καθεμία από τις 400 αντίστοιχα συχνότητες πολλαπλασιασμένες επί 2π. Το πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι μπορούμε να δούμε οποιαδήποτε στιγμή τόσο το φάσμα της ταχύτητας όσο και το φάσμα της επιτάχυνσης. Το μειονέκτημα είναι ότι η ακρίβεια καθενός από τους 400 υπολογισμούς είναι μια συνάρτηση του εύρους ζώνης συχνοτήτων καθενός από τα δυαδικά φίλτρα. Ένα παράδειγμα αυτού του φαινομένου είναι το ακόλουθο: Ας υποθέσουμε ότι ένα δυαδικό φίλτρο καλύπτει το εύρος από 87,5-112,5 Hz. Ο υπολογισμός ψηφιακής ολοκλήρωσης για αυτό το τμήμα θα περιλαμβάνει ένα άνω όριο στα 100Hz. Εάν η πραγματική συχνότητα κορυφής είναι σ αυτό το δυαδικό ψηφίο τα 90 Hz, το λάθος των υπολογισμών είναι 10%.

Στην περίπτωση που ολοκληρώνουμε ψηφιακά το σήμα ενός επιταχυνσιόμετρου για να πάρουμε την ταχύτητα ή την μετατόπιση πρέπει να γίνει μια διαδικασία βαθμονόμηση(καλιμπραρίσματος) είτε από το επιταχυνσιόμετρο είτε με απλό υπολογισμό. Αυτή η διόρθωση αλλάζει την εξίσωση βαθμονόμησης από mV/g(η οποία όταν ολοκληρωθεί προς την ταχύτητα αποδίδει την χωρίς σημασία μονάδα g-sec) σε mn/in/sec/sec. Μ' αυτή τη διόρθωση με μία μονή ολοκλήρωση προκύπτουν in/sec και με μία διπλή ολοκλήρωση προκύπτουν in.

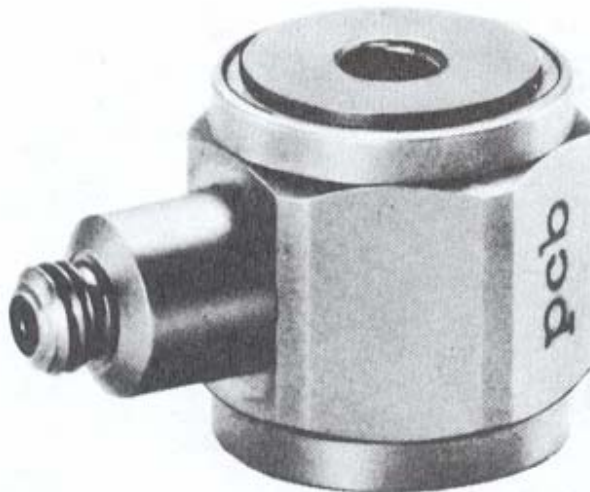
7.3.5.2) Αναλογική ολοκλήρωση: Η αναλογική ολοκλήρωση εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι η εξίσωση που συνδέει την επιτάχυνση με την ταχύτητα είναι ισοδύναμη με το πέρασμα του σήματος επιτάχυνσης μέσα από ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων το οποίο αποδίδει 6 dB/οκτάβα. Το προφανές πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι το σήμα της επιτάχυνσης μετατρέπεται σε ταχύτητα ως μία συνεχής συνάρτηση της συχνότητας.

Δεν υπάρχουν σφάλματα που ν' αφορούν το εύρος της ζώνης συχνοτήτων. Ο αναλυτής σφάλματος, δεν βλέπει ποτέ μία ένδειξη επιτάχυνσης είτε στο χρονικό σήμα, είτε σ αυτό συναρτήσει της συχνότητας. Η αναλογική ολοκλήρωση επιτυγχάνεται είτε συνδέοντας το επιταχυνσιόμετρο σε μία παροχή ρεύματος που έχει ενσωματωμένο φίλτρο ολοκλήρωσης είτε αγοράζοντας ένα IC επιταχυνσιόμετρο με το αναλογικό φίλτρο ενσωματωμένο στο κύκλωμα του ενισχυτή. Όταν αγοράσουμε οποιαδήποτε από τις δύο συσκευές συσκευές πρέπει οπωσδήποτε να ελέγχουμε τις προδιαγραφές συχνότητας μιας και δεν είναι εύκολο να φέρνουμε την γωνιακή συχνότητα του φίλτρου διέλευσης κάτω από περίπου 5-10Hz. Επίσης, καλό θα ήταν να ελέγχεται το δυναμικό εύρος του αναλογικού φίλτρου. Με τον ίδιο τρόπο μπορούμε να πάρουμε δεδομένα μετατόπισης από ένα επιταχυνσιόμετρο περνώντας το σήμα του μέσα από ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων των 12dB/οκτάβα. Αυτό αναφέρεται ως διπλή ολοκλήρωση.

7.4)Μετατροπείς δύναμης:

Όπως γνωρίζουμε, ένα μετατροπέας κίνησης χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της απόκρισης μιας διέγερσης του συστήματος. Για την μέτρηση του φάσματος συχνοτητων της διέγερσης χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας δύναμης.

Ένας πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας δύναμης μοιάζει σαν ένα επιταχυνσιόμετρο χωρίς την σεισμική μάζα. Ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος εδράζεται στον μετατροπέα με τέτοιο τρόπο ώστε οποιαδήποτε δύναμη ασκείται στο σύστημα είτε να τον συμπιέζει είτε να τον επιμηκύνει. Ο κρύσταλλος δημιουργεί ένα φορτίο ανάλογο με την δύναμη το οποίο είναι θετικό ή αρνητικό ανάλογα με το αν συμπιέζεται ή διατείνεται. Όπως άλλωστε γνωρίζουμε, ένας μεταλλάκτης δύναμης αντιλαμβάνεται μόνο την δύναμη που «διέρχεται» δια μέσου αυτού. Σε μία δοκιμή δόνησης για παράδειγμα, όλη η ενέργεια που μεταδίδεται στο τεμάχιο υπό δοκιμή πρέπει(ιδανικά) να περάσει από τον μεταλλάκτη δύναμης. Για την έδραση αυτού του τύπου των μεταλλακτών ισχύουν οι κανόνες που ισχύουν για όλους τους μεταλλάκτες και αναφέρονται σε άλλο κομμάτι της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 7.4Σ1: Μορφή μεταλλάκτη δύναμης PCB208B01

7.5) Ηλεκτρικοί μορφομετατροπείς(ακουστικά):

Τα ακουστικά δεν χρησιμοποιούνται μόνο σε απλές μετρήσεις ήχων, αλλά είναι μερικές φορές χρήσιμα και για την παρακολούθηση της καλής(αποδεκτής) λειτουργίας των μηχανών ως ένα εξάρτημα μέτρησης των παραγόμενων κραδασμών σ' ένα σημείο της μηχανής όπου δεν είναι δυνατόν να εδραστεί ένα επιταχυνσιόμετρο. Αυτή η τεχνική παρακολούθησης προϋποθέτει ότι η επιφάνεια της μηχανής που θέλουμε να παρακολουθήσουμε συμπεριφέρεται ως ένα καλό διάφραγμα αναφοράς σ' ένα αρκετά μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Ορισμένες φορές για τον εντοπισμό ήχων ή επιφανειακής δόνησης, όταν η μέθοδος συνοχής δεν θα έχει αποτέλεσμα-σε πολύ συμπαγή μπλοκ μηχανών όπως είναι οι κινητήρες Diesel- χρησιμοποιείται μια τεχνική γνωστή ως μέτρηση ακουστικής έντασης, που χρησιμοποιεί είτε δύο ακουστικά είτε ένα ακουστικό και έναν καταγραφέα κίνησης. Είναι διαθέσιμοι διάφοροι τύποι ακουστικών, οι οποίοι μετατρέπουν το εισερχόμενο κύμα πίεσης του ήχου σε τάση η οποία μπορεί να προενισχυθεί και να διοχετευτεί σ' ένα αναλυτή φάσματος. Παρακάτω αναφέρονται μερικοί απ' αυτούς.

---*Ακουστικά electret(ηλεκτρικό ανάλογο ενός μόνιμου μαγνήτη):* Το ακουστικό electret χρησιμοποιεί ένα λεπτό στρώμα πλαστικού με επικάλυψη αγωγικού υλικού στην εξωτερική του επιφάνεια ως διάφραγμα. Η εσωτερική επιφάνεια του διαφράγματος ακουμπάει πάνω στα υπερυψωμένα σημεία μιας διάτρητης μεταλλικής πλάκας. Δημιουργείται έτσι ένας πυκνωτής του οποίου τα χαρακτηριστικά διαφέρουν ανάλογα με την πίεση που ασκείται στο διάφραγμα. Η αλλαγή στην χωρητικότητα προκαλεί μία τάση ανάλογη της πίεσης. Εφόσον ο πυκνωτής είναι αυτοδιεγερώμενος, το ακουστικό electret είναι αρκετά αξιόπιστο για ένα μεγάλο εύρος συνθηκών περιβάλλοντος.

---*Ακουστικό με πυκνωτή:* Το ακουστικό με πυκνωτή χρησιμοποιεί ένα σύστημα διαφράγματος/κενού αέρος για τον σχηματισμό ενός πυκνωτή ευαίσθητου στην πίεση. Εφόσον απαιτείται υψηλή τάση στους πόλους του πυκνωτή, τα ακουστικά αυτά θα είναι πιο ευαίσθητα στην θερμοκρασία και στην υγρασία.

---*Κεραμικά ακουστικά:* Τα κεραμικά ακουστικά χρησιμοποιούν ένα διάφραγμα το οποίο σπρώχνει έναν κεραμικό πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο και γι' αυτό τον λόγο μοιάζει πολύ με το επιταχυνσιόμετρο και τον μετατροπέα δύναμης. Αυτές οι συσκευές είναι τραχείς, σταθερές και σχετικά ανεπηρέαστες από τις συνθήκες περιβάλλοντος. Το εύρος των χρησιμοποιούμενων συχνοτήτων τείνει να είναι μικρότερο από τα δύο προηγούμενα είδη ακουστικών. Γενικά, ένα ακουστικό με μικρότερη διάμετρο έχει μεγαλύτερη απόκριση συχνοτήτων από ένα ακουστικό μεγαλύτερης διαμέτρου. Για διάμετρο εισόδου ίση με μία κεραμική μονάδα, μπορεί να έχει σταθερή απόκριση περίπου στα 1500Hz, ενώ, ένα παρόμοιο με διάμετρο 0,5 της κεραμικής μονάδας μπορεί να φτάσει περίπου ως τα 4000Hz. Για καλή απόκριση στις χαμηλές συχνότητες θα έπρεπε να χρησιμοποιείται ένας κλωβός για τον περιορισμό του ανέμου, κυρίως σε διατάξεις που βρίσκονται σε εξωτερικούς χώρους. Τα ακουστικά σχεδιάζονται είτε για την τυχαία, είτε για την κατευθυνόμενη πρόσκρουση των ηχητικών κυμάτων πάνω σ' αυτά. Πριν την πραγματοποίηση μετρήσεων θα έπρεπε να λαμβάνουμε υπόψη την ευαισθησία κάθε δεδομένου σχεδίου στην πρόσπτωση των ηχητικών κυμάτων.

7.6)Υδρόφωνα και μεταλλάκτες πίεσης:

Τα υδρόφωνα και οι μεταλλάκτες πίεσης είναι βασικά αδιάβροχα πιεζοηλεκτρικά ακουστικά, όπως το κεραμικό ακουστικό που περιγράφηκε παραπάνω αλλά, σχεδιασμένα για διαφορετικές πιέσεις και υγρά. Πρέπει να σημειώσουμε ότι αυτές οι συσκευές είναι σχεδιασμένες ώστε να διαβάζουν μόνο την μη συνεχή σταθερά της πίεσης. Αυτό το επιτυγχάνουν παρέχοντας μία οπή για την διέξοδο του αέρα στο διάφραγμα του μετατροπέα. Έτσι, εάν ένας μεταλλάκτης πίεσης τοποθετείτο σε μία γραμμή υπό πίεση σ'ένα μπαρόμετρο(όργανο μέτρησης πίεσης) με ένδειξη 100psi, η ανάγνωση του μεταλλάκτη θα έδειχνε μόνο τις διαταράξεις των ανώτερων συχνοτήτων γύρω από την σταθερή πίεση των 100psi και όχι την ίδια την τιμή των 100psi. Τα ακουστικά γενικά καλιμπράρονται(βαθμονομούνται) πριν και μετά την κάθε χρήση με ένα διακριβωτή ήχου, ο οποίος εφαρμόζει πάνω από την κεφαλή του ακουστικού και δημιουργεί ένα σήμα αναφοράς σε γνωστές συχνότητες και πλάτη. Τα υδρόφωνα και οι μεταλλάκτες πίεσης είναι λιγότερο ευαίσθητα στις υποβαθμίσεις της εξόδου τους και στις φθορές. Αυτός είναι ο λόγος που χρησιμοποιούνται εισάγοντας απλά την τιμή καλιμπραρίσματος ευαισθησίας του κατασκευαστή στον αναλυτή φάσματος όπως γίνεται άλλωστε και στους καταγραφείς κίνησης.



Σχήμα 7.6Σ1:Μορφή μεταλλάκτη πίεσης PCB118A05

7.7)Χαρακτηριστικά μεταλλακτών:

Πριν χρησιμοποιήσουμε οποιονδήποτε μετατροπέα για την διεξαγωγή μετρήσεων, πρέπει να ελέγξουμε τις συγκεκριμένες προδιαγραφές του μετατροπέα προκειμένου να επαληθεύσουμε ότι η συσκευή θα εξάγει τα συμπεράσματα που ο χρήστης θα «αναμένει» να δει.

--*Σταθερά ευαισθησίας:* Όπως ξέρουμε όποιο μετατροπέα και να χρησιμοποιήσουμε για να πάρουμε την ένδειξη η ποσότητα που φτάνει στην είσοδο του εκάστοτε οργάνου είναι συνήθως σε volt. Γι αυτό το λόγο πρέπει να γνωρίζουμε πόσα volt αντιστοιχίζει ο συγκεκριμένος μετατροπέας σε κάθε μονάδα μέτρησης. Για παράδειγμα ένα επιταχυνσιόμετρο βαθμονομείται σε όρους m^*V/g . Μία μονάδα με ευαισθησία της τάξης των 100 mv/g θα δώσει στην έξοδό της 100mV για κάθε g της επιτάχυνσης. Στην περίπτωση ενός επιταχυνσιόμετρου σύμφωνα με τον Steve Goldman και τα πειράματα που έχει διεξάγει, μία ευαισθησία της τάξης των 100mV/g είναι σχεδόν πάντα επαρκής για σχεδόν όλους τους τύπους των περιστροφικών μηχανών.

--*Περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας:* Το εύρος των χρησιμοποιούμενων συχνοτήτων ενός μετατροπέα είναι το εύρος στο οποίο η σταθερά ευαισθησίας παραμένει σταθερή

συνήθως μέσα στο 5-10% της ονομαστικής της τιμής. Αυτό το εύρος συχνοτήτων περιορίζεται από φυσικές συχνότητες μέσα στον ίδιο τον μετατροπέα. Για παράδειγμα είναι δυνατόν να πάρουμε ένα επιταχυνσιόμετρο με εύρος συχνοτήτων 1Hz-10kHz όμως τα περισσότερα επιταχυνσιόμετρα έχουν επίπεδη απόκριση μόνο από τα 10Hz-3 ή 4 kHz περίπου. Μικρότερες μονάδες από 2-10mV/g χρησιμοποιούνται στα 20kHz. Το εύρος συχνοτήτων των κρουστικών παλμών είναι συνάρτηση του μεγέθους. Στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές ένας παλμός του 1 lb αποτελεί μία καλή μέση λύση μεταξύ του πιθανού μεγέθους της κρούσης και του εύρους συχνοτήτων.

--*Γραμμικότητα όσον αφορά τις μετρήσεις πλάτους:* Όπως προείπαμε, όλοι οι μεταλλάκτες μπορούν να μετρήσουν τα διάφορα μεγέθη μέσα σ' ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών. Για τιμές μεγαλύτερες ή μικρότερες απ' αυτό το εύρος, το σήμα του μετατροπέα δεν είναι πλέον γραμμικό με το πλάτος της μετρούμενης ιδιότητας. Το άνω όριο γραμμικότητας ενός επιταχυνσιόμετρου είναι συνήθως 25-100g. Συνήθως, το χαμηλότερο όριο είναι περίπου 100dB παρακάτω απ' αυτό. Ένα μικρόφωνο αποκλίνει πάρα πολύ εύκολα και ένας μετατροπέας θέσης δεν μπορεί να δει τον στόχο του σ' ένα κενό μεγαλύτερο των 0,25inch.

--*Γραμμικότητα όσον αφορά τις μετρήσεις θερμοκρασίας:* Καθώς ένας μεταλλάκτης κρύνει ή ζεσταίνεται εκτός των ανεκτών του ορίων η γραμμικότητα του φθίνει. Κάποιες κατασκευές μικροφώνων είναι πολύ ευαίσθητες σ' αυτό. Τα επιταχυνσιόμετρα IC για παράδειγμα δεν μπορούν να λειτουργήσουν καθόλου σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 218°C. Πρέπει λοιπόν να γνωρίζουμε την θερμοκρασία του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο θα λειτουργήσει ο μετατροπέας και να διαλέξουμε έναν μετατροπέα που θα είναι γραμμικός σ' αυτό το εύρος.

Βιβλιογραφία:

[1] Steve Goldman, P.E,- «Vibration Spectrum Analysis», Second Edition, Published by Industrial Press, Inc, 1999.

[2] Διπλωματική εργασία με θέμα «Διάγνωση βλαβών σε περιστρεφόμενα στοιχεία μηχανών», *Τσαντιώτης Δημήτρης, Αθήνα 2005.*

Κεφάλαιο 8ο

Συλλογή & Επεξεργασία δεδομένων :

8.1) Εισαγωγή:

Για να μπορέσουμε να διαγνώσουμε με ακρίβεια τα προβλήματα των γραναζιών είναι απαραίτητο να συγκεντρώσουμε χρήσιμες πληροφορίες. Η επίτευξη αυτού του στόχου εξαρτάται από την γνώση των αναμενόμενων συχνοτήτων, την επιλογή του κατάλληλου μετατροπέα και την κατάλληλη χρήση αυτού. Η καταγραφή μεγάλων περιόδων του χρονικού σήματος είτε σύστημα καταγραφής ακουστικών σημάτων σε μαγνητική ταινία, είτε σε σκληρό δίσκο υπολογιστή είναι ο γρηγορότερος και ευκολότερος τρόπος καταγραφής των δεδομένων.

Σε κάθε διάταξη η εγκατάσταση του μετατροπέα είναι κρίσιμη. Εάν, ο μετατροπέας δεν τοποθετηθεί στην σωστή θέση, υπάρχει περίπτωση να μην συγκεντρωθούν χρήσιμα δεδομένα. Η σωστή τοποθέτηση του μετατροπέα μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τον τύπο της μηχανής, το είδος των χρησιμοποιούμενων γραναζιών, τη φύση του προβλήματος και την κατασκευή του μειωτήρα στροφών. Γενικά μιλώντας, υπάρχουν κάποιοι κανόνες που υποχρεούται να γνωρίζει κάποιος όσον αφορά την σωστή τοποθέτηση των μετατροπέων κατά την διάρκεια της μέτρησης. Αυτοί είναι:

- Οι αναγνώσεις δόνησης πρέπει να παίρνονται πάνω σε επιφάνειες αρκετά σκληρές, ώστε να μην επηρεάζονται από την αύξηση του φορτίου. Ένα μεταλλικό έλασμα για παράδειγμα, θα εμφανίσει μία τελείως διαφορετική τιμή δόνησης όταν είναι φορτισμένο. Μια τέτοια ανάγνωση δεν θα αποτελούσε έγκυρη ένδειξη για τον τρόπο με τον οποίο δονείται η συγκεκριμένη μηχανή.
- Όλες οι αναγνώσεις δόνησης(ή σχεδόν όλες όπως θα δούμε παρακάτω) θα έπρεπε να γίνονται με τον μετατροπέα κατακόρυφο προς την επιφάνεια ενδιαφέροντος.
- Τα σήματα δόνησης που περιέχουν υψηλές συχνότητες θα έπρεπε να λαμβάνονται με τον μετατροπέα σφικτά προσαρμοσμένο ή βιδωμένο στην επιφάνεια, γιατί η πίεση που ασκούμε με το χέρι δεν μπορεί να τον συγκρατήσει αρκετά σταθερά ώστε να παρακολουθεί σωστά τις υψηλές συχνότητες.
- Η μαγνητική έδραση του μετατροπέα, προτιμάται σε σχέση με την ανάγνωση στην οποία τον κρατάμε με το χέρι όμως, δεν είναι τόσο καλή όσο μία έδραση με σπείρωμα όσον αφορά την απόκριση στις υψηλές συχνότητες. Ό μαγνήτης θα κουνηθεί εάν τοποθετηθεί σε μία καμπυλωμένη επιφάνεια μειώνοντας έτσι το εύρος της συχνότητας μέσα στην οποία μπορούμε να τον χρησιμοποιήσουμε. Κάποιοι μαγνήτες πρέπει να εδραστούν πάνω σε μία λεία και ομαλή επιφάνεια. Άλλοι είναι λιγότερο ευαίσθητοι. Γενικά, ένα λεπτό φιλμ λαδιού ή λίπους αυξάνει το εύρος συχνότητας χρήσης μιας μαγνητικής έδρασης.
- Αν και οι περισσότεροι μαγνήτες χρησιμοποιούνται για μετρούμενες τιμές συχνοτήτων μέχρι 3-5 KHz, είναι πλέον δυνατόν να χρησιμοποιήσουμε και κάποιο μαγνήτη που κατασκευάζεται από κάποιους κατασκευαστές επιταχυνσιομέτρων, ο οποίος εάν εδραστεί σε μία λεία επιφάνεια λειτουργεί καλά και στα 10kHz. Ένας τέτοιος μαγνήτης αν και αρκετά ακριβός εξοικονομεί απίστευτα πολύ χρόνο κατά την περιοδική παρατήρηση μηχανών που παρουσιάζουν τις πληροφορίες δόνησής τους περίπου από τα 3kHz και πάνω.

Ειδικά για τους οδοντωτούς τροχούς θα πρέπει να τηρούνται οι επόμενοι κανόνες όσον αφορά την έδραση των μετατροπέων στο σημείο μέτρησης. Η σωστή θέση για τη συλλογή των δεδομένων σε ένα συγκεκριμένο κιβώτιο ταχυτήτων μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το ποιο γρανάζι είναι το ελαττωματικό αλλά και με το ποια πλευρά αυτού του γραναζιού είναι η ελαττωματική. Ο καλύτερος καθορισμός σήματος επιτυγχάνεται αν τοποθετήσουμε τον μετατροπέα στην ζώνη του φορτίου και όσο το δυνατόν κοντύτερα στην έδραση του γραναζιού που προείπαμε. Υπάρχουν μερικοί απλοί κανόνες που βοηθούν στον καθορισμό του καλύτερου σημείου για την συλλογή δεδομένων:

1. Για μετωπικούς τροχούς ευθείας οδόντωσης, ο καλύτερος καθορισμός σήματος επιτυγχάνεται στην ακτινική διεύθυνση.
2. Για ελικοειδή ή άλλα γρανάζια με ελικοειδή ή κωνική γωνία ο καλύτερος καθορισμός σήματος επιτυγχάνεται στην αξονική διεύθυνση.
3. Ο μετατροπέας πρέπει να τοποθετείται όσο το δυνατόν κοντύτερα στο γρανάζι σε οποιαδήποτε από τις παραπάνω περιπτώσεις.
4. Εάν είναι ελαττωματικό κάποιο δόντι στην δεξιά πλευρά του κιβωτίου ταχυτήτων, το καλύτερο σήμα επιτυγχάνεται συνήθως από τη δεξιά πλευρά του κιβωτίου. Εξίσου ισχύει και το αντίστροφο.
5. Εάν ένα κιβώτιο ταχυτήτων έχει κατασκευαστεί με εσωτερικά πλέγματα, το καλύτερο σήμα επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση του μετατροπέα στο σημείο όπου το πλέγμα ενώνεται με το κάλυμμα. Αυτό ισχύει μόνο για το γρανάζι που στηρίζεται από το πλέγμα.
6. Η φύση και ο τύπος του προβλήματος επίσης επηρεάζουν την τοποθεσία. Για παράδειγμα, ένα γρανάζι χαλαρό στον άξονα μπορεί να δημιουργήσει ένα δυνατό σήμα στην ακτινική διεύθυνση, ενώ μια κακή ευθυγράμμιση μπορεί να δημιουργήσει ένα δυνατό σήμα στην αξονική διεύθυνση.
7. Δεν πρέπει να συλλέγονται δεδομένα από το κάλυμμα του κιβωτίου ταχυτήτων ή από τις λεπτές πλάκες στεγανοποίησης της δεξαμενής λαδιού. Τα καλύμματα των κιβωτίων ταχυτήτων είναι σχετικά λεπτά και συνήθως περιέχουν μία ή περισσότερες φυσικές συχνότητες. Η δυνατότητα μετάδοσης των δημιουργούμενων συχνοτήτων μέσα από στεγανωτικά, φλάτζες κλπ. δεν είναι πολύ καλή και το σήμα ενδέχεται να εξασθενίσει. Συνίσταται να χρησιμοποιούνται μηχανικές θέσεις λήψης μέτρησης, όπως πχ η κεφαλή ενός κοχλία. Η δυνατότητα μετάδοσης των συχνοτήτων μέσω των σπειρωμάτων ενός κοχλία δεν υποβαθμίζεται, και γι' αυτό το λόγο τα δεδομένα που λαμβάνονται από την κεφαλή ενός κοχλία παρέχουν τα καλύτερα αποτελέσματα.
8. Όταν τα δεδομένα λαμβάνονται από αντίθετες μεριές του κιβωτίου ταχυτήτων, τα σήματα είναι κατά 180° μετατοπισμένα το ένα σε σχέση με το άλλο. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι ο ένας μετατροπέας είναι ανεστραμμένος κατά 180° . Για να επιτύχουμε μία σταθερή σχέση φάσης στο σήμα τα δεδομένα πρέπει να λαμβάνονται αυστηρά από την ίδια πλευρά του κιβωτίου ταχυτήτων. Για παράδειγμα για τα δεδομένα μέτρησης ταχύτητας που συλλέχθηκαν για αυτό το βιβλίο, σε περίπτωση που υπάρχει πρόβλημα χαλαρότητας μεταξύ των κατατομών, η δεύτερη αρμονική βρίσκεται στην κορυφή του χρονικού σήματος και τα προβλήματα συνεργασίας μεταξύ των δοντιών βρίσκονται στη «βάση» του σήματος. Σε αυτήν την περίπτωση η σωστή πλευρά για την συλλογή δεδομένων στο κιβώτιο ταχυτήτων με ένα μετατροπέα ταχύτητας είναι η

πλευρά εισόδου. Αυτός ο εμπειρικός κανόνας βασίζεται στην εμπειρία και σε δεδομένα που πάρθηκαν από οδηγίες ισχύος μέσω κιβωτιών ταχυτήτων σε μηχανές χαρτιού για πάνω από 20 χρόνια. Η πλευρά εισόδου της ισχύος είναι το μόνο μέρος από το οποίο μπορούν να παρθούν δεδομένα και οι σχέσεις φάσεις είναι πάντοτε σταθερές και σωστές. Για τις περισσότερες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένας μετατροπέας ταχύτητας. Η φάση των δεδομένων που πάρθηκαν με ένα επιταχυνσιόμετρο και με μετατροπέα ταχύτητας ήταν μετατοπισμένη κατά 180° σε σχέση με τα δεδομένα που πάρθηκαν με ένα μετατροπέα ταχύτητας. Ένας αναλυτής πρέπει να έχει το παραπάνω κατά νου, όtn χρησιμοποιεί επιταχυνσιόμετρα και μετατροπείς μετατόπισης.

8.2)Εργαλεία για την συλλογή και επεξεργασία δεδομένων:

Η επιλογή του δοκιμαστικού εξοπλισμού με τον οποίο θα πραγματοποιήσουμε τις αναλύσεις είναι πολύ σημαντική. Εάν δεν επιλεγεί ο κατάλληλος εξοπλισμός, τα σφάλματα ενδέχεται να εμφανιστούν σε όλα τα στάδια της ανάλυσης των μετρήσεων. Γι αυτόν τον λόγο απαιτείται ένας πλήρως προγραμματιζόμενος αναλυτής φάσματος πραγματικού χρόνου(RTA).Ο παραπάνω αναλυτής πρέπει να έχει τα κατάλληλα φίλτρα αποδιαμόρφωσης φάσματος που να βεβαιώνουν ότι οι συχνότητες που λαμβάνονται είναι οι πραγματικές. Προκειμένου να μελετήσουμε σε βάθος διαφορετικά τμήματα του αρχικού φάσματος συχνοτήτων, εστιάζουμε στα επιθυμητά κομμάτια σε διάφορα παράθυρα και τα μεγανθύνουμε σε πραγματικό μέγεθος. Αυτό παρέχει την απαραίτητη ανάλυση ώστε να μετρήσουμε με ακρίβεια τις πλευρικές ζώνες γύρω από οποιαδήποτε συχνότητα. Για να υπάρχει η απαραίτητη ανάλυση για την ακριβή μέτρηση του χρονικού σήματος απαιτείται η καταγραφή ενός μεγάλου χρονικού διαστήματος. Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού έχουμε αδιάκοπη καταγραφή των δεδομένων μεγάλων χρονικών περιόδων στον σκληρό δίσκο. Το λογισμικό θα έπρεπε να επιτρέπει να υπάρχει όλο το χρονικό διάστημα για να εμφανιστεί η συχνότητα σύμπλεξης μεταξύ των οδόντων(HTF), με αρκετή ευκρίνεια για ανάλυση. Μερικές από τις κυριότερες πηγές σφαλμάτων στην ανάλυση που υπήρχουν μέχρι και σήμερα είναι η αποτυχία να επεξεργαστούμε τα δεδομένα με αρκετή ανάλυση ώστε να μετρήσουμε με ακρίβεια τις συχνότητες και τις χρονικές περιόδους. Εφόσον, η ανάλυση δεν μπορεί να πραγματοποιείται πάντα στην τοποθεσία που είναι εγκατεστημένος ο εξοπλισμός, ή αυτός μπορεί να μην είναι διαθέσιμος για ολόκληρη την χρονική περίοδο που απαιτείται για την ανάλυση, χρειάζεται ακόμη μία μέθοδος για την συλλογή δεδομένων.

Ένας υψηλής ακρίβειας ψηφιακός καταγραφέας ήχου(DAT), είναι ο καταλληλότερος για αυτόν τον σκοπό. Η συχνότητα απόκρισης θα πρέπει να κυμαίνεται τουλάχιστον από 0 έως 20 kHz και με δυνατότητα αποδιαμόρφωσης. Ένας 4-κάναλος καταγραφέας ήχου είναι κατάλληλος για τις περισσότερες εφαρμογές, αφού ο αριθμός των τεσσάρων μετατροπέων είναι ο μεγαλύτερος; Που μπορεί να χειριστεί ένα άτομο. Από την άλλη 8 ή 16 κανάλια είναι απαραίτητα για ορισμένες εφαρμογές. Ένα δυναμικό εύρος των 90 dB είναι το βιομηχανικό standard για τους περισσότερους εξοπλισμούς που χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν κραδασμούς σε κάποιες διατάξεις.

Σε συνθήκες συνθήκες όταν υπάρχει πρόβλημα σε κάποια μηχανή, το γεγονός που αντιπροσωπεύει το πρόβλημα συνήθως εμφανίζεται μέσα σε ένα χρονικό διάστημα τριάντα δευτερολέπτων. Μπορεί να χρειαστούν 3 ή και 4 λεπτά για μηχανές που περιστρέφονται με πολύ μικρές ταχύτητες. Για παράδειγμα κατά την επεξεργασία

δεδομένων στην συχνότητα των 2,5 Hz και των 400 γραμμών ανάλυσης, χρειάζονται $2,5/400 = 0,00625$ άρα: $1/0,00625 = 160$ sec για να καταγραφεί στην μνήμη. Για τις περισσότερες εφαρμογές η καταγραφή δεδομένων από κάθε σημείο για 30sec είναι ικανοποιητική. Εάν καταγράφονται δεδομένα από 4 σημεία για 30sec, θα χρειάζονταν άλλα 30sec για να καταγραφούν και τα 4 κανάλια στον σκληρό δίσκο. Όταν γίνεται η επεξεργασία των αποθηκευμένων στον σκληρό δίσκο δεδομένων αυτή είναι πολύ γρήγορη. Η αυξημένη ταχύτητα παρουσιάζεται επειδή η περίοδος της μνήμης γεμίζει γρηγορότερα και δεν υπάρχει ανάγκη να γυρίσει μπρος ή πίσω η ταινία(ή οποιαδήποτε συσκευή αποθήκευσης), ή να επικοινωνήσουν με τον καταγραφέα της ταινίας.

8.3)Χαρακτηριστικά προγράμματος ανάλυσης της λειτουργίας των γραναζιών:

Ένα πρόβλημα ανάλυσης της λειτουργίας των γραναζιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των εκπεμπόμενων συχνοτήτων του γραναζιού πολύ αποτελεσματικότερα σε σχέση με τους υπολογισμούς στο χέρι. Τα μόνα στοιχεία που απαιτείται να εισάγουμε είναι ο αριθμός των δοντιών στο κάθε γρανάτζι και η ταχύτητα ενός γραναζιού ή η συχνότητα εμπλοκής γραναζιών(GMF). Ένα καλό λογισμικό πρόγραμμα θα έπρεπε να εμφανίζει τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Την συχνότητα εμπλοκής γραναζιών και τις αρμονικές της, τόσο για έναν σταθερό άξονα, όσο και για τα πλανητικά συστήματα.
2. Τις κλασματικές υποδιαιρέσεις της συχνότητας εμπλοκής γραναζιών.
3. Την ταχύτητα των γραναζιών.
4. Την συχνότητα σύμπτωσης των γραναζιών.
5. Ένα επί τοις εκατό ποσοστό της προσδοκώμενης διάρκειας ζωής.
6. Τον αστάθμητο παράγοντα (ταυτοποιεί τον αριθμό των σπασμένων δοντιών σε κάθε γρανάτζι).
7. Τον κοινό παράγοντα(δειχνει με τι ρυθμό εμπλέκεται το σπασμένο δόντι).
8. Την συνιστώμενη από την AGMA ποιότητα γραναζιού, βασιζόμενη στην ταχύτητα περιστροφής της ονομαστικής διαμέτρου του γραναζιού.
9. Την σχέση μείωσης.
10. Θα πρέπει να προσομοιάζει την περιστροφή του γραναζιού. Αυτό επιτρέπει στον χρήστη να «μαρκάρει» ένα ή περισσότερα δόντια σ ένα γρανάτζι και να παρατηρεί τις επιδράσεις στο άλλο γρανάτζι.

8.4)Χαρακτηριστικά προγράμματος ανάλυσης σήματος:

Ένα πρόγραμμα ανάλυσης σήματος επιτρέπει στον χρήστη να εισάγει και να βλέπει ορισμένες συχνότητες προκειμένου να καθορίσει τις επιδράσεις της φάσης και του πλάτους όταν τα σήματα προστίθονται, αφαιρούνται και διαμορφώνονται. Τα χρονικά σήματα πριν να αναμιχθούν μπορούν να παρατηρηθούν με την βοήθεια ενός λογισμικού FFT που διατίθεται για την παρατήρηση του φάσματος συχνοτήτων και φάσεων. Το σύνθετο σήμα παρουσιάζεται αφού έχουν αναμιχθεί τα σήματα. Η σχέση φάσεως μεταξύ των σημάτων και του πλάτους κάθε σήματος μπορούν να αλλαχθούν από τον χρήστη και έτσι να παρατηρηθούν οι επιδράσεις της φάσης και του πλάτους. Αυτό το πρόγραμμα επίσης περιλαμβάνει διαμόρφωση πλάτους και φάσης και ένα λογισμικό FFT. Αυτή η δυνατότητα απαιτείται για όσους θέλουν μία καλύτερη κατανόηση του χρονικού σήματος και ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Βιβλιογραφία:

- [1] James I. Taylor,- «The Gear Analysis Handbook» Published by The Vibration Institute's Technical Publications , First Edition

Κεφάλαιο 9ο

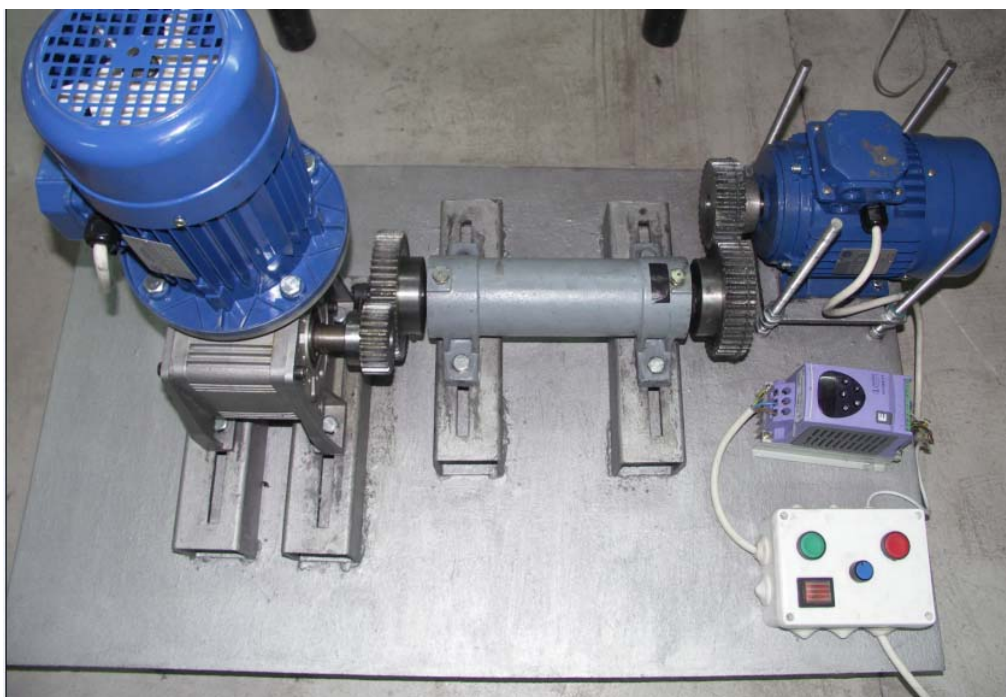
Κατασκευή της πειραματικής διάταξης:

9.1 Εισαγωγή:

Ένα από τα βασικά στοιχεία που βοηθά στη λήψη, την αξιολόγηση καθώς και την επεξεργασία των μετρήσεων, είναι η καλή γνώση των στοιχείων μηχανών που αποτελούν το σύστημά μας. Αν και μόνο η γνώση της διαμέτρου της ατράκτου, των στροφών ανά λεπτό και του αριθμού των δοντιών ενός γραναζιού είναι στοιχεία ικανά για τον έλεγχο του με τη χρήση του T-30, η ακριβής γνώση των στοιχείων του βοηθά ακόμη περισσότερο το πρόγραμμα στην ακριβέστερη επεξεργασία των μετρήσεων. Με βάση αυτήν την παρατήρηση, κατασκεύασα μία διάταξη μετάδοσης κίνησης με γρανάζια πάνω στα οποία προσομοίωσα ορισμένες βλάβες που πιστευα(βάσει της βιβλιογραφίας) ότι θα μου αποδωθούν με ξεκάθαρο τρόπο πάνω στο φάσμα κραδασμών που θα πάρω με την βοήθεια του μηχανήματος T30.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, πετύχαμε την όσο το δυνατό καλύτερη προσομοίωση(και απομόνωση) των βλαβών και των συνθηκών μετρήσεων με δεδομένα εξαρτήματα. Για την κατασκευή του απαιτήθηκε μελέτη, κυρίως, των διαστάσεων των εξαρτημάτων. Απαραίτητα εξαρτήματα κρίθηκαν : ένα ασύγχρονο τριφασικό φλατζωτό μοτέρ, ισχύος 1 Hp του οποίου η έξοδος είναι συνδεδεμένη με ένα μειωτήρα(σχέσης μετάδοσης 1/7) γωνιακής μετάδοσης, γρανάζια ποικίλων ονομαστικών διαμέτρων με 2,5 ή 3 module, ένα μονομπλόκ σύστημα αυτόνομης διπλής έδρασης(CAP) με εσωτερική διάμετρο ρουλεμάν 25mm και ένα ασύγχρονο τριφασικό 1Hp το οποίο συνδέθηκε με ένα inverter και μπορεί να λειτουργήσει σαν φρένο στην όλη διάταξη. Ακόμα για να προσδώσω το χαρακτηριστικό της εναλλαξιμότητας στις διαμέτρους των γραναζιών που δύναται να χρησιμοποιηθούν στην πειραματική διάταξη κατασκεύασα τα επόμενα εξαρτήματα: 4 τετράγωνους χαλύβδινους κοιλοδοκούς(DIN 17100) 70*70 και πάχους 5mm συνολικού μήκους περίπου 300m, δύο χαλύβδινες λάμες (200*200mm) οι οποίες από την μία χρησίμευσαν για την πρόσδεση του κινητήρα(η μία απ αυτές) και από την άλλη, για την πρόσδεση στο όλο σύστημα του βαθμού ελευθερίας της κατακόρυφης κίνησης. Τέλος σημειώνουμε ότι ο «ρεγουλαδόρος» που προείπαμε στηρίχτηκε πάνω σε 4 ντίζες M12 και σε σπείρωμα που δημιούργησα με κολαούζο στην λαμαρίνα της βάσης(χαλύβδινη διαστάσεων 1000*600*5mm).

Η συναρμολόγηση-κατασκευή του Project έγινε στο εργαστήριο των Στοιχείων Μηχανών του Ε.Μ.Π.



Φότο 9-1Φ1: Η πειραματική διάταξη ολοκληρωμένη

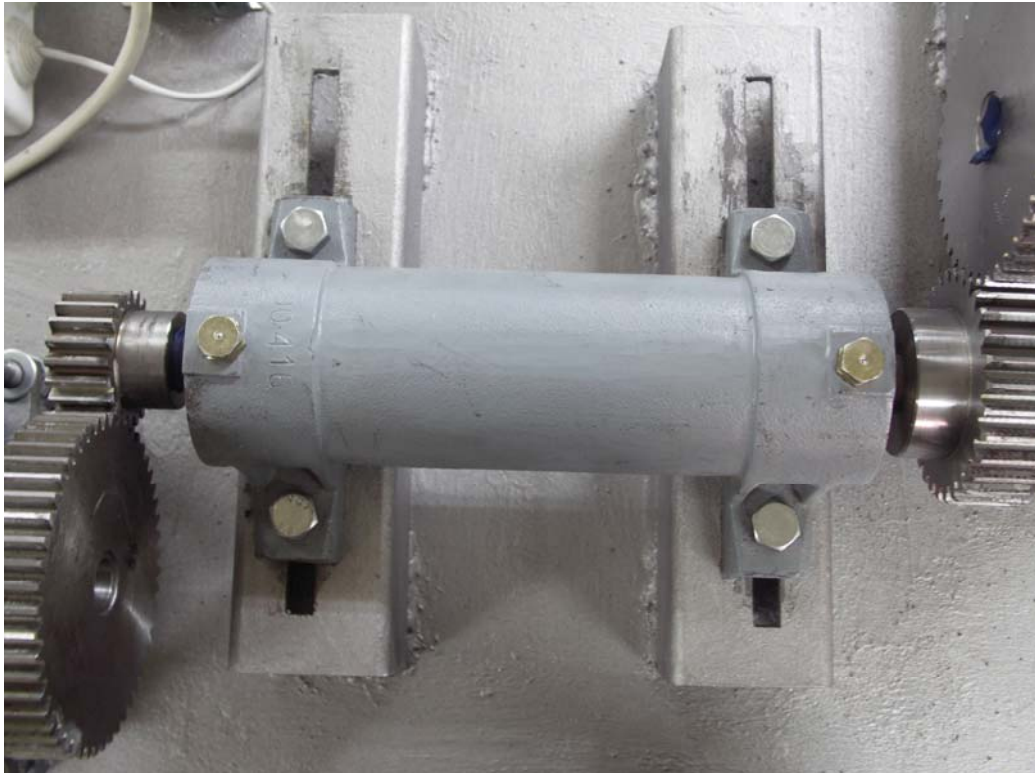
Κατάλογος εξαρτημάτων της πειραματικής διάταξης

α/α	Τεμάγια	Περιγραφή εξαρτήματος	Τύπος	Κωδικός κατασκευαστή	Διαστάσεις	Κατασκευαστής
1	1	Κουτί ηλεκτρολογικό			100mm x 150mm	Viokar
2	1	Inverter μονοφασικό	0,75 KW			Invertek
3	1	Ασύγχρονο τριφασικό μοτέρ	0,75 KW/1500RPM		Διάμετρος άξονα 19mm	Stamfam
4	1	Ασύγχρονο τριφασικό φλατζωτό μοτέρ			Διάμετρος άξονα 19mm	Stamfam
5	1	Σύστημα CAP αυτόνομης διπλής έδρασης	CAP	CAP 25	Παρουσιάζονται αναλυτικά κατά την περιγραφή του CAP	SKF
6	1	Φλατζωτός μειωτήρας γωνιακής μετάδοσης	Ατέρμονα κοιλία-κορώνας(σχέση μετάδοσης 1/7)			Τυποποιημένος
7		Γρανάζια διαφόρων αριθμών οδόντων 2,5m				Τυποποιημένα
8		Γρανάζια διαφόρων αριθμών οδόντων 3,0m				Τυποποιημένα
9	4	Τετράγωνος κοιλοδοκός			70*70*300 Πάχος:5mm	Τυποποιημένος
10	1	Λάμα πάνω στην οποία εδράζεται ο κινητήρας με $a/a=3$		Δικιάς μου κατασκευής		
11	4	Ντίζα M12 που χρησιμεύει ως ρεγουλαδόρος ύψους για την λάμα του κινητήρα			Ύψος:25cm	Τυποποιημένη
12	1	Χαλύβδινη βάση διάταξης			1200x600mm ²	

9-2 Λεπτομέρειες για την κατασκευή της διάταξης:

1. Η κατασκευή άρχισε με την προμήθεια των 4 τετράγωνων κοιλοδοκών. Προτιμήσα αυτούς τους κοιλοδοκούς, αφού θεώρησα πως είναι η μικρότερη δυνατή διάσταση που επιτρέπει την εύκολη σύσφιξη και αποσύσφιξη των διάφορων εξαρτημάτων σ' αυτούς (αύξηση λειτουργικότητας).
2. Εν συνεχεία αυτοί κατεργάστηκαν στην υδροκοπή έτσι ώστε να ανοιχτούν οι οδηγοί στην μία πλευρά καθενός απ αυτούς, συνολικού μήκους 30cm και πλάτους 12mm. Η οπή είναι μετατοπισμένη σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας ως προς το πλάτος κατά 5mm και στους 4 κοιλοδοκούς.



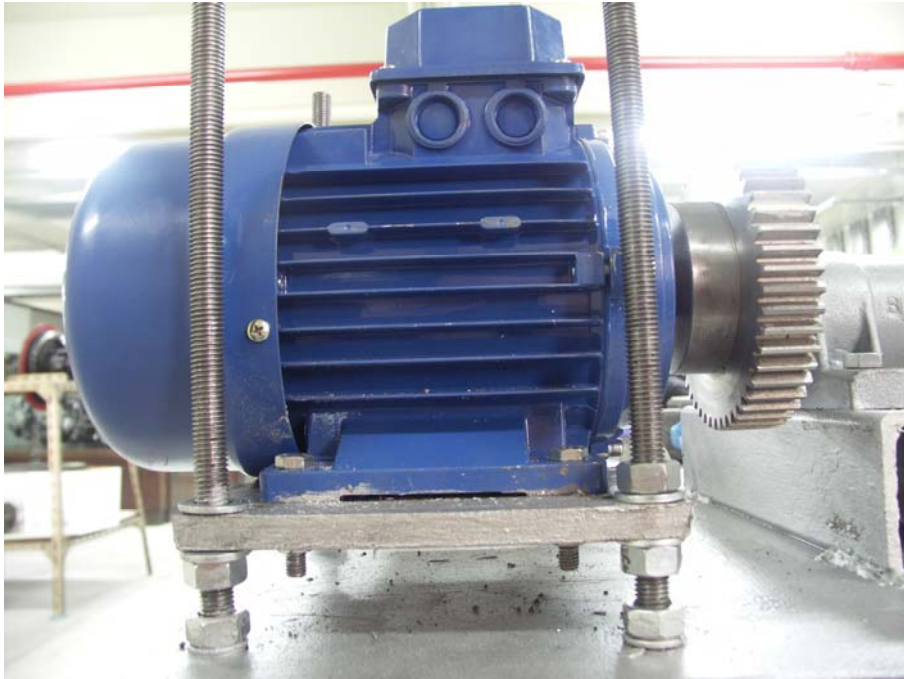


Φώτο 9-2Φ1: Πρόωση και κάτοψη των κοιλοδοκών πάνω στους οποίους εδράζεται και μετατοπίζεται το CAP.

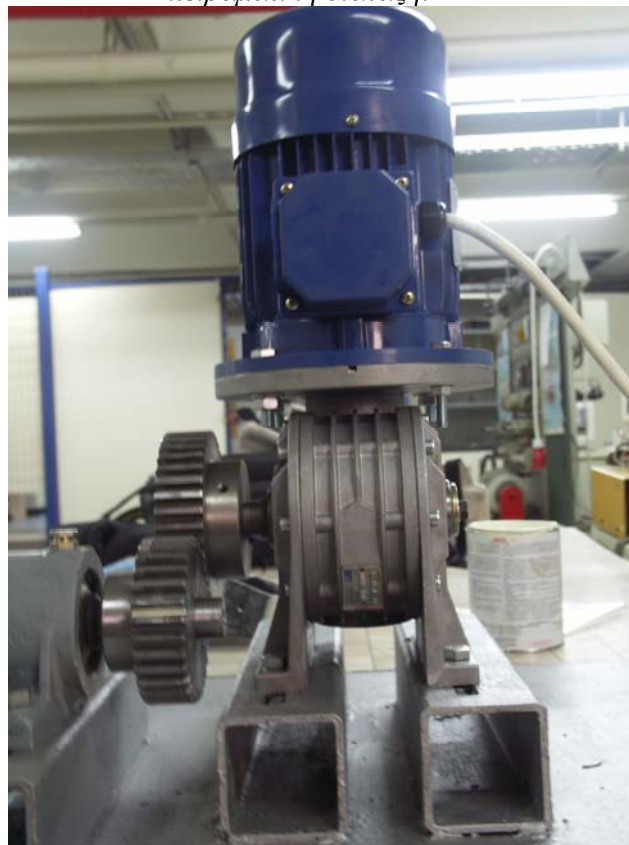
3. Αρχικά, έγινε το σημάδεμα και το ξετρύπημα στις λάμες και στην βάση της διάταξης. Αφού λοιπόν οι δύο λάμες συγκρατήθηκαν σε μέγγενη με ένα τρύπημα είχαμε πετύχει το σκοπό μας. Για τις τρύπες όπου προβλεπόταν να περάσουν οι 4 ντίζες M12 ανοίχτηκαν πρώτα τρύπες με ελικοεδές τρυπάνι 5mm και ύστερα με ελικοειδή τρυπάνια 8, 10.5 και 13mm αντίστοιχα. Όλα τα τρυπάνια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κοβαλτίου. Ακόμα, μία φορά κατά την διάρκεια όλων των τρυπημάτων χρειάστηκε τρόχισμα το τρυπάνι των 13mm, αφού από την ανάπτυξη τοπικών υπερθερμάνσεων οι πλευρές του τρυπανιού είχαν υποστεί φθορά.

Σημειώνεται πως όλες οι παραπάνω κατεργασίες έγιναν με φορητό δράπανο μεταβαλλόμενων στροφών Bosch GSB18RL(600W, 0-1500rpm).

4. Μετά, πήρα την μία από τις δύο λάμες και σημάδεψα την λαμαρίνα της βάσης. Άνοιξα στα τέσσερα σημαδεμένα σημεία οπές 5,8 και τέλος 10.5mm. Ύστερα με την χρήση χειροκίνητου κολαούζου για σπείρωμα M12, κατασκεύασα το εν λόγω σπείρωμα με την επιρόσθετη χρήση λαδιού για την διευκόλυνση της κατεργασίας και την όσο το δυνατόν μικρότερη καταπόνηση του κολαούζου. Σημειώνουμε, ότι στην κατασκευή μας έως τώρα δεν έχουμε λάβει υπερβολική μέριμνα για την ευθυγράμμιση ή την καθετότητα του κινητήρα ως προς την λαμαρίνα. Τέτοια ζητήματα θα αρχίσουν να μας απασχολούν μετά την τοποθέτηση και των υπόλοιπων εξαρτημάτων μας πάνω στην λαμαρίνα βάσης και κατά την διάρκεια του πονταρίσματος των κοιλοδοκών στις τελικές τους θέσεις.



Φώτο 9-2Φ2: Ρεγουλαδόρος ύψους για τον κινητήρα που χρησιμεύει σαν «φρένο» στην πειραματική διάταξη.



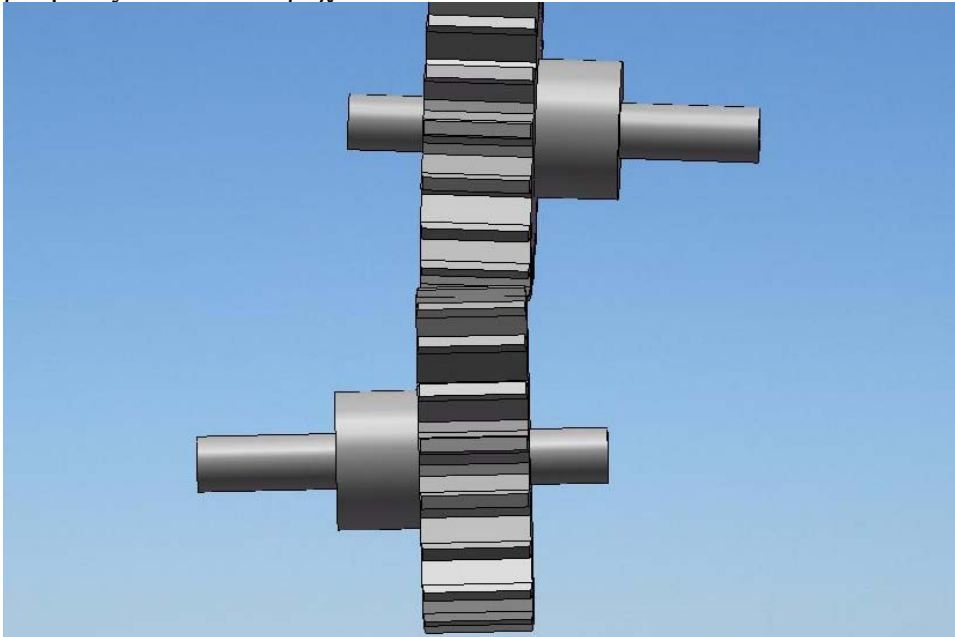
Φώτο 9-2Φ3: Συναρμολογημένο σύνολο φλατζωτού κινητήρα 1Hp και μειωτήρα γωνιακής μετάδοσης σχέσης μετάδοσης 1/7.

5. Σ αυτό το σημείο όλα τα εξαρτήματα της διάταξης μας ήταν έτοιμα. Το μόνο που απέμενε ήταν η συναρμολόγησή τους και η σταθεροποίησή τους. Σ όλες τις ατράκτους πόνταρα με την βοήθεια ενός τρυπανιού 5 και 8mm έτσι ώστε τοποθετώντας το γρανάζι στην τελική του θέση η σκουλικόβιδα να έμπαινε σ αυτήν την οπή και να μην υπήρχε κίνδυνος να περιστρέφεται το γρανάζι με διαφορετική ταχύτητα απ αυτήν της ατράκτου(να πατινάρει).
6. Σε όποιες ατράκτους η συναρμογή δεν ήταν σφικτή, τοποθέτησα μία στρώση μονωτικής ταινίας πάνω από την εκάστοτε άρακτο. Βέβαια, η εκκεντρότητα αλλά και η χαλαρότητα κατά την συνεργασία των κατατομών είναι περιπτώσεις βλαβών που δύναται να εμφανίζονται στο φάσμα ανάλυσης κραδασμών που παίρνουμε από το T30. Οπότε, μπορούμε να πειραματιστούμε και προς αυτήν την κατεύθυνση, αν τις απομονώσουμε κατά περίπτωση.
7. Σ' αυτή την χρονική στιγμή είχαμε όλα μας τα εξαρτήματα έτοιμα για να προσδεθούν πάνω στην λάμαρίνα-βάση. Η κατεργασία αυτή θα γίνει με συγκόλληση των κοιλοδοκών πάνω στην βάση. Για να ολοκληρωθεί αυτή η φάση θα πρέπει καταρχήν να προηγηθεί κάποια στοιχειώδης ευθυγράμμιση των κοιλοδοκών μεταξύ τους. Βέβαια, η πρώτη αυτή ευθυγράμμιση δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις ακρίβειας, αφού οι διάδρομοι των κοιλοδοκών πάνω στους οποίους εδράζονται το CAP και ο μειωτήρας είναι μεγαλύτεροι σε πλάτος από τις χρησιμοποιούμενες βίδες για τις εδράσεις των παραπάνω εξαρτημάτων. Έτσι, προσδίδεται στο CAP και στον μειωτήρα μας η δυνατότητα να στρέφονται κατά μικρές γωνίες, εάν αυτό είναι επιθυμητό, έτσι ώστε να εξαλείφεται η βλάβη της κακής ευθυγράμμισης όποτε αυτή δεν επιδιώκεται. Ένας πρακτικός τρόπος για τον έλεγχο της ευθυγράμμισης σε μία βαθμίδα οδοντωτών τροχών ευθείας οδότησης είναι ο εξής: Χρωματίζουμε σε ένα από τα δύο γρανάζια μας ένα δόντι και το αφήνουμε να εκτελέσει μία πλήρη περιστροφή σε εμπλοκή με το άλλο. Παρατηρούμε το αποτύπωμα που έχει αφήσει στο άλλο και βγάζουμε το συμπέρασμά μας ως εξής: Αν έχει χρωματιστεί ολόκληρη η κατατομή του δεύτερου γραναζιού τότε, σημαίνει πως η ευθυγράμμιση των εμπλεκόμενων γραναζιών είναι πολύ καλή. Αν όμως, έχει χρωματιστεί ένα πολύ μικρό κομμάτι στην άκρη της κατατομής ενός δοντιού του δεύτερου γραναζιού, αυτό σημαίνει πως τα δύο γρανάζια εμπλέκονται υπό γωνία και ότι η ευθυγράμμιση τους πρέπει να ξαναελεγχθεί.

9-3 Στόχοι που επιτευχθήσαν με την κατασκευή της διάταξης:

Η κατασκευή της διάταξης που βρίσκεται στο εργαστήριο των Στοιχείων Μηχανών του ΕΜΠ, μας έδωσε την δυνατότητα να μοντελοποιήμε πολύ εύκολα ποικίλες βλάβες σε γρανάζια και να παρατηρούμε τα εκπεμπόμενα φάσματα κραδασμών τόσο με όσο και χωρίς την επιβολή φορτίου. Εξάλλου το φορτίο επιβάλλεται μέσω του inverter και έτσι έχουμε την δυνατότητα να πειραματιστούμε και προς άλλες κατευθύνσεις όπως π.χ. η επίδραση της επιβολής φορτίου στο πλάτος της 1X GMF. Οι βλάβες των οδοντωτών τροχών που είναι δυνατόν να μοντελοποιήσουμε πολύ εύκολα με την πειραματική διάταξη είναι:

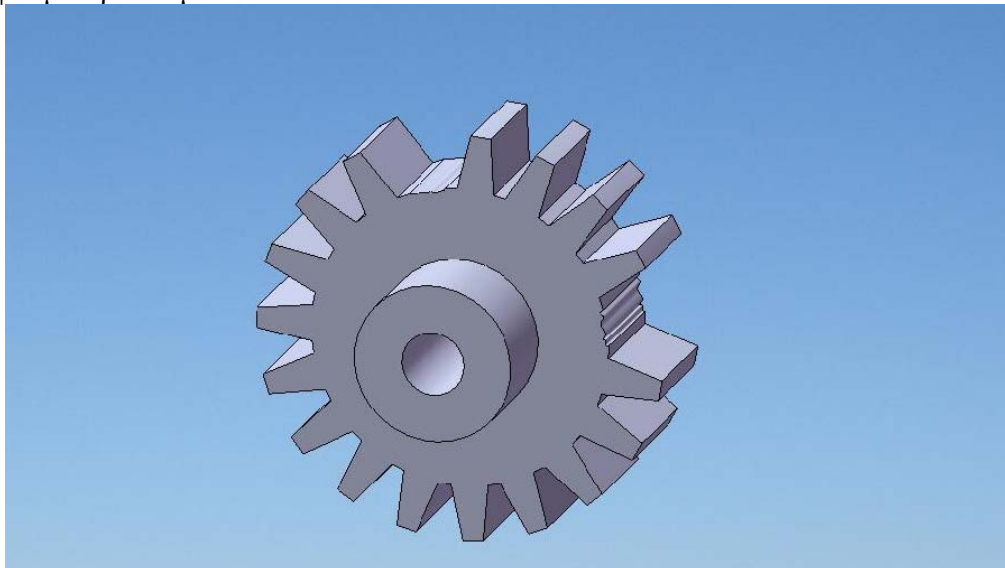
1. Επίδραση της κακής ευθυγράμμισης στο εκπεμπόμενο φάσμα κραδασμών μία βαθμίδα οδοντωτών τροχών.



Φώτο 9-3Φ4: Πρόβλημα ευθυγράμμισης σε βαθμίδα οδοντωτών τροχών.

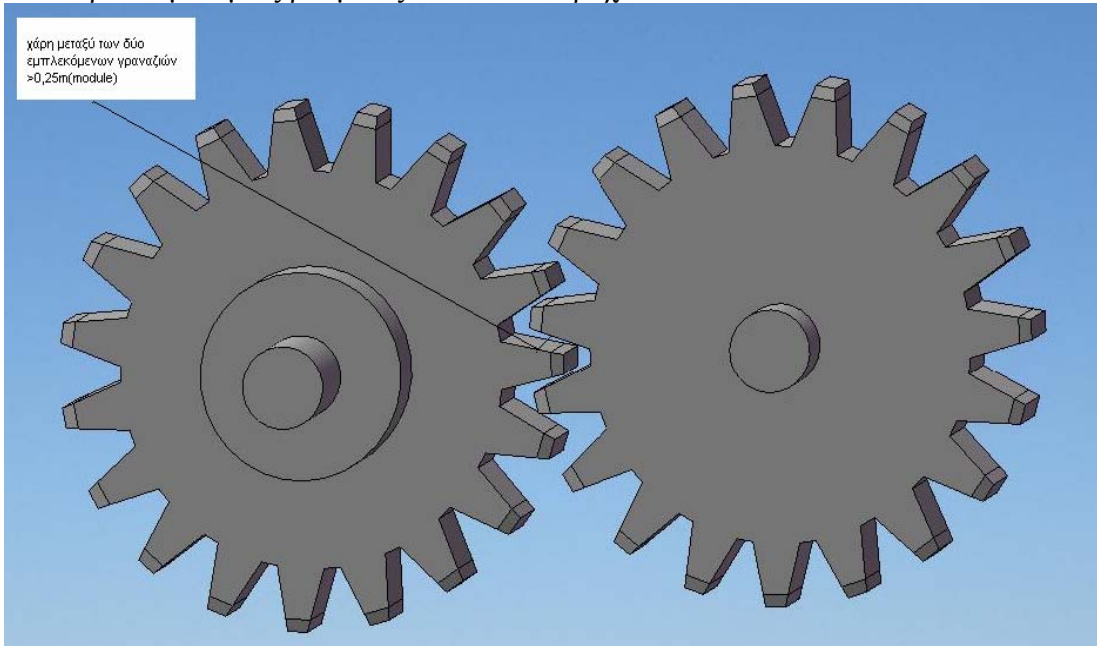
Λόγω του ότι οι οδηγί πάνω στους οποίους προσδέεται τόσο το CAP, όσο και ο μειωτήρας γωνιακής μετάδοσης έχουν πλάτος 12mm και οι βίδες με τις οποίες προσδέονται τα παραπάνω εξαρτήματα είναι M10, καταλαβαίνουμε πως τα εξαρτήματα αποκτούν κάποια δυνατότητα να μετακινούν τους άξονές τους ως προς κάποια γωνία (βλέπε φώτο 11-2Φ4).

2. Επίδραση ενός, δύο ή περισσότερων σπασμένων δοντιών στο εκπεμπόμενο φάσμα κραδασμών:



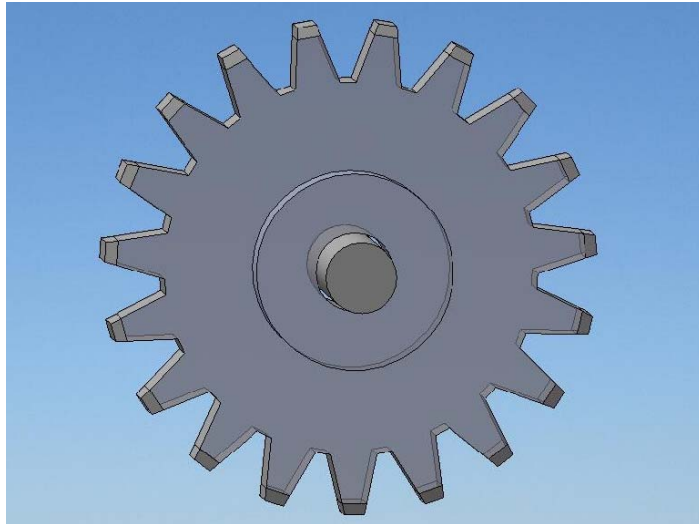
Φώτο 9-3Φ5: Δύο σπασμένα δόντια με απόσταση 90° μεταξύ τους σ' ένα γρανάζι.

- Η δυνατότητα του CAP και του μειωτήρα γωνιακής μετάδοσης ξεμοντάρονται τόσο εύκολα ,μας δίνει το πλεονέκτημα της εύκολης εναλαξιμότητας μεταξύ των γραναζιών. Μ'αυτόν τον τρόπο μπορούμε να ξεμοντάρουμε κάποιο γρανάζι, να του προκαλέσουμε οποιαδήποτε βλάβη(να του «κουρέψουμε» από την βάση ένα δόντι με την βοήθεια του τροχού, να μετατρέψουμε την κατατομή του δοντιού από το ιδανικό σχήμα σχήμα1-1 σε τρίγωνο) και να παρατηρήσουμε τη επίδραση της στο εκπεμπόμενο φάσμα.
3. Επίδραση της «μεγάλης» χάρης μεταξύ των κατατομών στο εκπεμπόμενο φάσμα κραδασμών μιας βαθμίδας οδοντωτών τροχών



Φώτο 9-3Φ6:Υπερβολική χάρη μεταξύ των κατατομών σε μια βαθμίδα γραναζιών.

- Όπως γνωρίζουμε η «ιδεατή» χάρη που πρέπει να επιβάλλεται σε μία βαθμίδα μετωπικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης είναι ίση με το $0,25m(\text{module})$. Η διάταξη που κατασκευάσαμε μας δίνει την δυνατότητα λοιπόν, να απομακρύνουμε εύκολα τα δύο εμπλεκόμενα γρανάζια σε απόσταση μεγαλύτερης του $0,25m$ (με το μάτι) και να δούμε την επίδραση της βλάβης αυτής μέσω του εκπεμπόμενου φάσματος κραδασμών.
4. Επίδραση της εκκεντρότητας στο εκπεμπόμενο φάσμα κραδασμών:



Φώτο 9-3Φ7: Πρόσδωση στο γρανάζι του χαρακτηριστικού της εκκεντρότητας μέσω υπερβολικής χάρης μεταξύ αυτού και του άξονα πάνω στον οποίο εδράζεται.

Στον άξονα του CAP ο οποίος βρίσκεται απέναντι από τον κινητήρα που λειτουργεί σαν φρένο στην διάταξή μας, είχε εξαρχής μεγάλη χάρη με το γρανάζι που εδραζόταν επάνω σ' αυτόν. Γι' αυτόν τον σκοπό τυλίξαμε γύρω απ' αυτόν μία στρώση μονωτικής ταινίας, έτσι ώστε να μειωθεί στο ελάχιστο η χάρη που προείπαμε. Πλέον, η πρόσδωση στον οδοντωτό τροχο του χαρακτηριστικού της εκκεντρότητας είναι εύκολη αν κάποιος αφαιρέσει την μονωτική ταινία.

5. Επίδρασης της «υποχώρησης» της ονομαστικής διαμέτρου ενός γραναζιού στο εκπεμπόμενο φάσμα κραδασμών:



Φώτο 9-3Φ8: «Υποχώρηση» της ονομαστικής διαμέτρου ενός οδοντωτού τροχού».

Η δυνατότητα του CAP και του μειωτήρα γωνιακής μετάδοσης ξεμοντάρονται τόσο εύκολα ,μας δίνει το πλεονέκτημα της εύκολης εναλαξιμότητας μεταξύ των γραναζιών. Μ' αυτόν τον τρόπο μπορούμε να ξεμοντάρουμε κάποιο γρανάζι και να προσαρτήσουμε κάποιο άλλο στην θέση του, του οποίου θα έχουμε ελαττώσει την ονομαστική του διάμετρο με την βοήθεια ενός τόννου.

Κεφάλαιο 10ο

Εισαγωγή στο πρόγραμμα Condmaster Pro2:

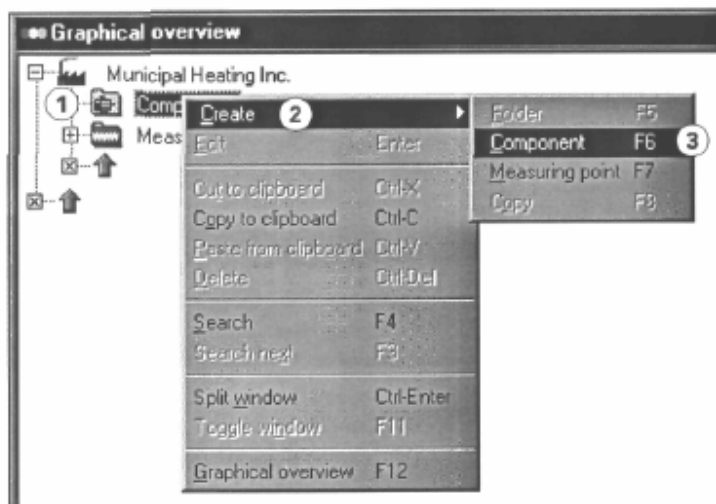
10.1 Εισαγωγή:

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 11. Η χρήση του έγκειται στην ανάλυση και επεξεργασία των μετρήσεων του οργάνου T-30

10.2 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 :

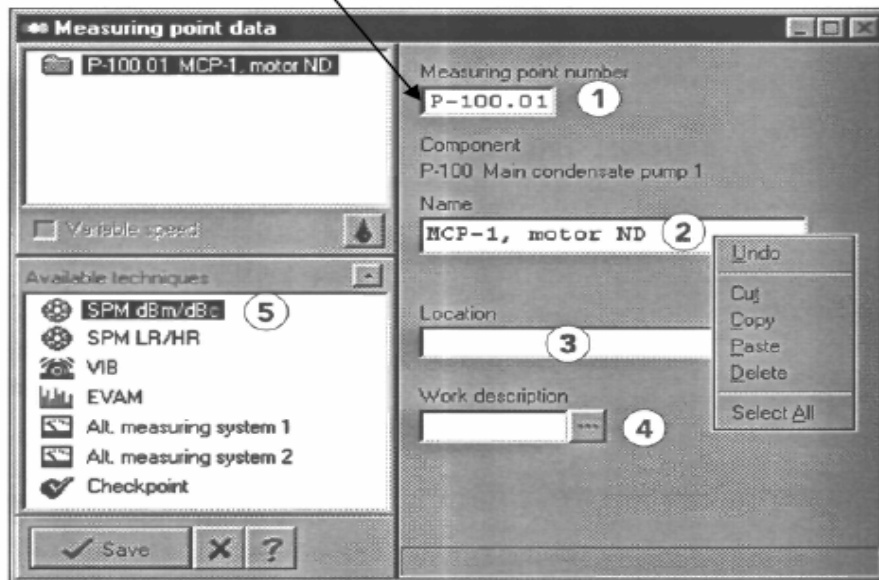
1) Αρχικά, εισάγουμε στο «δέντρο» μετρήσεων και επεξεργασίας του προγράμματος το νέο εξάρτημα που θέλουμε να μετρήσουμε (σχήμα 10.2.Σ1).



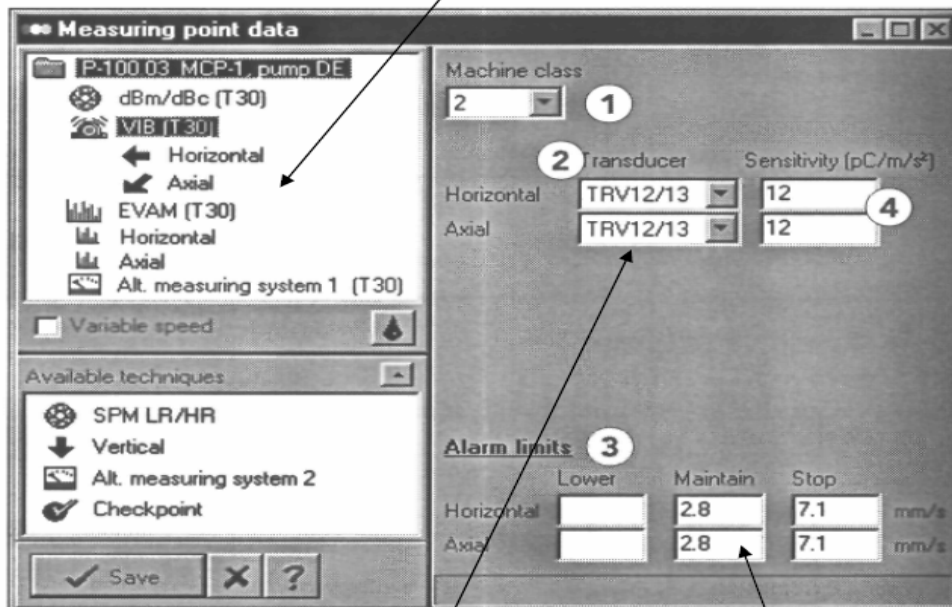
Σχήμα 10.2.Σ1: Δημιουργία στο δέντρο του προγράμματος

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 γριναζιών του - αν πρόκειται για κάποιο μειωτήρα - και τέλος, επιλέγουμε το είδος των μετρήσεων που θέλουμε να κάνουμε στο παραπάνω σημείο (σχήμα 10.2.Σ2 , 10.2.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.



Σχήμα 10.2.Σ2: Εισαγωγή στοιχείων για το σημείο μέτρησης. 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)

Σχήμα 10.2.Σ3: Θέσεις εισαγωγής δεδομένων στο πρόγραμμα

Τα είδη των μετρήσεων που μπορούμε να κάνουμε είναι :

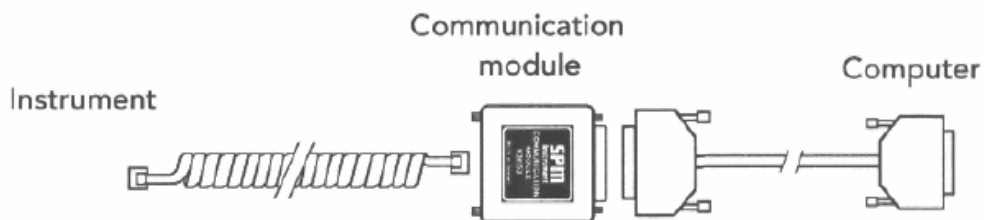
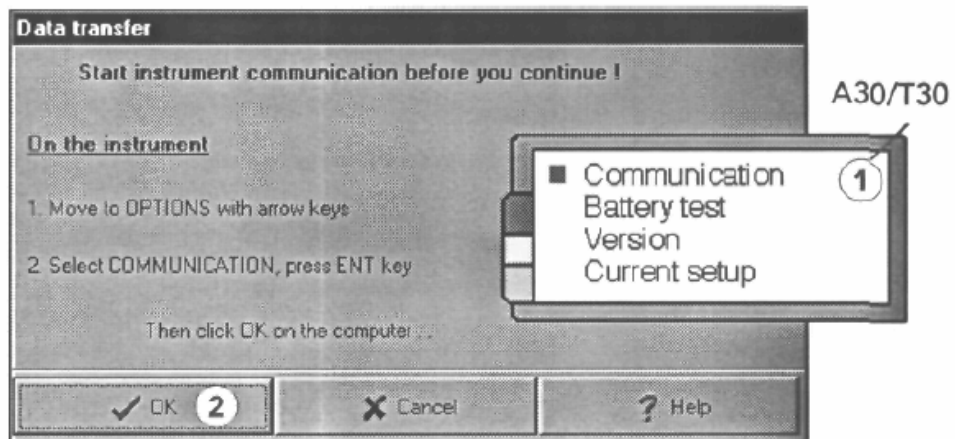
- Μέτρηση κρουστικών παλμών σε ένα ρουλεμάν με τη μέθοδο dBm/dBc
- Μέτρηση κραδασμών σε τρεις διευθύνσεις (οριζόντια, κατακόρυφη, αξονική) με τη μέθοδο VIB (vibration severity)
- Ανάλυση των μετρήσεων VIB και απεικόνιση του αποδιαμορφωμένου φάσματος των μετρήσεων με τη μέθοδο EVAM (evaluated vibration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

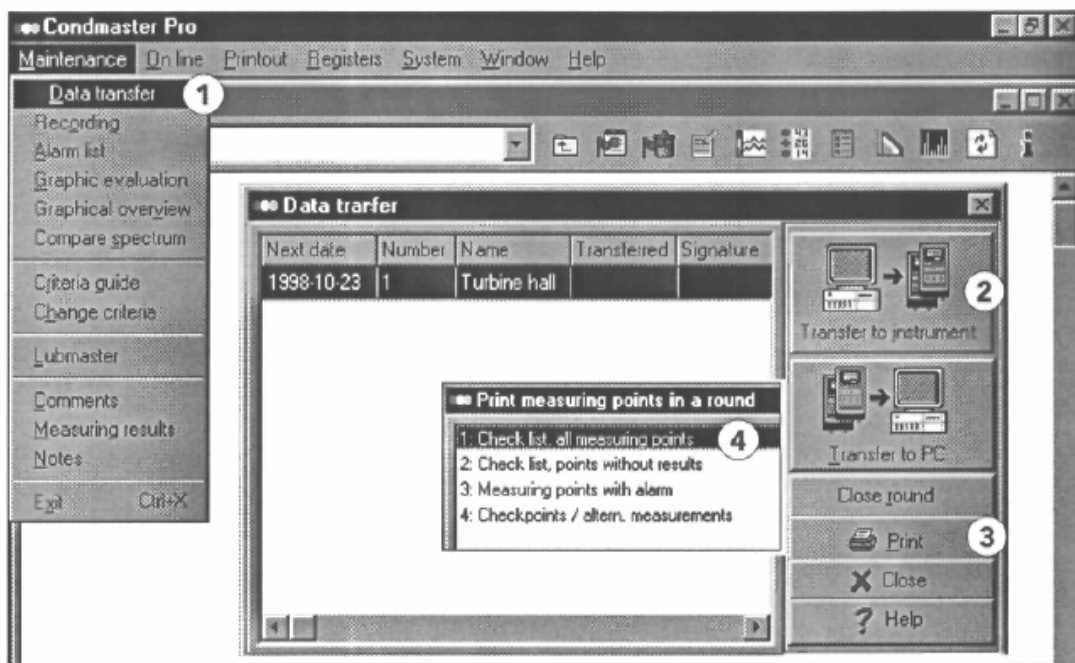
Στην περίπτωση που θέλουμε να κάνουμε συγκεκριμένους ελέγχους σε ένα εξάρτημα, για ένα ρουλεμάν π.χ. έλεγχο εξωτερικού δακτυλίου, σε μία άτρακτο π.χ. έλεγχο αζυγοσταθμίας κ.α. , μπορούμε να εισάγουμε μέσα στο EVAM τους ελέγχους αυτούς δίνοντας, κάποιες φορές, ορισμένα περαιτέρω στοιχεία για τα σημεία 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) Τα πάντα 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 10.2.Σ4) και στη συνέχεια από το menu *Data Transfer* μεταφέρουμε τα δεδομένα στο όργανο (σχήμα 10.2.Σ5).



Σχήμα 10.2.Σ4: Σύνδεση του PC με το T-30



Σχήμα 10.2.Σ5: Επιλογή μεταφοράς δεδομένων από το PC στο T-30

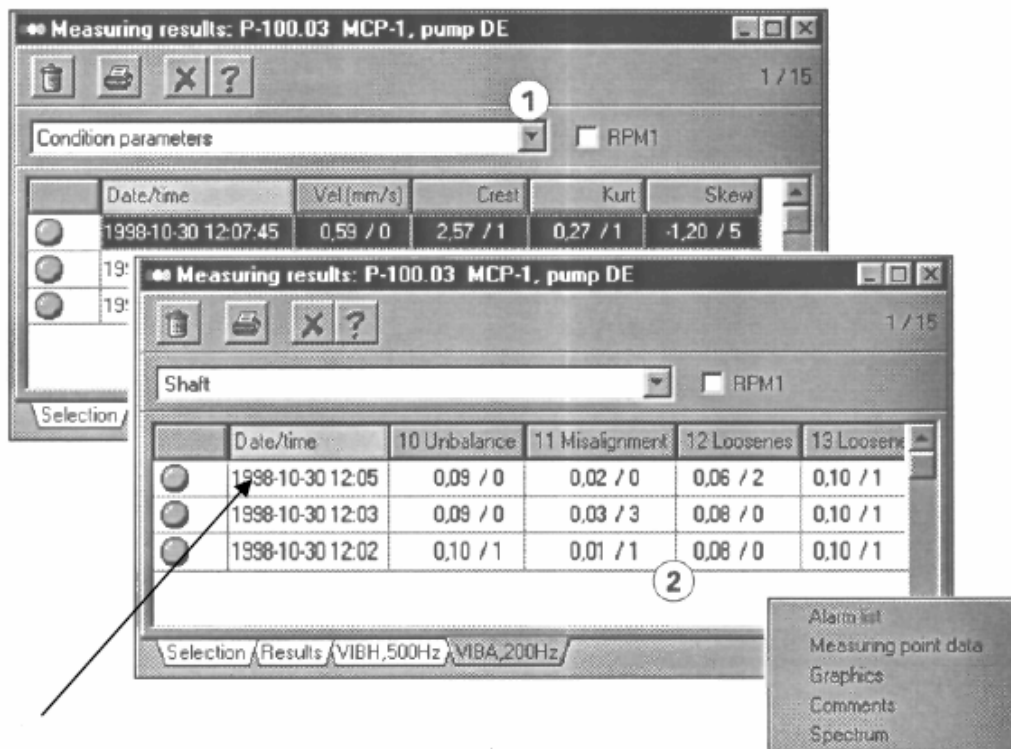
Μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας, τα σημεία μέτρησης των στοιχείων μηχανών έχουν μεταφερθεί στη μνήμη του οργάνου T-30. Τα πάντα είναι έτοιμα για τις μετρήσεις!

10.3 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 10.2.Σ4) και στη συνέχεια από το menu *Data Transfer* μεταφέρουμε τα δεδομένα στο PC.



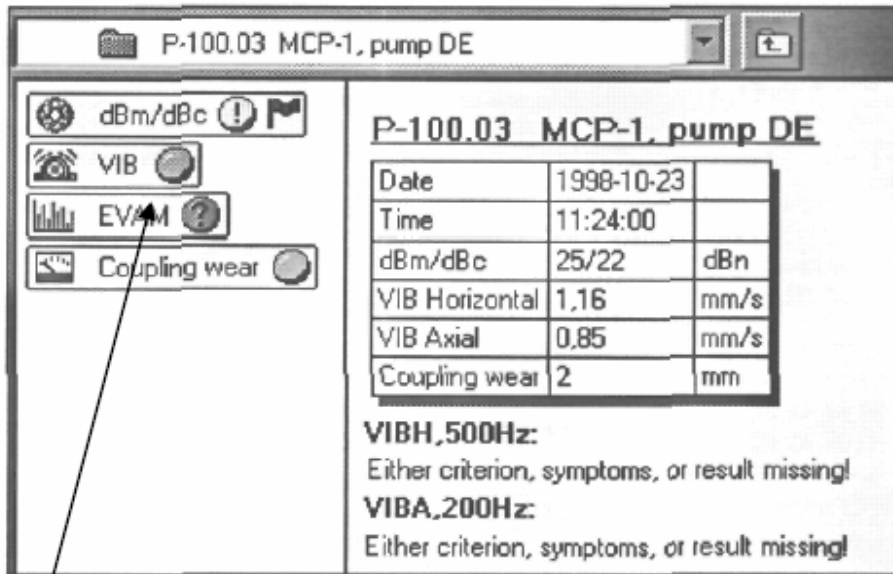
Σχήμα 10.3.Σ1:Επιλογή των μετρήσεων σε στοιχείο μηχανής με χρονολογική σειρά

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 10.3.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.

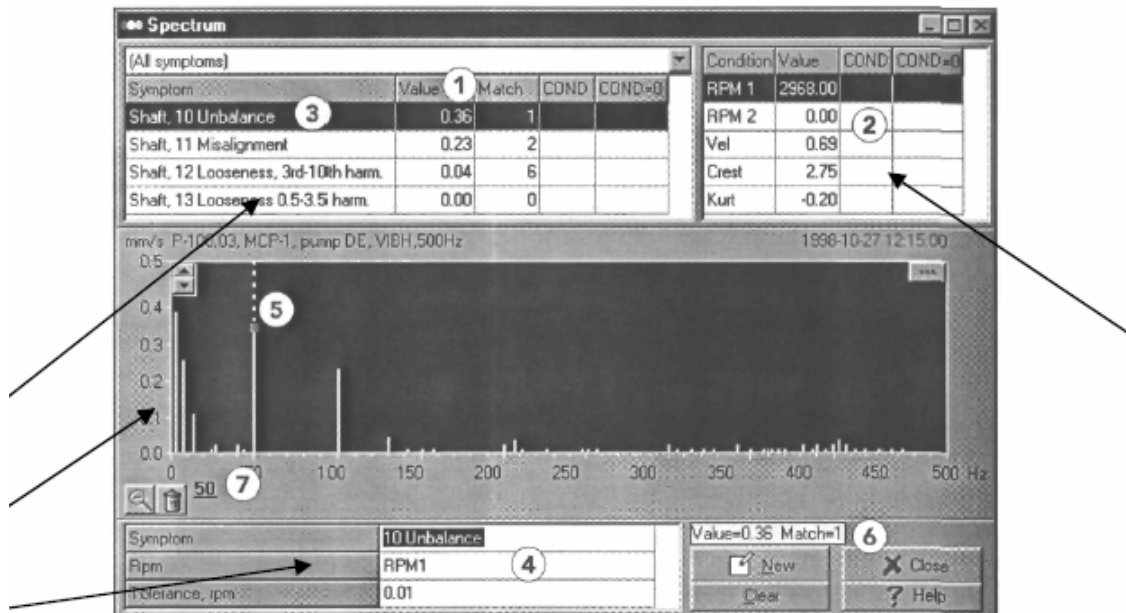
10.4 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα:

Επιλέγοντας ένα σημείο για προβολή και επεξεργασία των αποτελεσμάτων, παίρνουμε αρχικά την παρακάτω εικόνα (σχήμα 10.4.Σ1) :



Σχήμα 10.4.Σ1: Εμφάνιση αποτελεσμάτων

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 10.4.Σ2) του προγράμματος, στις τρεις διαφορετικές διευθύνσεις των μετρήσεων (οριζόντια, κατακόρυφη, αξονική).

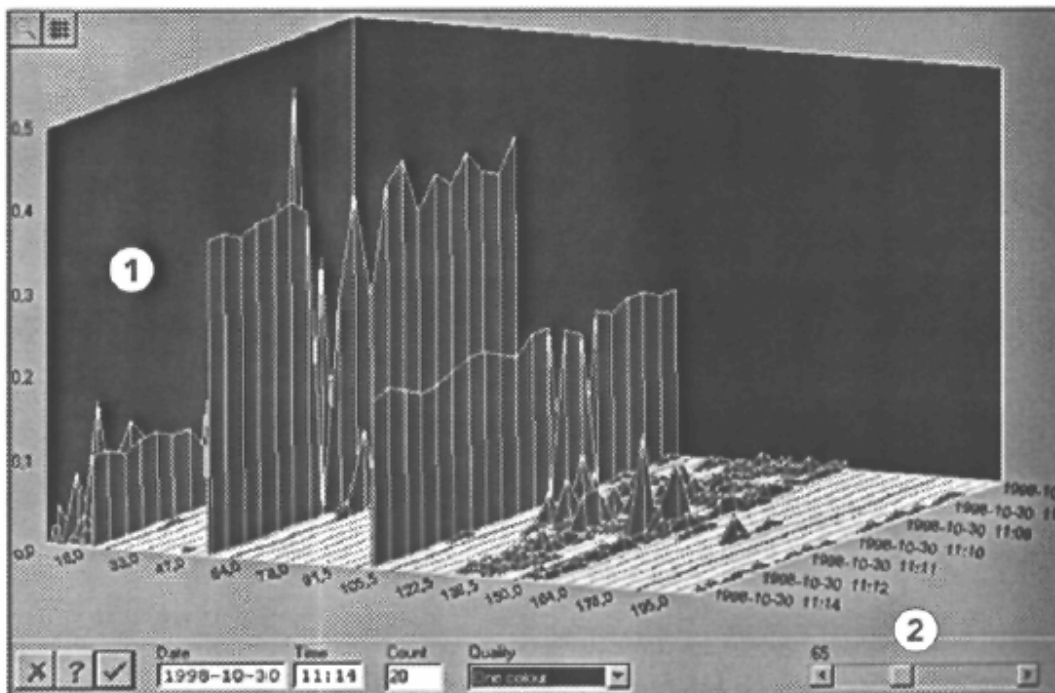


Σχήμα 10.4.Σ2: Φασματική ανάλυση του σήματος από μέτρηση σε οριζόντια θέση (VIB H)

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.

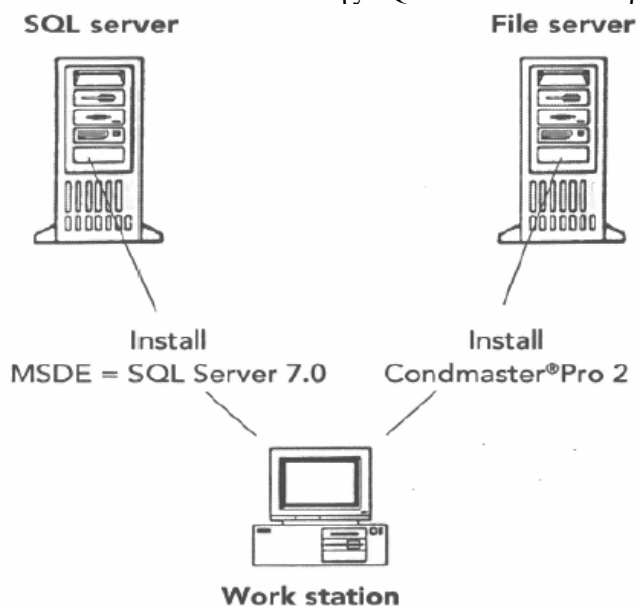
Τέλος, για την πρόληψη και καλύτερη αντίληψη της πορείας λειτουργίας ενός στοιχείου μηχανής, το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να μας προβάλλει γραφικά τα αποτελέσματα του αποδιαμορφωμένου φάσματος σε συνάρτηση του χρόνου. Έτσι, έχουμε τη δυνατότητα της παρακολούθησης κάποιου προβλήματος μέσω των αυξομειώσεων του ύψους των αιχμών του στο φάσμα του χρόνου (σχήμα 10.4.Σ3) .



Σχήμα 10.4.Σ3: Φάσμα του αποδιαμορφωμένου σήματος συναρτήσεως του χρόνου

Θα πρέπει, τέλος, να σημειώσουμε ότι το πρόγραμμα κάνει χρήση της SQL server 7.0 για αυτόματη καταχώρηση και αποθήκευση των αποτελεσμάτων. Με τον τρόπο αυτό, κανένας χρήστης δεν μπορεί να χάσει αποτελέσματα αφού κάθε φορά η database του αποθηκεύεται και στον κεντρικό SQL server και μάλιστα σε αρχεία πολύ μικρής χωρητικότητας. Αυτό, είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα του προγράμματος που απαλλάσσει το χρήστη από τη δημιουργία συχνών αντιγράφων των δεδομένων του.

Η σύνδεση με τον server γίνεται μέσω του διαδικτύου (σχήμα 10.4.Σ4) και μετά την εγκατάσταση από το Condmaster Pro 2 της SQL 7.0 στον υπολογιστή.



Σχήμα 10.4.Σ4:Χρήση της SQL για αποθήκευση των δεδομένων

Βιβλιογραφία:

- [1] Εγχειρίδιο Προγράμματος Condmaster Pro 2 και Οργάνου T-30,
SPM Instrument.
- [2] Διπλωματική εργασία με θέμα «Διάγνωση βλαβών σε περιστρεφόμενα στοιχεία μηχανών», *Τσαντιώτης Δημήτρης, Αθήνα 2005.*

Κεφάλαιο 11ο

Εισαγωγή στο μηχάνημα SPM T-30:

11.1.1 Εισαγωγικά στοιχεία:

Το μηχάνημα T-30 (σχήμα 11.1.1.Σ1) είναι της Σουηδικής εταιρείας SPM Instrument. Διατίθεται σε τρεις διαφορετικές εκδόσεις : τη βασική (1), την ενδιάμεση (2) και την εξειδικευμένη (3).



Σχήμα 11.1.1.Σ1

Η «βασική», μετρά τον κρουστικό παλμό, την ένταση των κραδασμών, την ταχύτητα και τη θερμοκρασία. Δεν έχει καμία λειτουργία αυτόματης καταγραφής στοιχείων, και έτσι αυτός που μετρά καταγράφει τα αποτελέσματα με το χέρι. Μπορεί να τεθεί σε συνεχή μέτρηση αλλά δεν καταγράφει τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται.

Η «ενδιάμεση», μετρά τις ίδιες ποσότητες. Όμως, παίρνει τις οδηγίες μέτρησης από ένα PC και φορτώνει τη μέτρηση των αποτελεσμάτων μέσω του καλωδίου στο PC με τη χρήση του προγράμματος Condmaster Pro. Κατά συνέπεια, αυτή η έκδοση μπορεί επίσης να φορτωθεί με τα σχόλια και τα σημεία ελέγχου καθώς επίσης και τις οδηγίες για τη συνεχή καταγραφή της δόνησης, του κρουστικού παλμού, της ταχύτητας και της θερμοκρασίας.

Η «εξειδικευμένη», έχει όλα τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των ανωτέρω. Επιπλέον, χρησιμοποιεί τη μέθοδο EVAM για την επίδειξη φάσματος δόνησης και την ανάλυση δόνησης.

Η έκδοση που διαθέτουμε στο Ε.Μ.Π. είναι η εξειδικευμένη (3).

11.1.2 Λειτουργίες του μηχανήματος:

Η πλήρης δυνατότητα του οργάνου μέτρησης πραγματοποιείται στην εξειδικευμένη έκδοση (3). Για μερικές από τις λειτουργίες, τα βασικά στοιχεία δεν

μπορούν να εισαχθούν μέσω του αριθμητικού πληκτρολογίου αλλά σώζονται στο Condmaster Pro και μεταφορτώνονται από το PC.

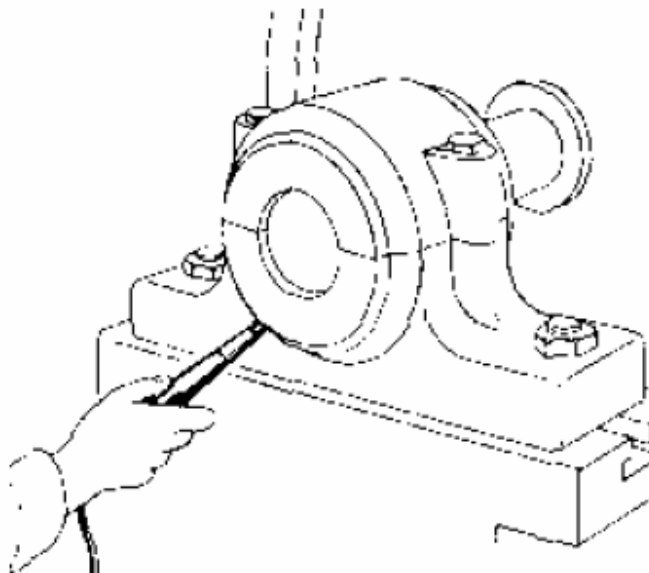
Το μηχάνημά μας μπορεί να πάρει τις ακόλουθες μετρήσεις :

- Μέτρηση κρουστικού παλμού. Χρησιμοποιεί την τεχνική dBm/dBc.
- Μέτρηση της έντασης της δόνησης (VIB). Οι εκδόσεις (2) και (3) του οργάνου, μπορούν εκτός από τη μέτρηση της έντασης της δόνησης (σύμφωνα με τα ISO) να κάνουν και καταγραφή του φάσματος. Το όργανο, μπορεί να μεταφέρει μέχρι 200 γραμμές στο πρόγραμμα Condmaster Pro, όπου υπάρχουν και οι γραφικές απεικονίσεις.
- Μέτρηση ταχύτητας περιστροφής / λεπτό με τη χρήση του κατάλληλου αισθητήρα.
- TEMP μέτρηση θερμοκρασίας με τη χρήση του κατάλληλου αισθητήρα.
- Εναλλακτική μέτρηση ALT (στην ενδιάμεση (2) και εξειδικευμένη έκδοση (3)), που σημαίνει, εισαγωγή μιας άλλης ποσότητας όπως η ροή ή η πίεση και κατάλληλη επεξεργασία μετέπειτα στο πρόγραμμα Condmaster Pro.

Οι παραπάνω μετρήσεις μπορεί να γίνουν άμεσα για ένα σημείο από το T-30, ή με μεταφόρτωση των σημείων μέτρησης από το PC στο T-30, όπως έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 5. Στην περίπτωση αυτή, αρχικά επιλέγουμε το εξάρτημα και το σημείο μέτρησης από την οθόνη του T-30 και στη συνέχεια ακολουθούν οι μετρήσεις οι οποίες και αποθηκεύονται για μελλοντική μεταφόρτωση και επεξεργασία στο PC.

11.1.3 Όργανα μετρήσεως:

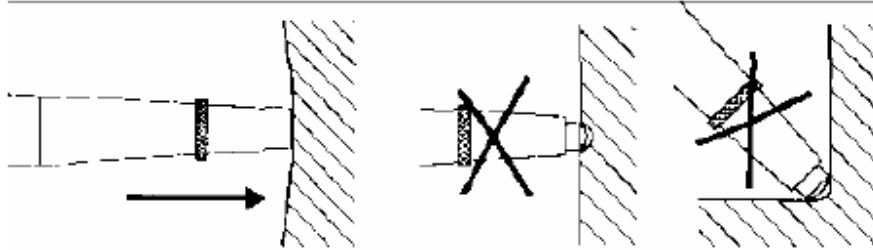
--Αισθητήρας μέτρησης κρουστικού παλμού SPM (μέθοδος db_m / db_c) :



Σχήμα 11.1.3.Σ1: Μέτρηση με τη χρήση το οργάνου μέτρησης κρουστικού παλμού SPM

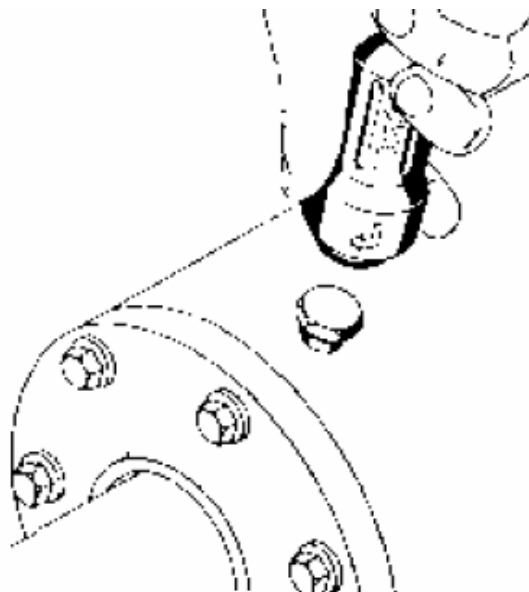
Και οι τρεις τύποι αισθητήρων κρουστικού παλμού, συνδέονται με το όργανο TNC (σχήμα 11.1.3.Σ1), χαρακτηρισμένο ως συνδετήρας SPM. Η επιλογή του τύπου του αισθητήρα εξαρτάται από το σημείο μέτρησης. Τα σημεία μέτρησης για το φορητό έλεγχο πρέπει να χαρακτηριστούν σαφώς. Πάντα θα πρέπει να μετράμε στο ίδιο

σημείο και ο έλεγχος να είναι κατευθυντικά ευαίσθητος. Πρέπει να δείχτεί κατ' ευθείαν στο ρουλεμάν. Το κέντρο της άκρης των ελέγχων πρέπει να αγγίζει την επιφάνεια.



Σχήμα 11.1.3.Σ2: Τρόπος μέτρησης

--- Μέτρηση με τον αισθητήρα κραδασμών (επιταχυνσιόμετρο) :



Σχήμα 11.1.3.Σ3: Μέτρηση με τον αισθητήρα έντασης κραδασμών

Ο έλεγχος με τον αισθητήρα έντασης κραδασμών για μέτρηση VIB, γίνεται λαμβάνοντας τρεις μετρήσεις για κάθε στοιχείο μηχανής : μία στην οριζόντια, μία στη κατακόρυφη και μία στην αξονική διεύθυνση. Τις περισσότερες όμως φορές, αρκεί μια μέτρηση στο οριζόντιο ή κατακόρυφο επίπεδο για τη διάγνωση μιας βλάβης.

Για το συστηματικό έλεγχο της έντασης των κραδασμών, συστήνεται η εγκατάσταση των *προσαρμοστών* του οργάνου. Οι προσαρμοστές, είναι στερεά μπουλόνια μετάλλων που συντονίζονται για τη σωστή μετάδοση σημάτων. Εγκαθίστανται στις φρεζαρισμένες τρύπες στις έδρες των ρουλεμάν. Ένας μόνιμα εγκατεστημένος αισθητήρας πάνω σε προσαρμοστή χρησιμοποιείται όταν το ρουλεμάν είναι σεδύσκολα τοποθετημένη θέση. Για να συνδέσουμε το όργανο και το τερματικό χρησιμοποιούμε καλώδιο.

Στο Ε.Μ.Π. έχουμε τέτοιου είδους όργανο με κωδικό TRV22 μετρούμενης ευαισθησίας $7,98pC/m/s^2$

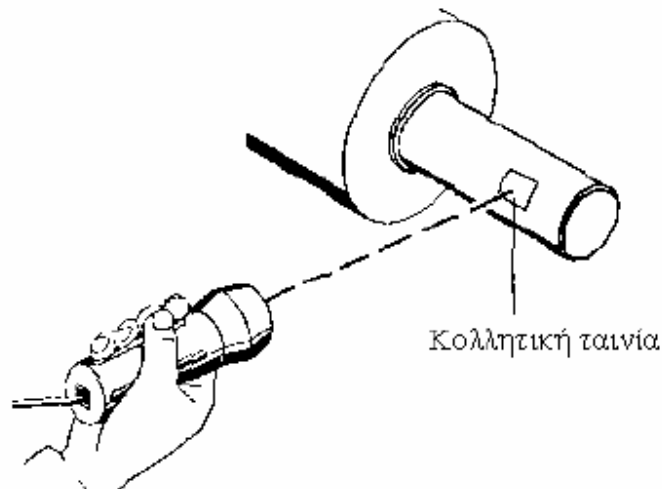
--- Ακουστικό :



Σχήμα 11.1.3.Σ4 Ακουστικό

Για την άμεση εύρεση θέσεων δυσμενούς λειτουργίας, όπου προκαλείται έντονος θόρυβος, γίνεται χρήση του ακουστικού. Συνήθως, αυτή ακολουθείται μετά τον έλεγχο της μεθόδου SPM db_m / db_c , για την εξακρίβωση της θέσης που υπάρχει το πρόβλημα.

---Αισθητήρας μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου :



Σχήμα 11.1.3.Σ5: Αισθητήρας μέτρησης της περιστροφικής ταχύτητας

Για τον άμεσο υπολογισμό της ταχύτητας της ατράκτου χρησιμοποιούμε το όργανο TAD-18 (σχήμα 11.1.3.Σ5) το οποίο υπολογίζει την ταχύτητα με ανάκλαση φωτός. Στην άτρακτο, τοποθετούμε μία κολλητική ταινία που μπορεί να ανακλάσει το φως και στοχεύουμε την επιφάνεια. Κατ' αυτόν τον τρόπο έχουμε την ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου σε RPM.

Σχεδιάγραμμα σύνδεσης οργάνων :

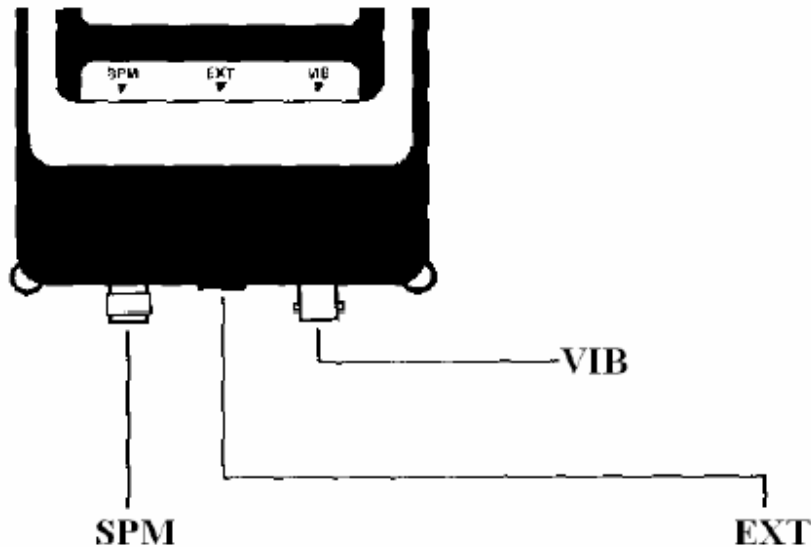
Τα όργανα, έχουν τρεις διαφορετικούς συνδετήρες εισαγωγής:

- SPM : Λαμβάνει τον μετατροπέα κρουστικού παλμού.
- EXT : Λαμβάνει τον έλεγχο θερμοκρασίας, τον έλεγχο ταχυμέτρων, το

ακουστικό, και το καλώδιο επικοινωνίας για τη μεταφορά στοιχείων.

- VIB : Λαμβάνει το μετατροπέα δόνησης.

Στην εξειδικευμένη έκδοση μπορούν να συνδεθούν ταυτόχρονα τρεις μετατροπείς : SPM, VIB και είτε το όργανο μέτρησης θερμοκρασίας, είτε το όργανο μέτρησης της περιστροφικής ταχύτητας.



Σχήμα 11.1.3.Σ6: Είσοδοι των οργάνων στο T-30

11.1.4 Παρουσίαση του μηχανήματος:

Με το πάτημα οποιουδήποτε «κουμπιού» για ένα δευτερόλεπτο ανάβει το όργανο. Η θόνη, 4 γραμμές 16 χαρακτήρων κάθε μια, παρουσιάζει τις ενεργές επιλογές. Οι τεχνικές μέτρησης επιλέγονται με τα βέλη ΑΡΙΣΤΕΡΑ / ΔΕΞΙΑ, ενώ τα σημεία μέτρησης με το ΕΠΑΝΩ / ΚΑΤΩ. Οι επιλογές για τη μέτρηση περιστροφής / λεπτό και θερμοκρασίας εμφανίζονται όταν συνδέεται το αντίστοιχο όργανο.

Τα χρώματα στο πλάι πράσινο – κίτρινο - κόκκινο είναι η κλίμακα του οργάνου. Μετά από μια μέτρηση $\text{dB}_m / \text{dB}_c$ ή μια μέτρηση VIB, ένα βέλος δείχνει σε ένα από τα χρώματα την πρώτη εκτίμηση της κατάστασης του στοιχείου μηχανής. Με πράσινο χρώμα δηλώνεται η καλή κατάσταση, με κίτρινο η αμφίβολη και με κόκκινο η κακή.

Το λαμπάκι PEAK, είναι ένας δείκτης ενεργός για μεγάλες αιχμές στο σήμα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων $\text{dB}_m / \text{dB}_c$. Το «παράθυρο» (No 6), είναι ένας αισθητήρας του contrast .

Το βασικό κουμπί M, χρησιμοποιείται αποκλειστικά για να αρχίσουν οι μετρήσεις.

Αν πιέσουμε τα πλήκτρα M και ENT ταυτόχρονα, το όργανο αρχίζει τη συνεχή ανάγνωση. Τα αποτελέσματα μέτρησης ενημερώνονται μέχρι οποιουδήποτε κουμπί να συγκρατηθεί για 1 sec ώστε να διακοπεί με αυτόν τον τρόπο η μέτρηση.

Το κουμπί ENT επιβεβαιώνει τις επιλογές και σώζει τις τιμές και τις τοποθετήσεις.

Τα υπόλοιπα πλήκτρα, χρησιμοποιούνται για την «κίνηση» στα αποτελέσματα.



Σχήμα 11.1.4.Σ1: Όργανο T-30 της εταιρείας SPM Instrument

Κεφάλαιο 12ο

Παρουσίαση των αποτελεσμάτων:

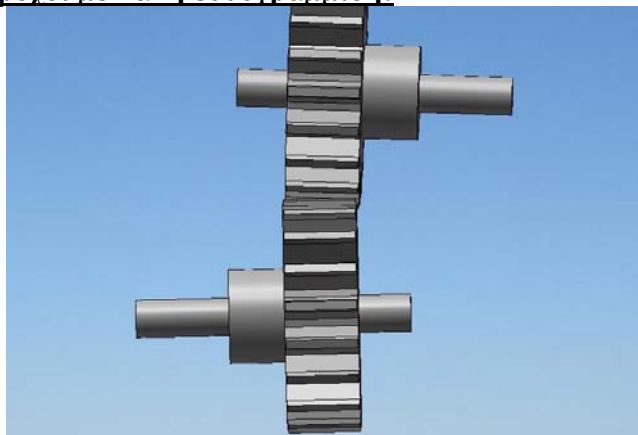
12.1 Εισαγωγή:

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στην πειραματική διάταξη που κατασκευάσαμε στο εργαστήριο των Στοιχείων Μηχανών του Ε.Μ.Π. . Η ανάλυση των αποδιαμορφωμένων φασμάτων, γίνεται με βάση τα σήματα που πήραμε με το αισθητήριο μέτρησης κραδασμών (επιταχυνσιόμετρο) στην κατακόρυφη θέση. Το εύρος της συχνότητας του χρονικού παραθύρου του αποδιαμορφωμένου φάσματος για όλες τις μετρήσεις είναι 500 Hz. Το εύρος αυτό μπορεί βέβαια να μεγαλώσει αν το θελήσουμε. Στα πειράματά μας όμως, οι ταχύτητες περιστροφής των γραναζιών είναι σχετικά χαμηλές και έτσι ένα εύρος των 500Hz μας είναι υπεραρκετό. Το πρόγραμμα, κάνει άμεση αυτόματη αντιστοίχιση των θεωρητικά αναμενόμενων συχνοτήτων της βλάβης και των συχνοτήτων των πειραματικών δεδομένων, πράγμα που συνεπάγεται την άμεση εξαγωγή συμπερασμάτων. Τα φάσματα λοιπόν που προκύπτουν έχουν στον οριζόντιο άξονα τις αποδιαμορφωμένες πλέον συχνότητες και στον κατακόρυφο την πλάτος(αριθμητική τιμή) του κραδασμού. Ο αυτόματος έλεγχος του προγράμματος γίνεται για τις τρεις, τέσσερις ή και πέντε πρώτες αρμονικές της αντίστοιχης συχνότητας βλάβης, αν και μπορούμε να αυξήσουμε αυτόν τον αριθμό. Όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενο μέρος της παρούσας εργασίας, τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έχουμε διεξάγει περιέχουν τις εξεις περιπτώσεις βλαβών:

- Οδοντωτοί τροχοί με κακή ευθυγράμμιση.
- Οδοντωτοί τροχοί με εκκεντρότητα και μεγάλη χάρη μεταξύ των κατατομών.
- Υποχώρηση της ονομαστικής διαμέτρου ενός οδοντωτού τροχού.
- Οδοντωτοί τροχοί με σπασμένο/σπασμένα δόντια.

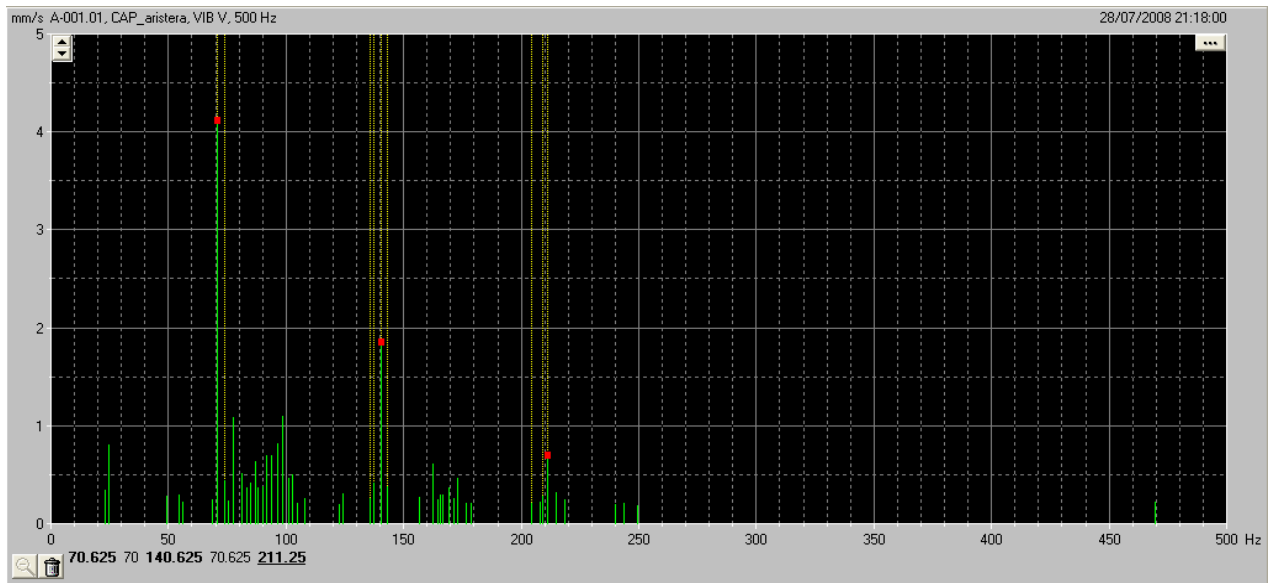
Επίσης, θα διεξάγουμε κάποια πειράματα που θα αφορούν τον ίδιο τύπο βλάβης με διαφορετική τιμή φορτίου κάθε φορά. Στο τέλος αυτής της διαδικασίας προσπαθούμε να εξάγουμε κάποια γραμμική σχέση μεταξύ του πλάτους της 1XGMF συναρτήσεως του επιβαλλόμενου φορτίου.

12.2 Οδοντωτοί τροχοί με κακή ευθυγράμμιση:



Σχήμα 12.2Σ1: Σφάλμα κακής ευθυγράμμισης σε βαθμίδα μετωπικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης.

---Μέτρηση με το inverter κλειστό.



Φάσμα 12.2Φ1: Φάσμα βαθμίδας οδοντωτών τροχών με πρόβλημα κακής ευθυγράμμισης

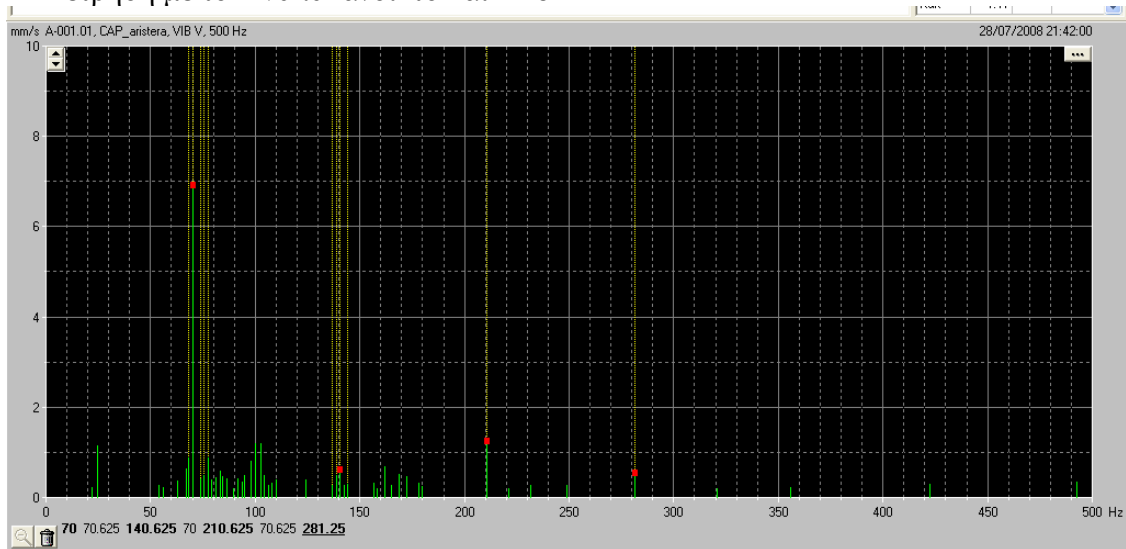
Διακρίνουμε στο φάσμα την 1X, την 2X και την 3X της GMF. Ακόμα διακρίνουμε και την 1 ½ X GMF, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στο ότι στην εξεταζόμενη βαθμίδα, είναι προσαρτημένος ο τροχός στον οποίον έχουμε μειώσει την ονομαστική του διάμετρο. Εξάλλου οι συχνότητες διαφοράς της GMF με τις πλευρικές ζώνες που διαμορφώνονται γύρω απ' αυτήν είναι περίπου 3,5 Hz, όση δηλαδή και η ταχύτητα περιστροφής του προβληματικού γραναζιού (212rpm). Όπως, έχει παρατηρηθεί από την βιβλιογραφία είναι δυνατόν κάποιες φορές να εμφανίζονται και οι 4X και 5X της GMF. Βέβαια στις μετρήσεις μας κάτι τέτοιο δεν επιβεβαιώνεται. Γι' αυτό όπως και σ' όλες τις περιπτώσεις έχουμε θέσει το εύρος του φάσματος ίσο με 500Hz (ικανό για να μας δείξει ακόμα και μεγαλύτερες της 3X αρμονικές της GMF). Βέβαια, το αρκετά μεγάλο πλάτος της 1X (=4,2mm/sec) μας κάνει να υποψιαστούμε πως υπάρχει βλάβη στο γρανάζι (εκτός από την ήδη διαπιστωμένη που προσδιορίζεται από την κλασματική συχνότητα). Αυτή η βλάβη, πιθανότατα προέρχεται από κακή ευθυγράμμιση αφού:

1) Δεν υπάρχει μεγάλη διάχυση ενέργειας γύρω από την 1X, αφού το φορτίο παίρνει όλες τις χάρες στο γρανάζι.

2) Υπάρχει μόνο ένα μεγάλο περιοδικό χτύπημα, το οποίο είναι το πιο πιθανόν να προέρχεται από κακή ευθυγράμμιση που υπάρχει μεταξύ των γραναζιών.

Ακόμα, μία συχνότητα που είναι παρούσα στο προηγούμενο φάσμα, όπως και σ' όλα σχεδόν τα φάσματα των μετρήσεών μας είναι αυτή στα 25Hz, καλούμενη και ως ½ X της συχνότητας ηλεκτρικού δικτύου (50Hz).

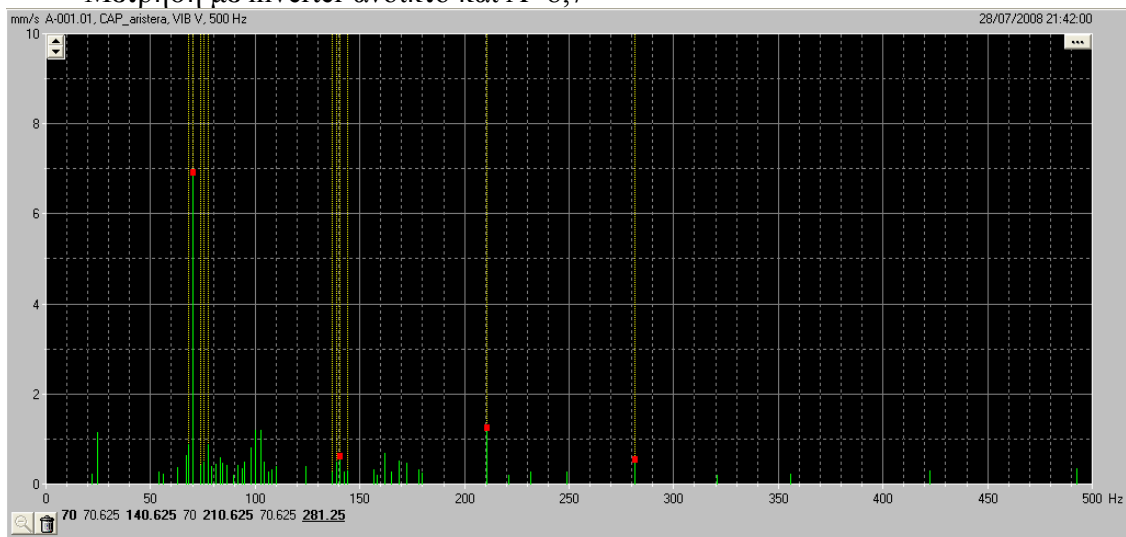
---Μέτρηση με το inverter ανοικτό και $A=8$



Φάσμα 12.2Φ2: Εκπεμπόμενο φάσμα βαθμίδα οδοντωτών τροχών με πρόβλημα ευθυγράμμισης υπό φορτίο ($A=8$).

Παρατηρούμε ότι ενώ η 1X της GMF αυξήθηκε με την αύξηση του φορτίου η 2X και η 3X μειώθηκαν ενώ εμφανίστηκε και η 4X. Επίσης, οι πλευρικές ζώνες παρέμειναν ίσες με την προηγούμενη μέτρηση. Παρατηρούμε ακόμα, πως το πλάτος της 2X μειώθηκε στο μισό ενώ, της 3X και της 4X παρέμεινε σταθερό. Το έντονο χτύπημα που φαίνεται στην 1X (μεγάλη ενέργεια), μαρτυρά μία «έντονη» επαφή μεταξύ των δύο γραναζιών κατά την διάρκεια μιας περιστροφής. Αυτό μας κάνει ακόμα περισσότερο να πιστέψουμε πως υπάρχει πρόβλημα κακής ευθυγράμμισης σ' αυτή την βαθμίδα των οδοντωτών τροχών. Σε μια τέτοια περίπτωση, μπορεί το χρονικό σήμα να μας βοήθαγε περισσότερο.

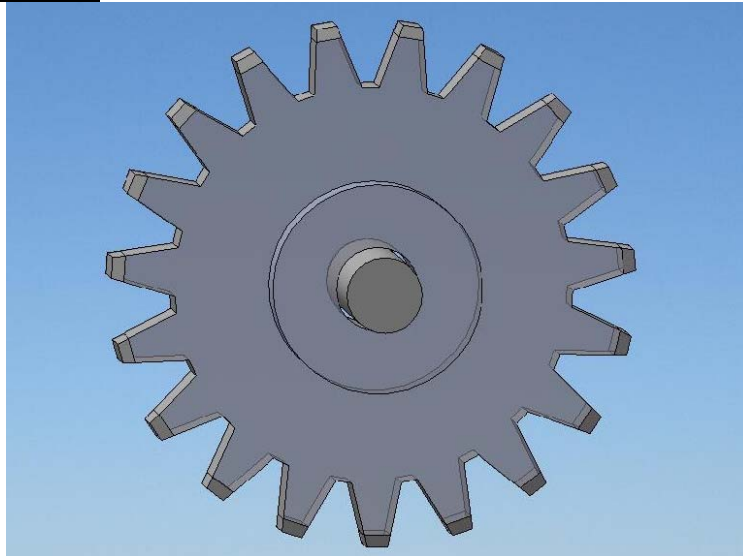
---Μέτρηση με inverter ανοικτό και $A=8,7$



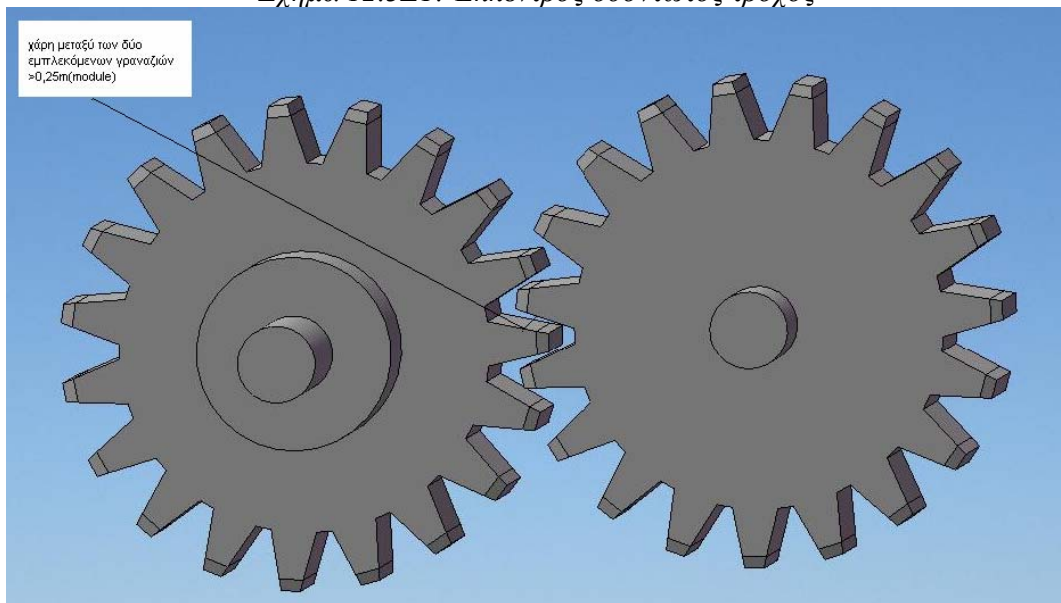
Φάσμα 12.2Φ3: Εκπεμπόμενο φάσμα βαθμίδα οδοντωτών τροχών με πρόβλημα ευθυγράμμισης υπό φορτίο ($A=8,7$).

Τα αποτελέσματα αυτής της μέτρησης είναι περίπου τα ίδια με της προηγούμενης. Κάτι τέτοιο ήταν και το αναμενόμενο φυσικά αφού, μικρές διαφορές στην φόρτιση, συνήθως δίνουν μικρές διαφορές στα παραγόμενα πλάτη του φάσματος κραδασμών. Πρέπει να σημειώσουμε πάντως πως σ'όλα τα προηγούμενα φάσματα εμφανίζεται μια σημαντική διάχυση ενέργειας(μας κάνει να υποψιαστούμε για την ύπαρξη κάποιου προβλήματος) γύρω από μια συχνότητα κοντά στα 97 Hz. Η συχνότητα αυτή πλησιάζει την $1 \frac{1}{2} \times \text{GMF}$ όπως προείπαμε. Για να μπορούμε όμως να μιλήσουμε με βεβαιότητα για την προέλευσή της προχωράμε στην επόμενη μέτρηση.

12.3 Οδοντωτοί τροχοί με εκκεντρότητα και μεγάλη χάρη μεταξύ των κατατομών(μέρος 1):



Σχήμα 12.3Σ1: Έκκεντρος οδοντωτος τροχός

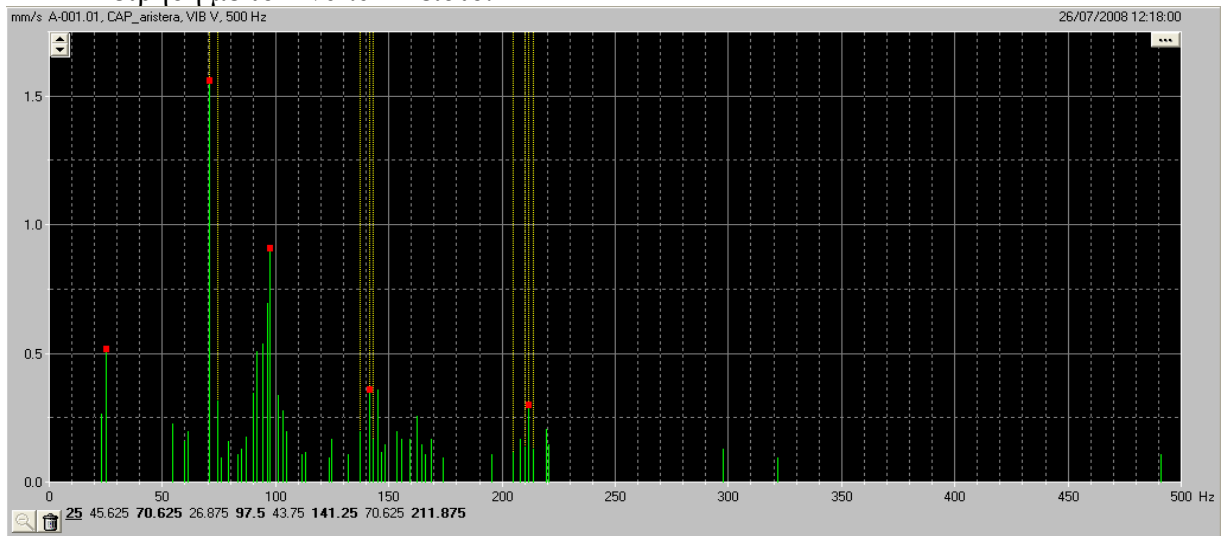


Σχήμα 12.3Σ2: Επιβολή υπερβολικής χάρης κατατομών σε βαθμίδα μετωπικών οδοντωτών τροχών ευθείας οδόντωσης.

Περιμένουμε αυξημένες τις πλευρικές συχνότητες της ατράκτου του προβληματικού τροχού να εμφανίζονται γύρω από την GMF. Μέτρηση CAP_aristera. «Έκκεντρο» γρανάζι το δεύτερο(αφαίρεση της μονωτικής ταινίας από την άτρακτο του CAP).

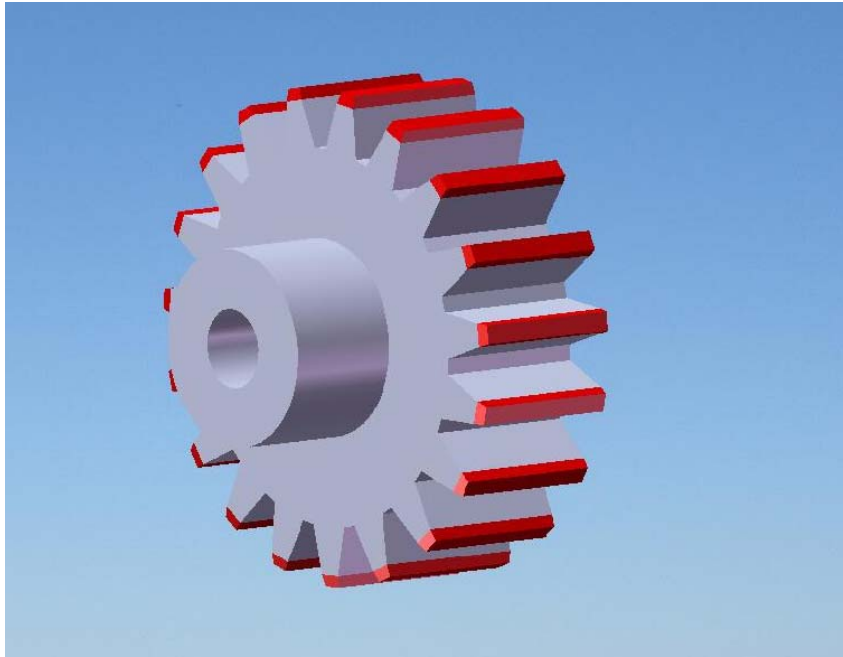
«Αφαιρούμε» κατά το δυνατόν την βλάβη εκκεντρότητας από την διάταξή μας, και αφήνουμε ως μοναδική επιτηδευμένη βλάβη την χάρη μεταξύ των κατατομών. Αναμένουμε λοιπόν ότι καθώς αυξάνουμε το φάρτιο μέσω του inverter τα πλάτη της GMF θα ελαττώνονται.

---Μέτρηση με το inverter κλειστό.



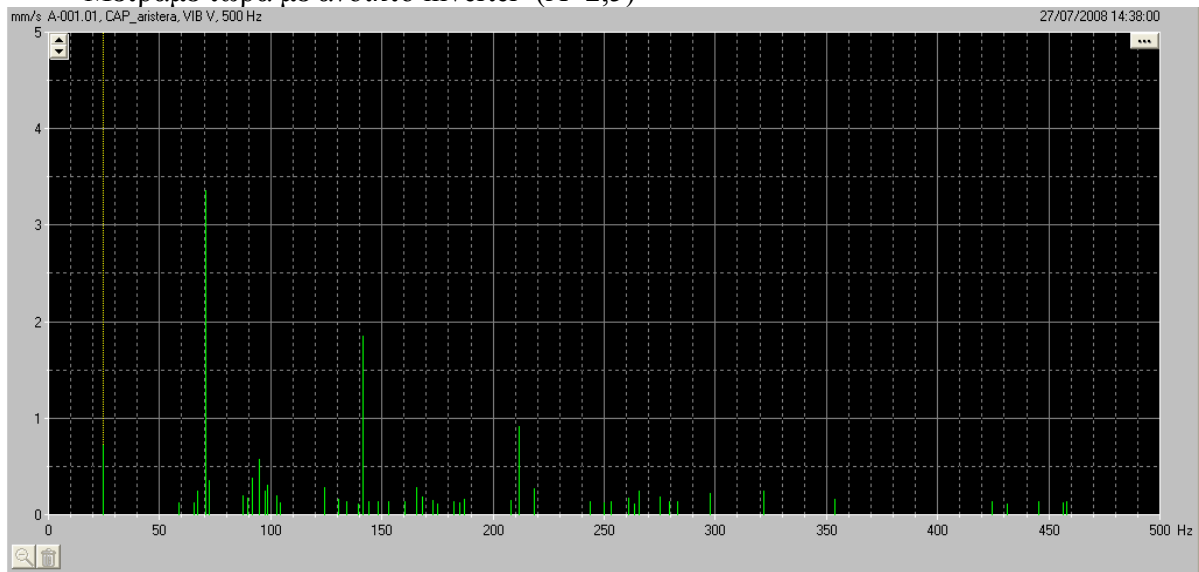
Φάσμα 12.3Φ1: Εκπεμπόμενο φάσμα βαθμίδα γραναζιών με πρόβλημα υπερβολικής χάρης μεταξύ των κατατομών, ενός έκκεντρου γραναζιού κ ενός με «υποχώρηση» της ονομαστικής του διαμέτρου, υπό μηδενικό φορτίο.

Παρατηρούμε ότι στο παραπάνω φάσμα διεγείρονται η 1X της GMF(70,625Hz), 2X GMF(141,25Hz), 3X GMF(211,875Hz) καθώς και η 1 ½ X GMF(97,5Hz). Η παραπάνω μέτρηση είναι με το inverter κλειστό. Από τις παραπάνω μόνο οι 3 πρώτες αρμονικές της GMF μπορούν να οφείλονται στην εκκεντρότητα ή στην προβληματική χάρη μεταξύ των κατατομών. Η εμφάνιση της συχνότητας στο 1 ½ X GMF με πλάτος κοντά στο 1mm/sec, υποθέτουμε πως μπορεί να εμφανίζεται αφού ένα από τα γρανάζια στην βαθμίδα που έχει επιβληθεί η προβληματική χάρη είναι και αυτό με το «φαγωμένο» module. Όπως γνωρίζουμε από την θεωρία, η εμφάνιση της συχνότητας 1 ½ X GMF μπορεί να οφείλεται στο ότι τα δόντια που παράγουν την περίοδο μεγάλου πλάτους μπορεί να παρουσιάζουν υποχώρηση της ονομαστικής τους διαμέτρου(σχήμα 12.3Σ3).

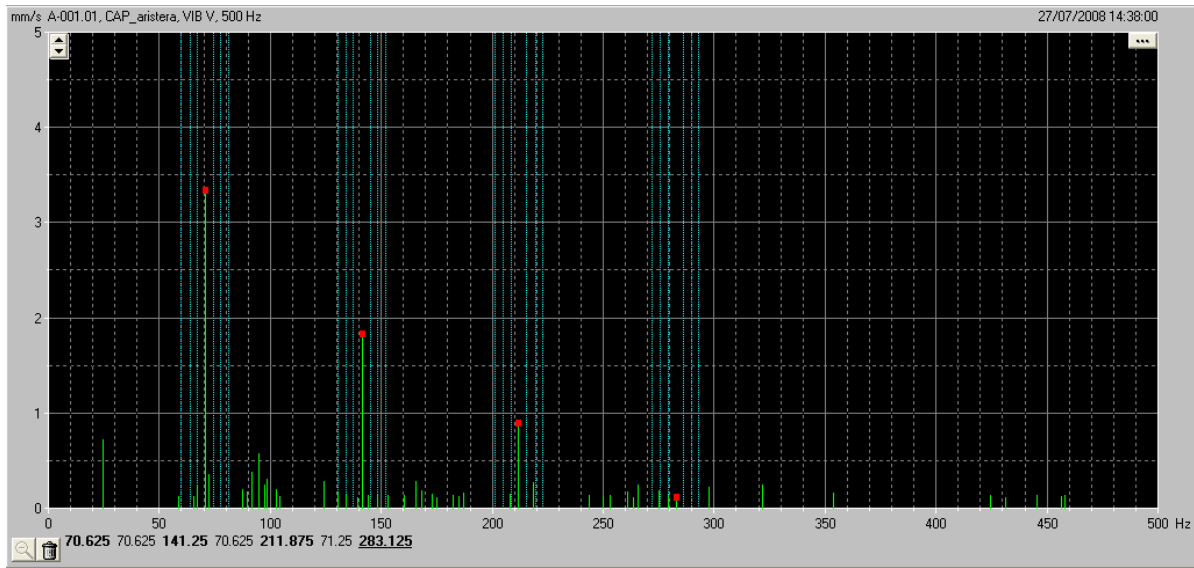


Σχήμα 12.3Σ3: Υποχώρηση της ονομαστικής διαμέτρου οδοντωτού τροχού.

---Μετράμε τώρα με ανοικτό inverter ($A=2,5$)



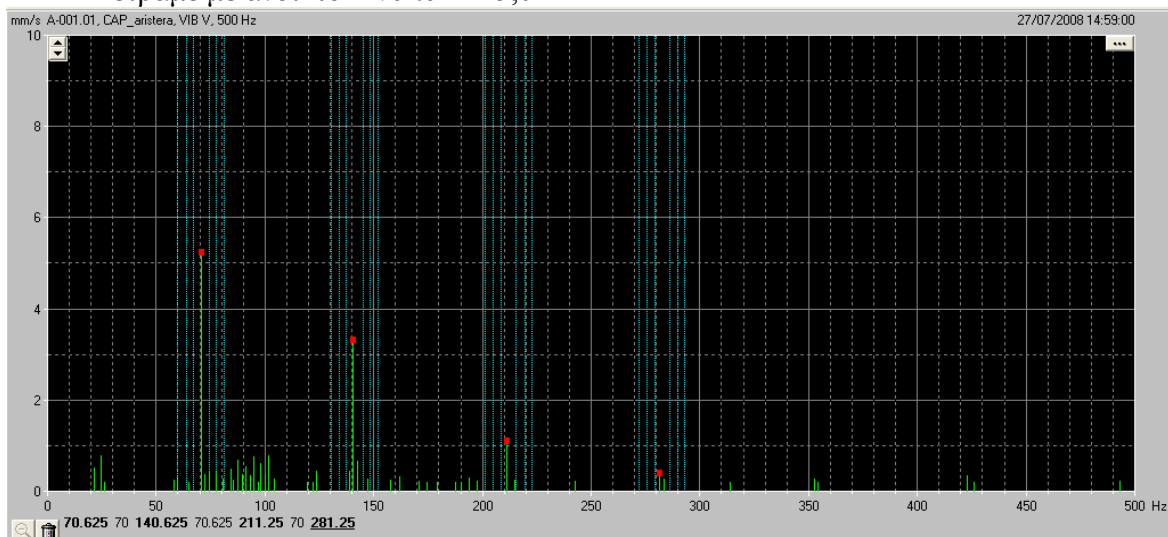
Φάσμα 12.3Φ2: :Εκπεμπόμενο φάσμα βαθμίδας γραναζιών με πρόβλημα υπερβολικής χάρης μεταξύ των κατατομών, ενός έκκεντρου γραναζιού κ ενός με «υποχώρηση» της ονομαστικής του διαμέτρου, υπό φορτίο ($A=2,5$).



Φάσμα 12.3Φ3: Ιδιο με το προηγούμενο με την μόνη διαφορά ότι εμφανίζει τις πλευρικές συχνότητες που διαμορφώνονται γύρω από την GMF.

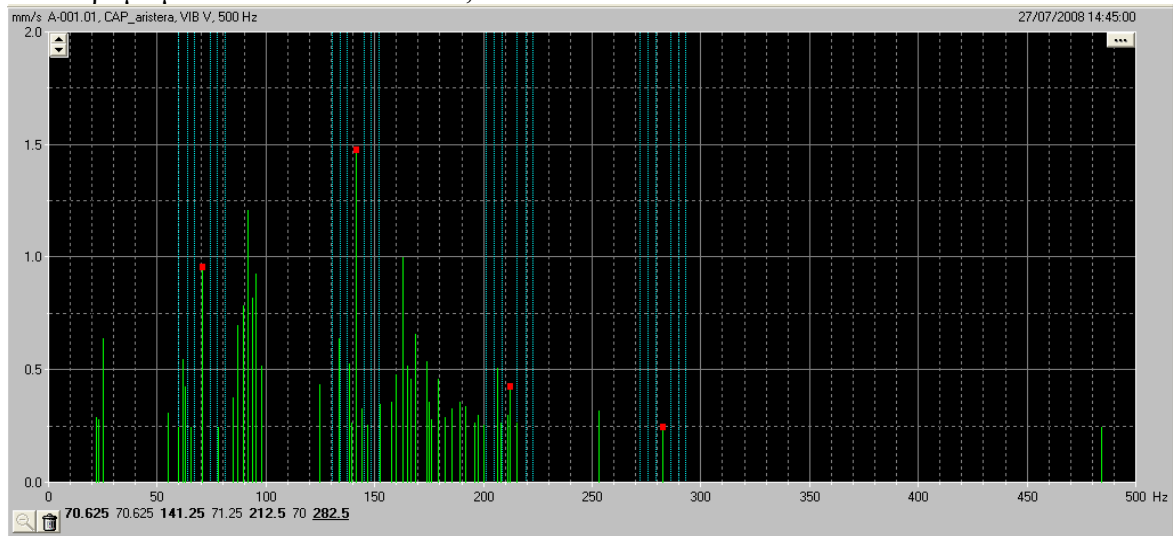
Παρατηρούμε, μιας σημαντική αύξηση στα πλάτη των 1X, 2X και 3X GMF, χωρίς ταυτόχρονα όμως κάποια αξιοσημείωτη διάχυση ενέργειας εμφανιζόμενη ως πλευρικές ζώνες. Ακόμα, βλέπουμε ότι τόσο το πλάτος της συχνότητας των 97,5Hz όσο και οι πλευρικές ζώνες που διαμορφώνονται γύρω του μειώνονται καθώς το φορτίο αυξάνεται. Κάτι τέτοιο, είναι λογικό αφού οι ανομοιομορφίες της υποχώρησης της ονομαστικής διαμέτρου που πιθανόν προκαλούν την εμφάνιση της 1 ½ X GMF, επιδρούν λιγότερο σημαντικά καθώς το φορτίο αυξάνεται γεγονός που κάνει την σύμπλεξη των γραναζιών να γίνεται με λιγότερο «προβληματικό» τρόπο σε σχέση με πριν.

---Μετράμε με ανοικτό inverter A=5,0



Φάσμα 12.3Φ4: Εκπεμπόμενο φάσμα βαθμίδας γραναζιών με πρόβλημα υπερβολικής χάρης μεταξύ των κατατομών, ενός έκκεντρου γραναζιού κ ενός με «υποχώρηση» της ονομαστικής του διαμέτρου, υπό φορτίο(A=5,0).

---Μετράμε με ανοικτό inverter A=6,0



Φασμα 12.3Φ5: Εκπεμπόμενο φάσμα βαθμίδας γραναζιών με πρόβλημα υπερβολικής χάρης μεταξύ των κατατομών, ενός έκκεντρου γραναζιού κ ενός με «υποχώρηση» της ονομαστικής του διαμέτρου, υπό φορτίο (A=6), καθώς και οι πλευρικές ζώνες που διαμορφώνονται από την συχνότητα περιστροφής του έκκεντρου γραναζιού.

Αν και τα πλάτη της GMF έχουν πέσει κάτι που ήταν εξαρχής αναμενόμενο, παρατηρούμε ότι η 2X της GMF είναι μεγαλύτερη από την 1X. Κάτι τέτοιο βέβαια δεν συμβαδίζει με αυτά που γνωρίζουμε από την θεωρία και γι αυτό επαναλαμβάνουμε την μέτρηση υπό τις ίδιες συνθήκες.

Πράγματι, πλησιάσαμε την διάταξη και μόνο με μια πρώτη οπτική επιθεώρηση διαπιστώσαμε πως η σκουλικόβιδα που συγκρατεί το γρανάκι στην άτρακτο του CAP είχε χαλαρώσει με αποτέλεσμα το γρανάκι αυτό να έχει αρχίσει να πατινάρει (στρεφόταν με διαφορετικές στροφές απ αυτές του άξονα). Το παραπάνω φάσμα βέβαια, δεν δικαιολογεί την αρχική μας πεποίθηση ότι δηλαδή τα πλάτη της GMF θα αρχίσουν να μειώνονται. Κάτι τέτοιο βέβαια αναφέρεται και στην βιβλιογραφία η οποία λέει ότι το παραπάνω συμβαίνει κάποιες φορές και όχι πάντα. Βέβαια, στο παρών πείραμα μπορούν να εμπεριέχονται δύο σφάλματα:

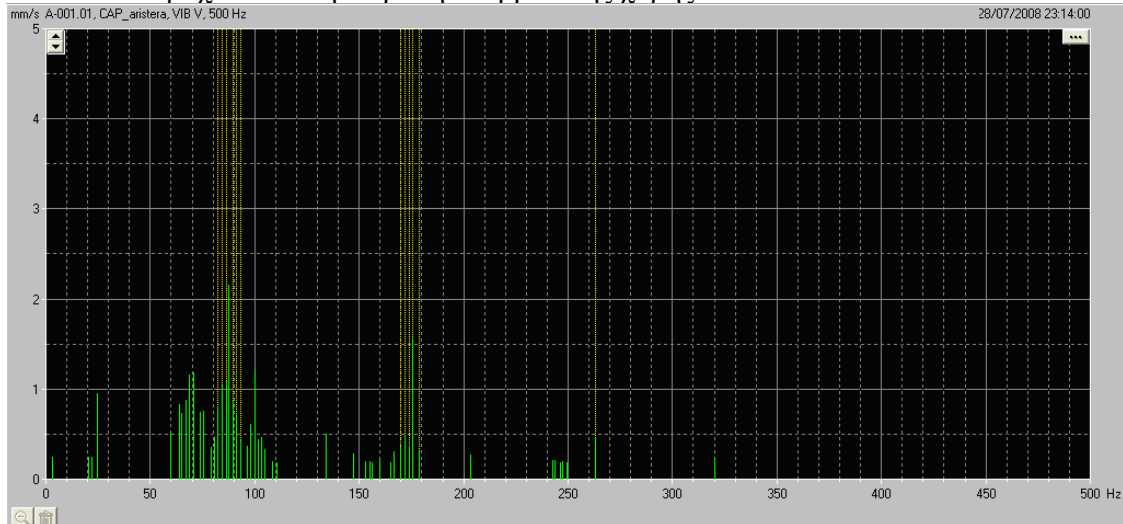
1. Η χάρη μεταξύ των κατατομών που επιβλήθηκε έτσι ώστε να γίνει η παραπάνω μέτρηση να ήταν υπερβολική.
2. Να μην έχουν «απομονωθεί» οι υπόλοιπες βλάβες της διάταξης και έτσι να προκαλούν τα μεγάλα πλάτη της GMF.

Μετατοπίζουμε τα γρανάκια έτσι ώστε να μειωθεί η μεταξύ τους χάρη, έτσι ώστε να δούμε ο πρώτος παράγοντας σφάλματος που αναφέραμε.

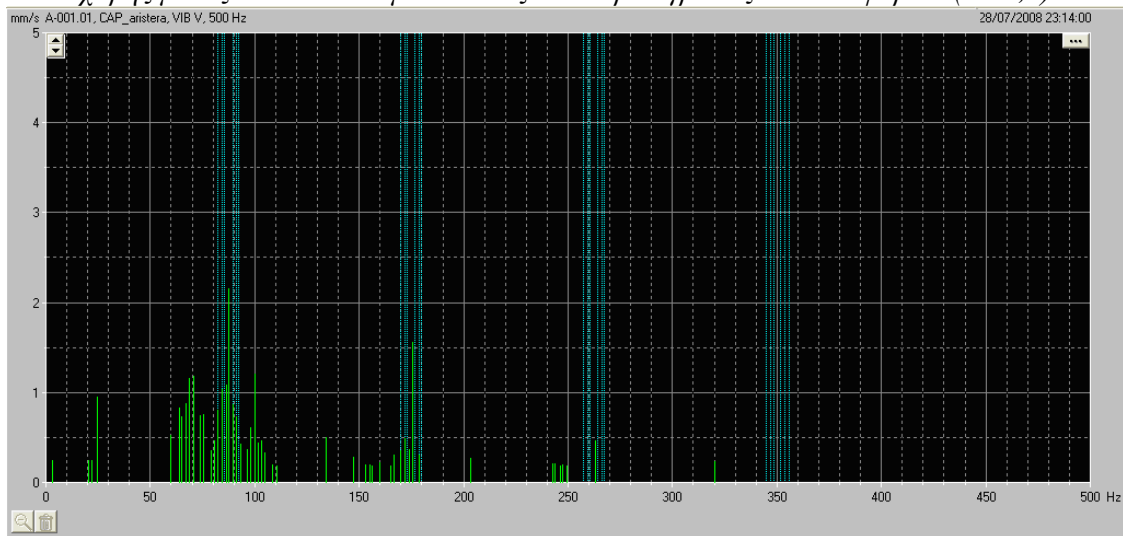
12.4 Οδοντωτοί τροχοί με εκκεντρότητα και μεγάλη γάρη μεταξύ των κατατομών(μέρος 2).

---Μετράμε τώρα με ανοικτό το inverter και $H=5$, $A=2,5$

Σημειώνουμε ότι σ' αυτήν την μέτρηση θα προσπαθήσουμε να δούμε πως επιδρά η αύξηση του φορτίου στα πλάτη της GMF όταν το πρόβλημα στην εξεταζόμενη βαθμίδα οδοντωτών τροχών είναι η επιβολή υπερβολικής χάρης.

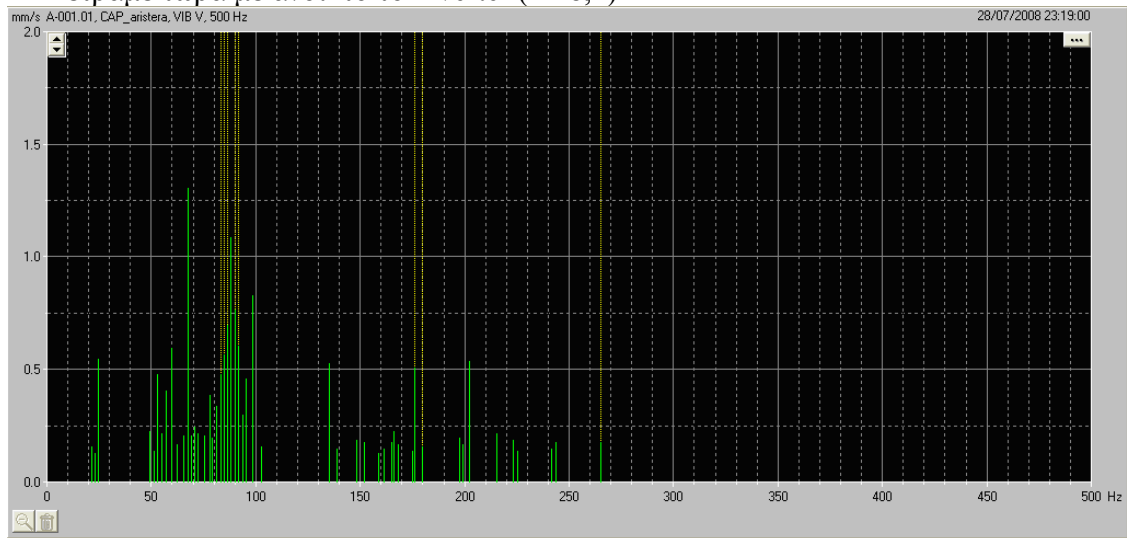


Φάσμα 12.4Φ1: Εκπεμπόμενο φάσμα βαθμίδας γραναζιών με πρόβλημα υπερβολικής χάρης μεταξύ των κατατομών κ ενός έκκεντρου γραναζιού υπό φορτίο ($A=2,5$)

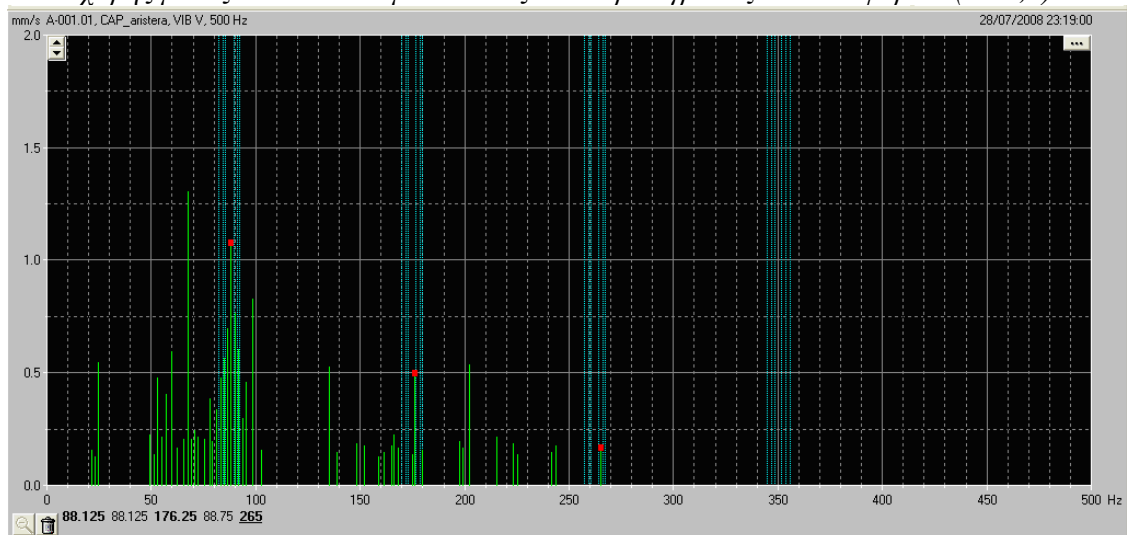


Φάσμα 12.4Φ2: Το ίδιο με το παραπάνω με την μόνη διαφορά ότι φαίνονται οι πλευρικές ζώνες που διαμορφώνονται από την περιστροφή του έκκεντρου γραναζιού.

---Μετράμε τώρα με ανοικτό το inverter ($A=8,2$)



Φάσμα 12.4Φ3: Εκπεμπόμενο φάσμα βαθμίδας γραναζιών με πρόβλημα υπερβολικής χάρης μεταξύ των κατατομών κ ενός έκκεντρου γραναζιού υπό φορτίο ($A=8,2$)

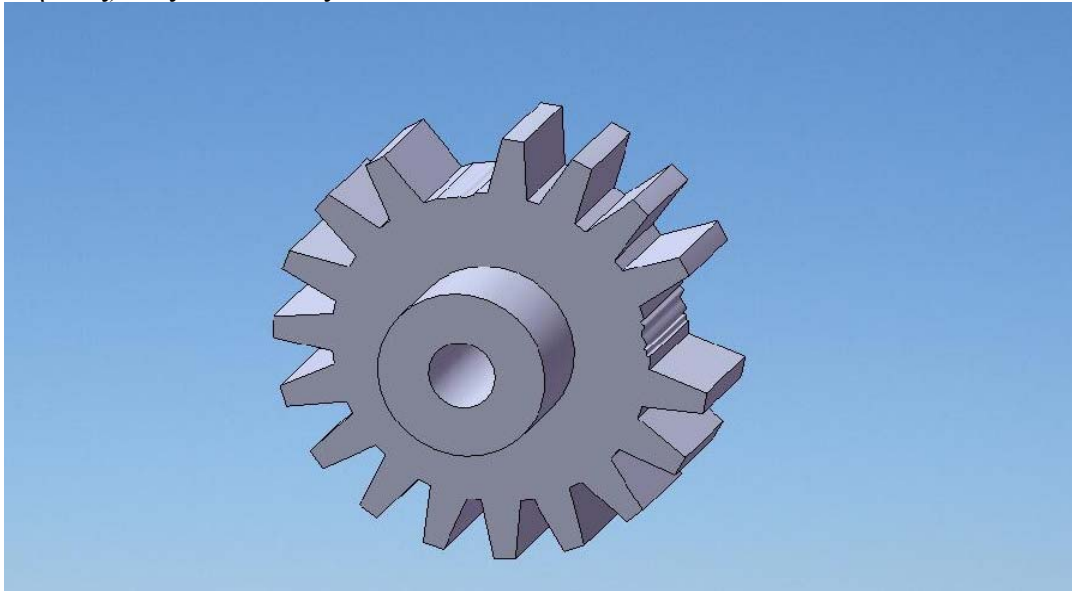


Φάσμα 12.4Φ4: Το ίδιο με το παραπάνω με την μόνη διαφορά ότι φαίνονται οι πλευρικές ζώνες που διαμορφώνονται από την περιστροφή του έκκεντρου γραναζιού.

Παρατηρούμε ότι τόσο το πλάτος της 1X GMF όσο και το πλάτος της 2X GMF μειώνονται καθώς αυξάνεται το φορτίο. Από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι τόσο τα πλάτη όσο και οι πλευρικές συχνότητες της GMF μειώνονται με την αύξηση του φορτίου όταν η βλάβη είναι η χάρη μεταξύ των κατατομών. Από την παραπάνω σύγκριση συνάγεται ότι το πρόβλημα στην βαθμίδα των οδοντωτών τροχών που παίρνουμε τις μετρήσεις μας είναι η επιβολή υπερβολικής χάρης μεταξύ των κατατομών, κάτι που από την αρχή της μέτρησης αυτής αναμέναμε.

12.5 Οδοντωτοί τροχοί με σπασμένα δόντια:

Παραθέτουμε παρακάτω κάποια φάσματα που πήραμε αφού πρώτα είχαμε προσαρτήσει πάνω στην διάταξή μας ένα γρανάτζι με δύο δόντια αφαιρεμένα(από την βάση τους) στις 90° και στις 180°.



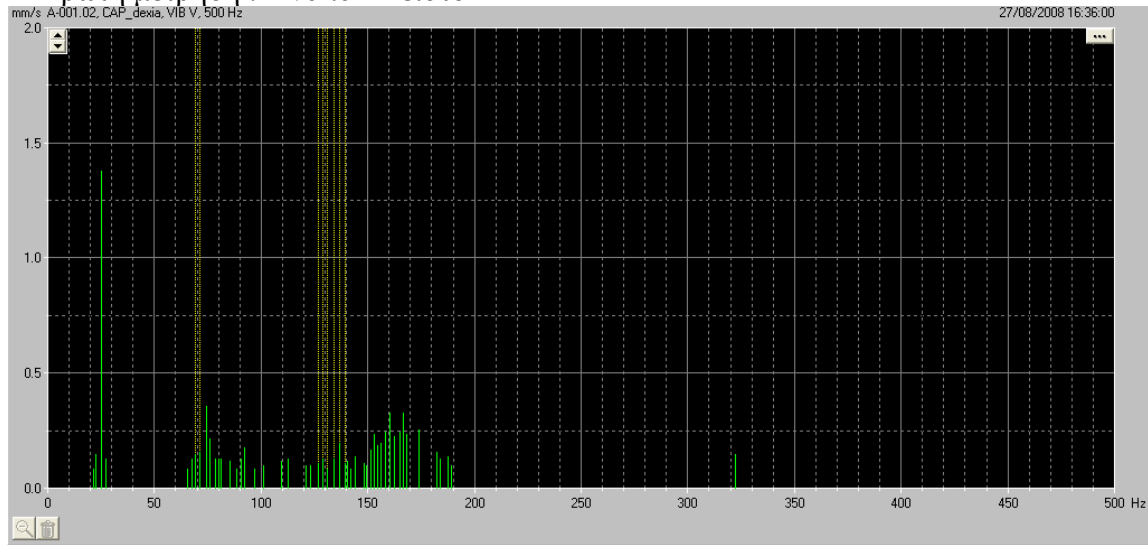
Σχήμα 12.5Σ1: Οδοντωτός τροχός με δύο σπασμένα δόντια σε απόσταση 90° μεταξύ τους.

Αρχική μας επιδίωξη για την διεξαγωγή της παρούσας μέτρησης ήταν να απαλείψουμε κατά το δυνατόν όλες τις άλλες βλάβες από την διάταξή μας, κάτι που όπως αποδεικνύεται παρακάτω(μέσα από τα φασματα ανάλυσης κραδασμών) δεν έγινε με «τέλειο» τρόπο. Ύστερα, θέλαμε να πάρουμε κάποιες μετρήσεις μεταβαλλοντας(αυξάνοντας) κάθε φορά το ρεύμα που μετράει το inverter κατά 1A, αρχίζοντας από μία μέτρηση με το inverter κλειστό. Έτσι, πιστεύαμε πως θα είχαμε την δυνατότητα να καθώς θα σημειώναμε για κάθε μέτρηση το μέγιστο πλάτος της GMF και την ένδειξη του ρεύματος που βλέπαμε στο inverter, να εξάγουμε μία γραμμική σχέση μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών. Πως επηρεάζει δηλαδή το φορτίο το πλάτος του κραδασμού που παράγει η εκάστοτε βλάβη.

Ακόμα, πρέπει να σημειώσουμε ότι μέχρι και την τέταρτη μέτρηση ο μεταλλάκτης μας ήταν προσαρτημένος στο σημείο της μέτρησης μέσω του σπειρώματος. Η τέταρτη μέτρηση επαναλήφθηκε(υπό τις ίδιες συνθήκες) με τον μετατροπέα μαγνητικά προσαρτημένο στο σημείο της μέτρησης. Τα συμπεράσματα του πειραματισμού αυτού αναφέρονται αμέσως μετά την παρουσίαση της τέταρτης μέτρησης. Απο εκείνο το σημείο και για όλες τις επόμενες μετρήσεις ο μετατροπέας μας ήταν μαγνητικά προσαρτημένος στο σημείο της μέτρησης.

Ένα άλλο σημείο στο οποίο πρέπει να δώσουμε βάση είναι ότι στις πρώτες μετρήσεις έχουμε εισάγει στο προγραμμα ως δεδομένο τις στροφές του ελαττωματικού γραναζιού ίσες με 132rpm. Με μια απλή παρατήρηση βλέπουμε πως η GMF καθώς και οι πλευρικές ζώνες, που αυτόματα εξάγει το Condmaster δεν πέφτουν ακριβώς επάνω στις «οφθαλμοφανέστατες» αιχμές. Αργότερα, αλλάζοντας τις στροφές(εισαγωγής στο πρόγραμμα) του προβληματικού γραναζιού από 132 σε 145rpm παρατήρησαμε πως η παραπάνω ασυμφωνία λύθηκε. Γυρνώντας πίσω λοιπόν, ανακαλύψαμε πως αρχικά είχαμε κάνει λάθος στην κινηματική ανάλυση του μηχανισμού.

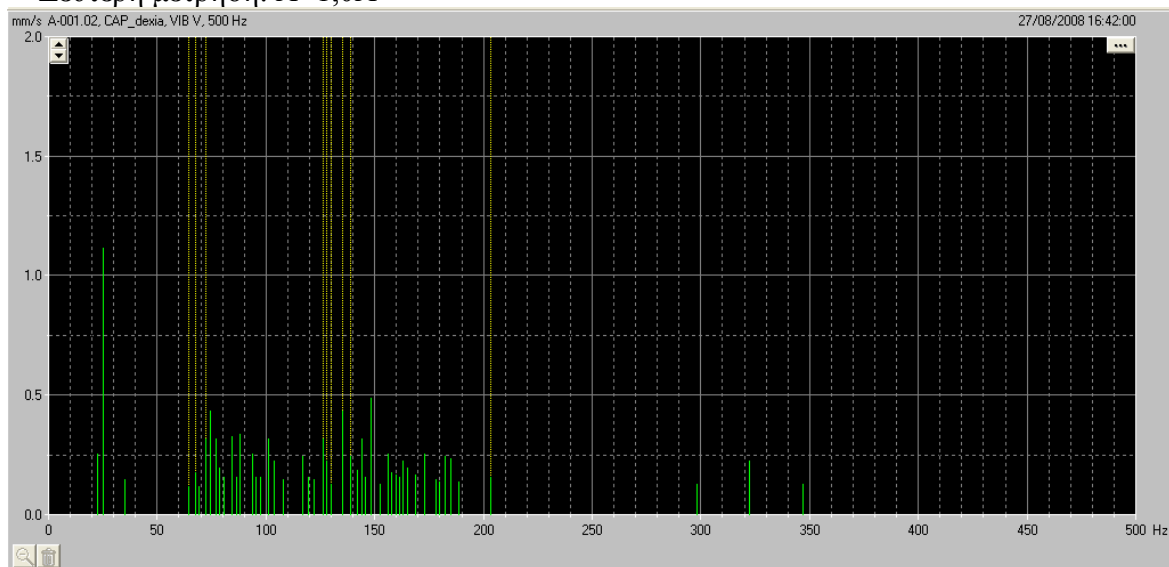
---Πρώτη μέτρηση : inverter κλειστό



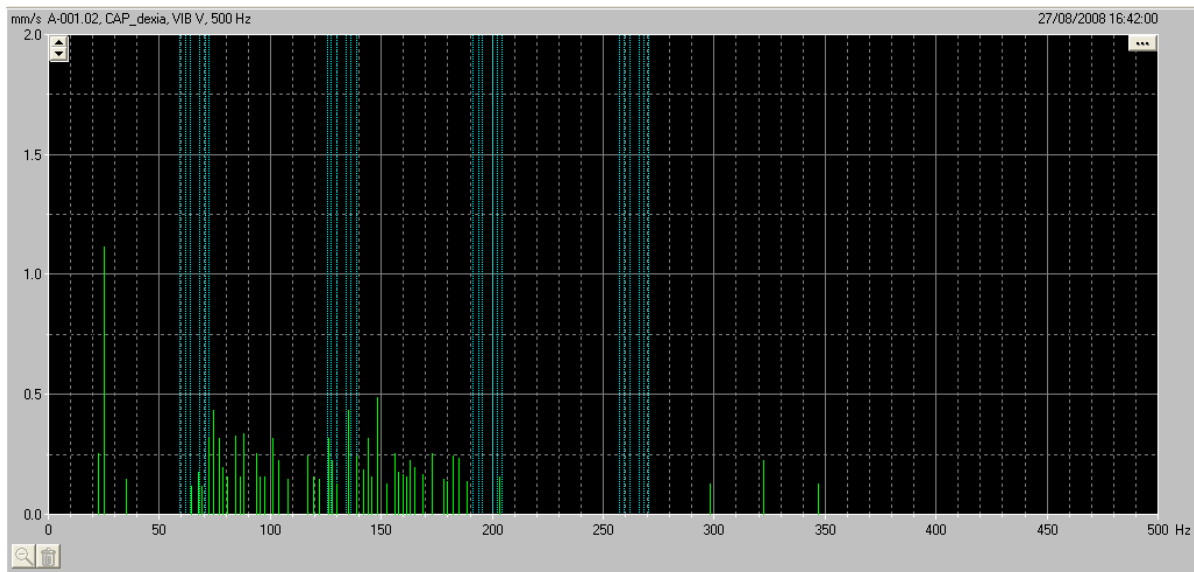
Φάσμα 12.5Φ1: Μέτρηση υπό μηδενικό φορτίο για την περίπτωση βλάβης δύο σπασμένων δοντιών σ'ένα γρανάζι.

Λόγω του χαμηλού πλάτους της GMF και των πλευρικών ζωνών δεν υποδηλώνεται κάποιο πρόβλημα. Ωστόσο, πριν να μπορέσουμε να αποφανθούμε για κάποιο σπασμένο δόντι σ' ένα από τα γρανάζια, σε τόσο μικρά πλάτη καλό θα ήταν να εξετάζαμε πρώτα το χρονικό σήμα, αν αυτό ήταν δυνατό. Οι τρεις πρώτες αρμονικές της GMF είναι διακριτές χωρίς όμως να έχουν μεγάλο πλάτος. Αυτό υποδεικνύει σε κάποιο βαθμό κακή ευθυγράμμιση μεταξύ των εμπλεκόμενων γραναζιών στην υπό εξέταση βαθμίδα. Η κακή ευθυγράμμιση είναι δυνατόν να ταυτοποιηθεί σ' αυτά τα χαμηλά πλάτη.

---Δεύτερη μέτρηση: $A=1,0A$



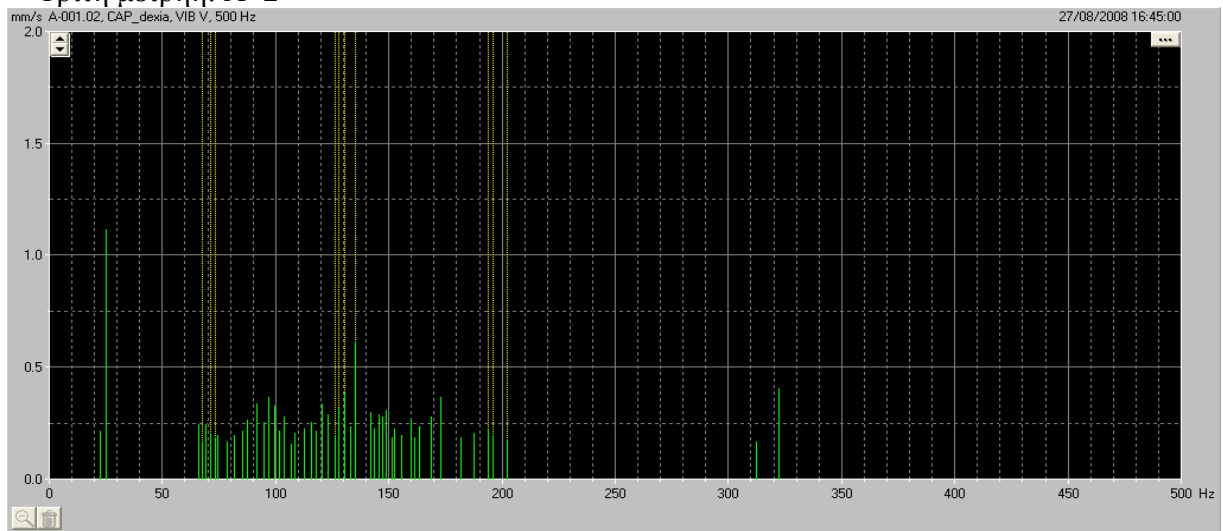
Φάσμα 12.5Φ2: Μέτρηση υπό φορτίο ($A=1$) για την περίπτωση βλάβης δύο σπασμένων δοντιών σ'ένα γρανάζι.



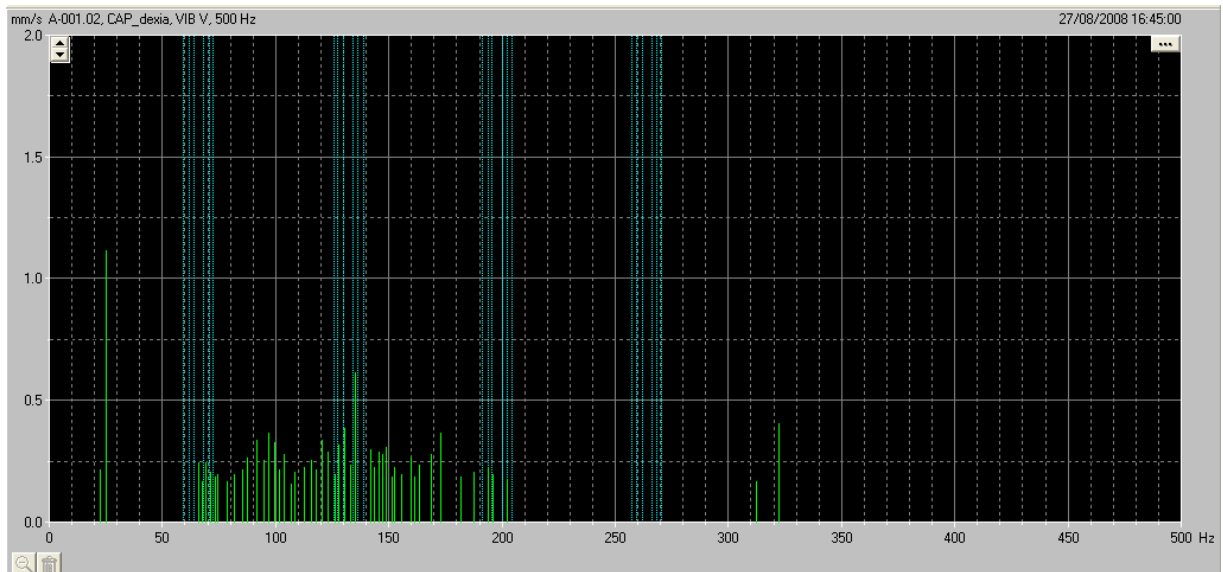
Φάσμα 12.5Φ3: Ιδιο με το προηγούμενο με την μόνη διαφορά ότι εμφανίζει τις πλευρικές συχνότητες που διαμορφώνονται γύρω από την GMF.

Δεν παρατηρούμε κάποια αξιολογή αύξηση στα πλάτη της GMF. Βέβαια, μπορούμε σε σύγκριση με τα προηγούμενα φάσματα (στα οποία η 1X GMF ήταν μεγαλύτερη της 2X GMF), Η 2X GMF αυξήθηκε και το πλάτος της έγινε ίσο με αυτό της 1X.

---Τρίτη μέτρηση: A=2



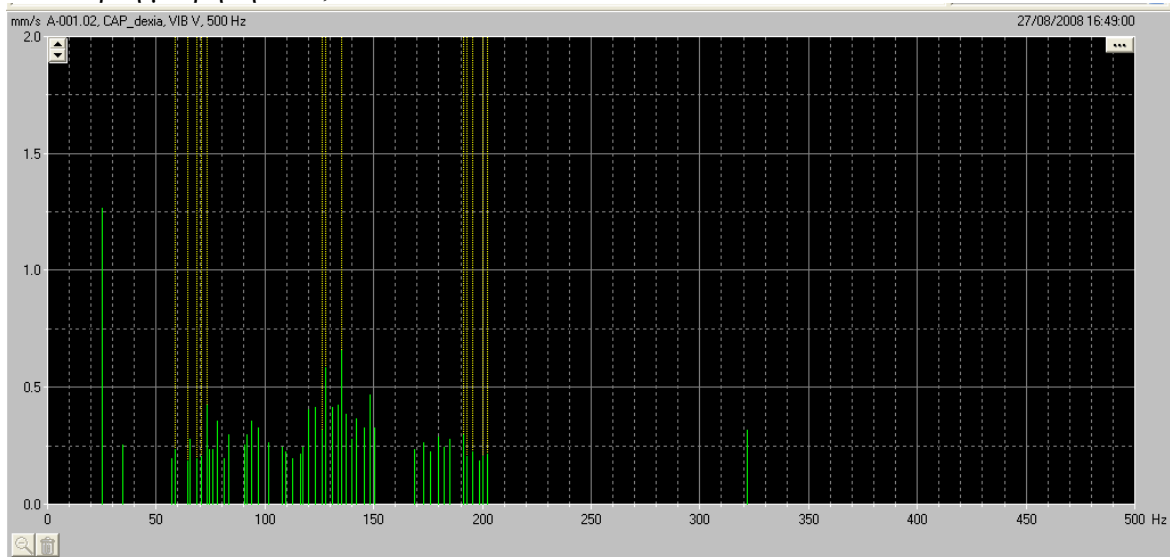
Φάσμα 12.5Φ4: Μέτρηση υπό φορτίο(A=2) για την περίπτωση βλάβης δύο σπασμένων δοντιών σ'ένα γρανάζι.



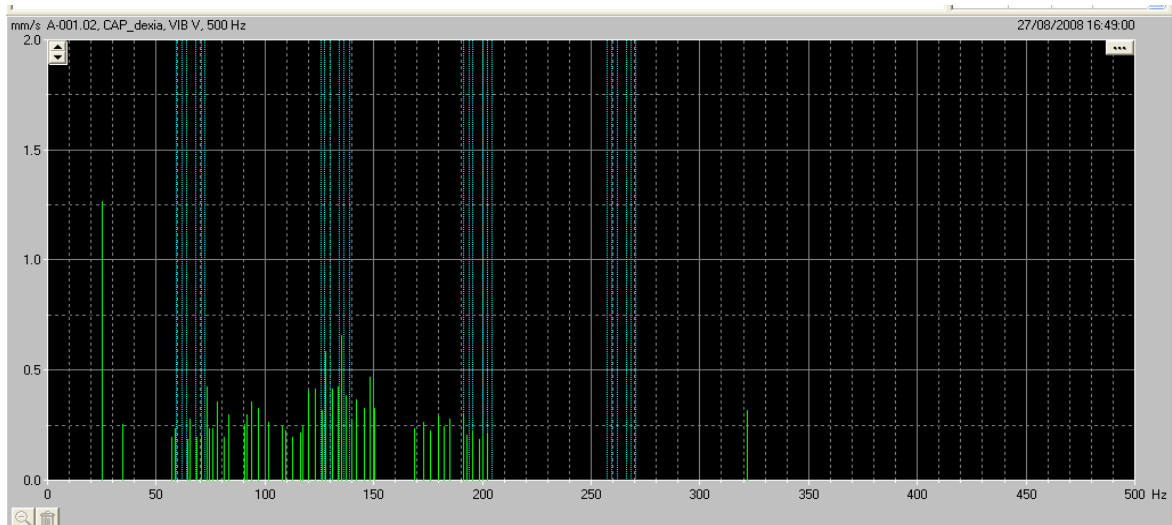
Φάσμα 12.5Φ5: Ιδιο με το προηγούμενο με την μόνη διαφορά ότι εμφανίζει τις πλευρικές συχνότητες που διαμορφώνονται γύρω από την GMF.

Η προηγούμενη παρατήρησή μας επιβεβαιώνεται αφού φαίνεται καθαρά η 2X GMF να είναι μεγαλύτερη από την 1X GMF. Κάτι τέτοιο, ενισχύει την αρχική υποψία μας ότι πρόκειται για πρόβλημα κακής ευθυγράμμισης.

---Τέταρτη μέτρηση: $A=3,0A$:

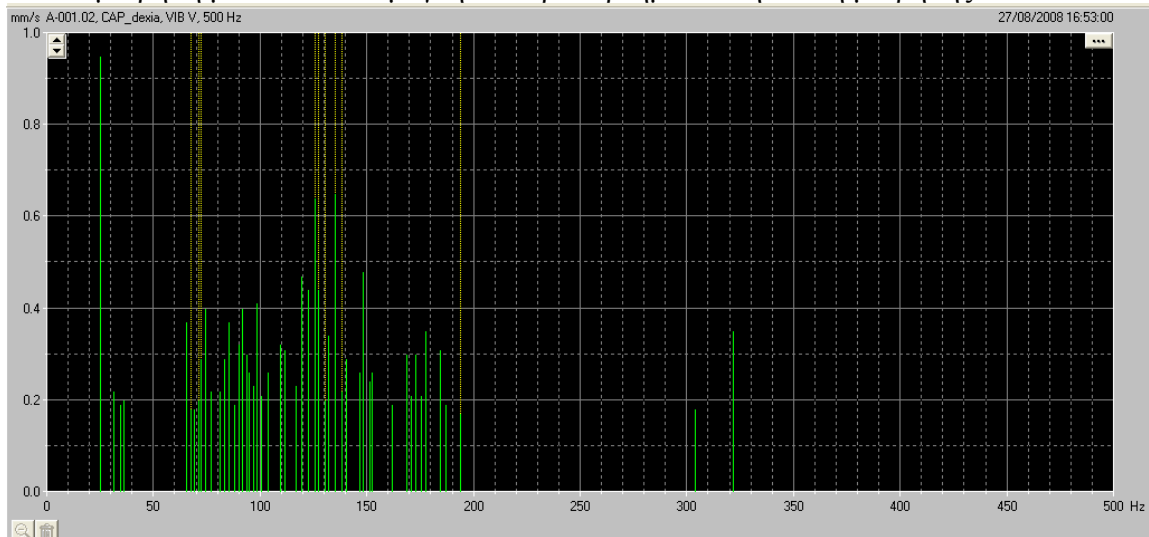


Φάσμα 12.5Φ6: Μέτρηση υπό φορτίο ($A=3$) για την περίπτωση βλάβης δύο σπασμένων δοντιών σ' ένα γρανάτζι.

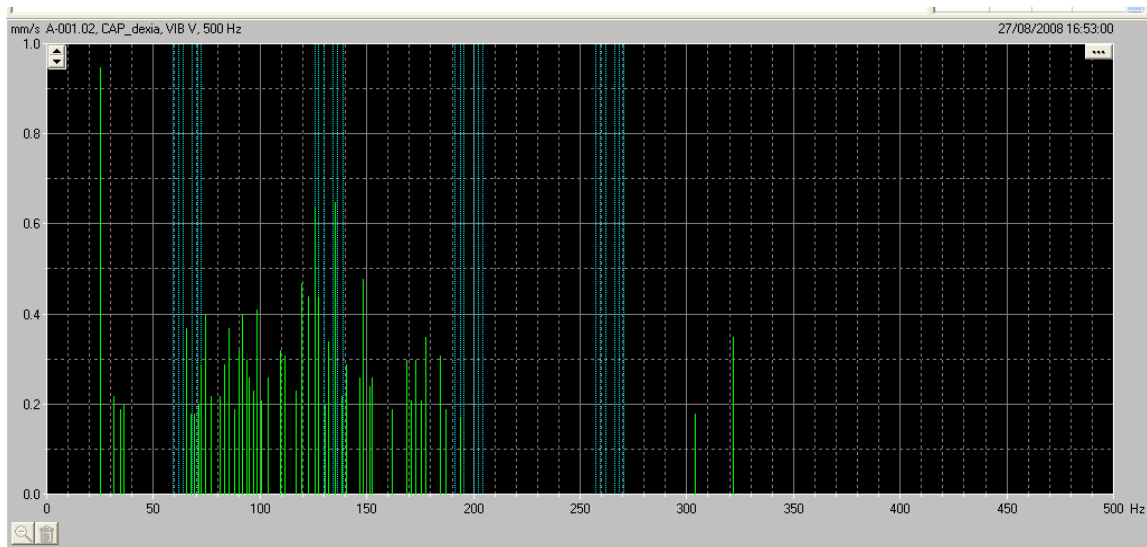


Φάσμα 12.5Φ7: Ιδιο με το προηγούμενο με την μόνη διαφορά ότι εμφανίζει τις πλευρικές συχνότητες που διαμορφώνονται γύρω από την GMF.

---Ιδια μέτρηση με το inverter μαγνητικά προσαρτημένο στην θέση μέτρησης:



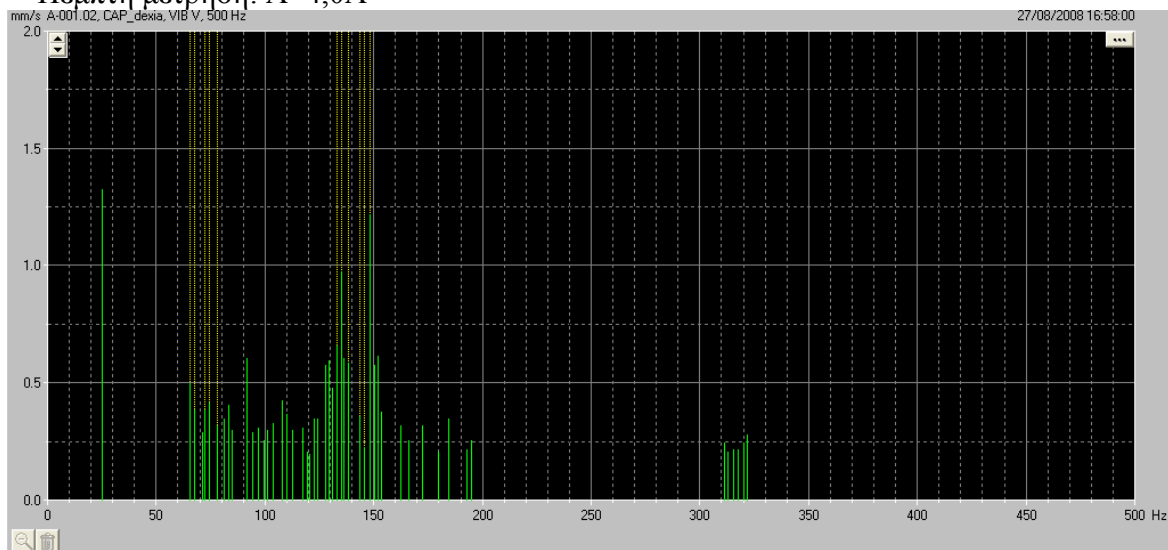
Φάσμα 12.5Φ8: Μέτρηση υπό φορτίο ($A=3$) για την περίπτωση βλάβης δύο σπασμένων δοντιών σ'ένα γρανάζι με τον αισθητήρα μαγνητικά προσαρτημένο στην θέση μέτρησης.



Φάσμα 12.5Φ9: Ιδιο με το προηγούμενο με την μόνη διαφορά ότι εμφανίζει τις πλευρικές συχνότητες που διαμορφώνονται γύρω από την GMF

Ενώ με τον κινητήρα βιδωμένο στην θέση μέτρησης διακρίναμε καθαρά τόσο την 1X GMF (περίπου στα 70Hz) και την 2X GMF (περίπου στα 140+Hz), στις μετρήσεις με τον αισθητήρα μαγνητικά προσαρτημένο διακρίνουμε μία μεγαλύτερη διάζυση ενέργειας και ένα μεγαλύτερο πλήθος διεγερμένων συχνοτήτων, οι οποίες βρίσκονται όλες σχεδόν στο ίδιο πλάτος. Κάτι τέτοιο επιβεβαιώνει την αρχική πεποίθησή μας, ότι δηλαδή όταν ο μεταλλάκτης προσαρμόζεται μαγνητικά λόγω των κραδασμών δεν εδράζεται τόσο σωστά όσο στην περίπτωση του βιδωμένου μεταλλάκτη στο σημείο της μέτρησης. Αυτές οι σχετικές ταλαντευόμενες κινήσεις του μεταλλάκτη μας ως προς την διάταξη είναι που παράγουν τον μικρό αυτό θόρυβο μέσα στο φάσμα των κραδασμών. Ο θόρυβος αυτός γίνεται όλο και πιο αισθητός ιδιαίτερα στα μικρά πλάτη.

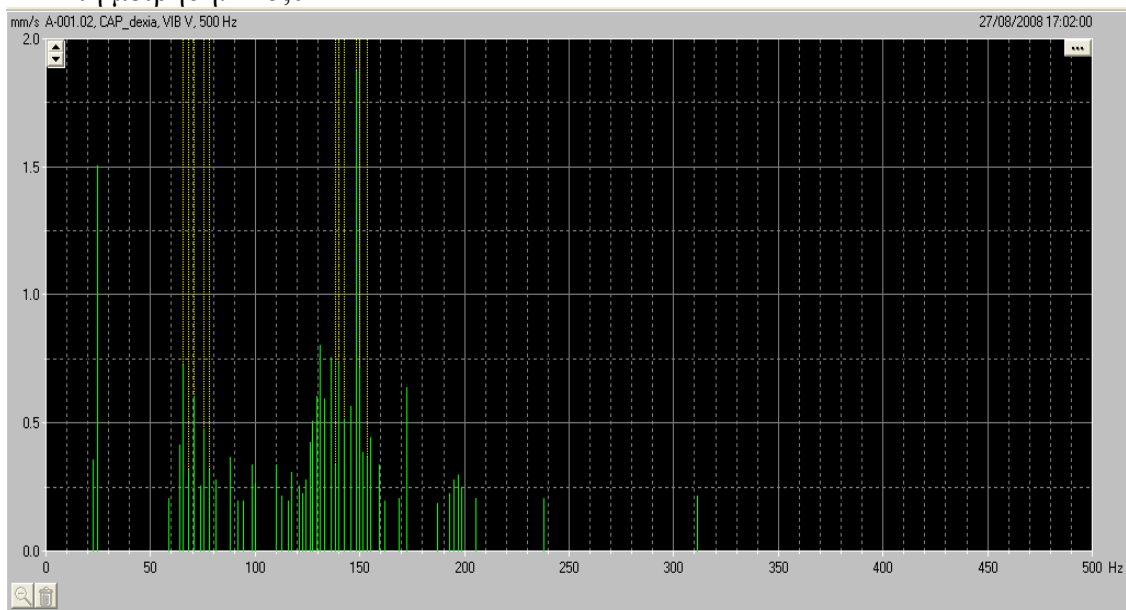
---Πέμπτη μέτρηση: $A=4,0A$



Φάσμα 12.5Φ10: Μέτρηση υπό φορτίο ($A=4$) για την περίπτωση βλάβης δύο σπασμένων δοντιών σ' ένα γρανάτζι με τον αισθητήρα μαγνητικά προσαρτημένο στην θέση μέτρησης.

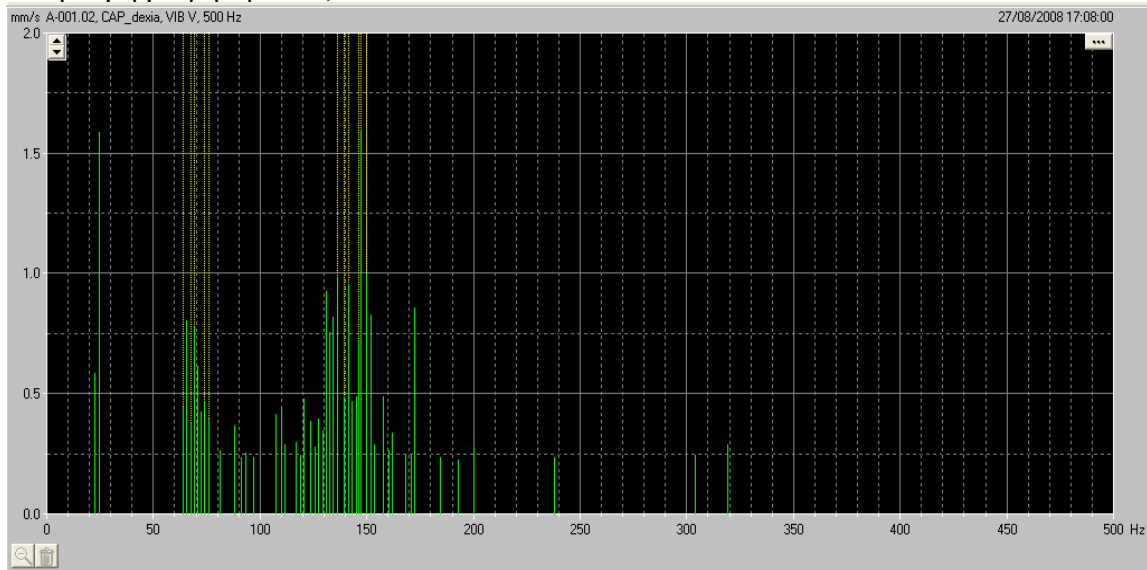
Ενώ το πλάτος της 1X GMF παραμένει σχεδόν το ίδιο παρατηρούμε μια μεγάλη αύξηση στο πλάτος της 2X GMF. Κάτι τέτοιο μας ενισχύει την πεποίθησή μας ότι το κυρίως πρόβλημα είναι η ευθυγράμμιση της μετρούμενης βαθμίδας των οδοντωτών τροχών. Βέβαια, στην 2X GMF παρατηρούμε κάποια αξιοσημείωτη διάχυση ενέργειας ως πλευρικές ζώνες. Αυτό είναι και το σύμπτωμα που εξαρχής περιμέναμε όταν είμασταν έτοιμοι να μετρήσουμε τα δύο σπασμένα δόντια. Περιμέναμε λοιπόν με αύξηση του φορτίου να αυξάνονται τα πλάτη της GMF αλλά, ταυτόχρονα γύρω της να διαμορφώνονται ως πλευρικές ζώνες η συχνότητα των ταχυτήτων περιστροφής του γραναζιού στις 90 και στις 180°.

---Έκτη μέτρηση: $A=5,0A$

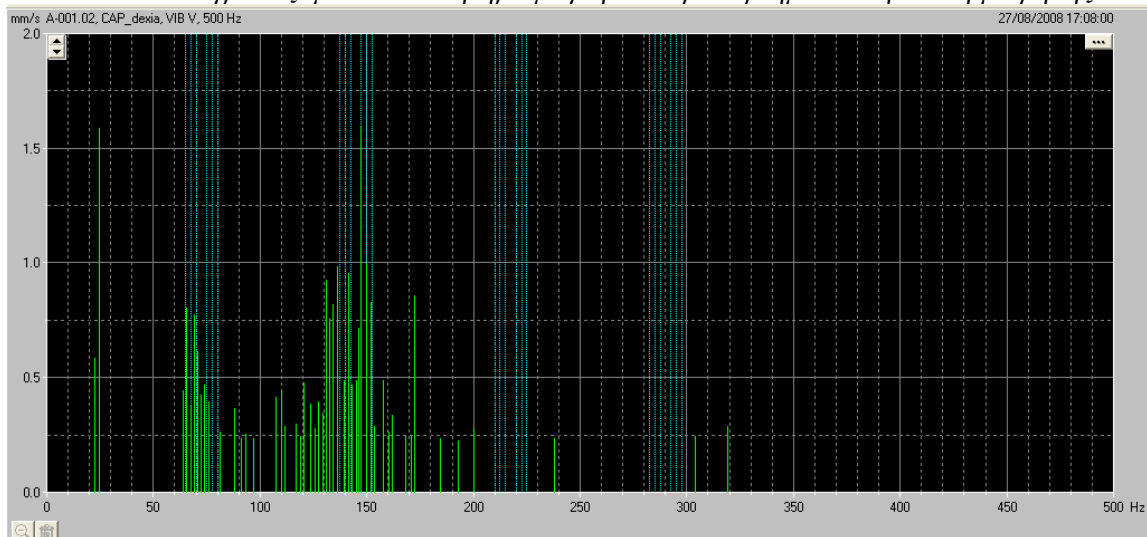


Φάσμα 12.5Φ11: Μέτρηση υπό φορτίο ($A=5$) για την περίπτωση βλάβης δύο σπασμένων δοντιών σ'ένα γρανάτζι με τον αισθητήρα μαγνητικά προσαρτημένο στην θέση μέτρησης.

---Εβδομη μέτρηση: $A=6,0A$ $H=$

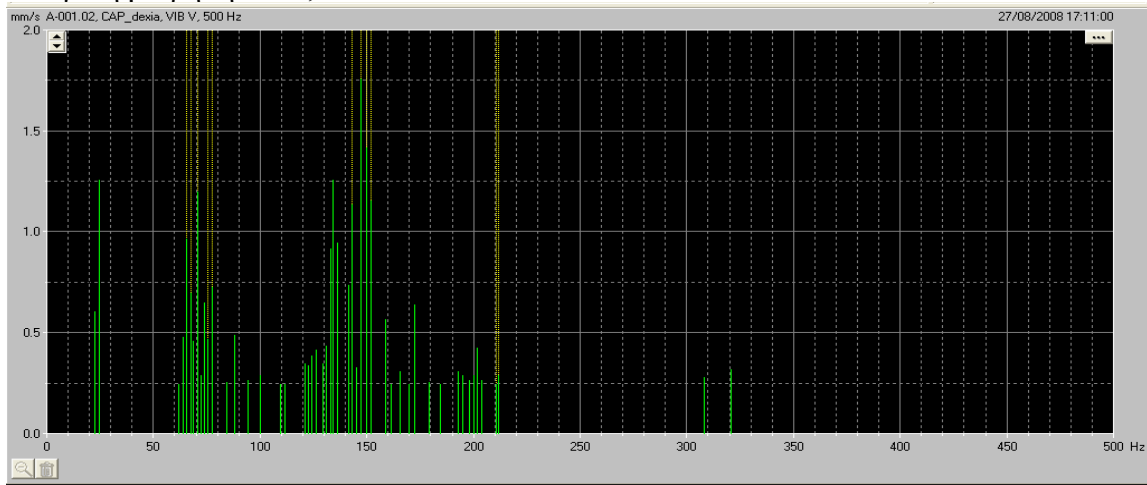


Φάσμα 12.5Φ12: Μέτρηση υπό φορτίο ($A=6$) για την περίπτωση βλάβης δύο σπασμένων δοντιών σ' ένα γρανάτζι με τον αισθητήρα μαγνητικά προσαρτημένο στην θέση μέτρησης.

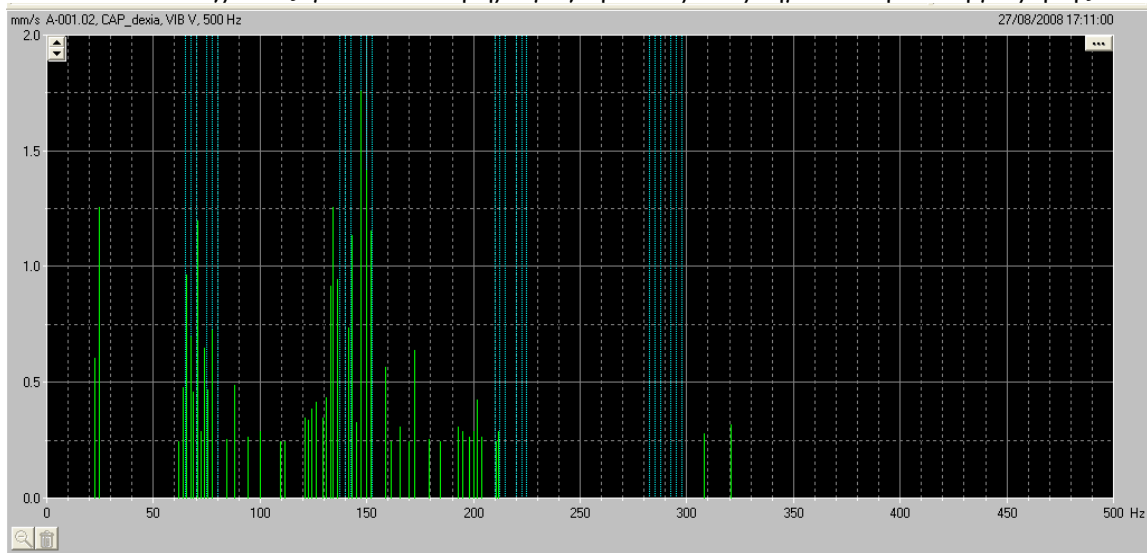


Φάσμα 12.5Φ13: Ιδιο με το προηγούμενο με την μόνη διαφορά ότι εμφανίζει τις πλευρικές συχνότητες που διαμορφώνονται γύρω από την GMF

---Ογδοη μέτρηση: $A=7,0A$



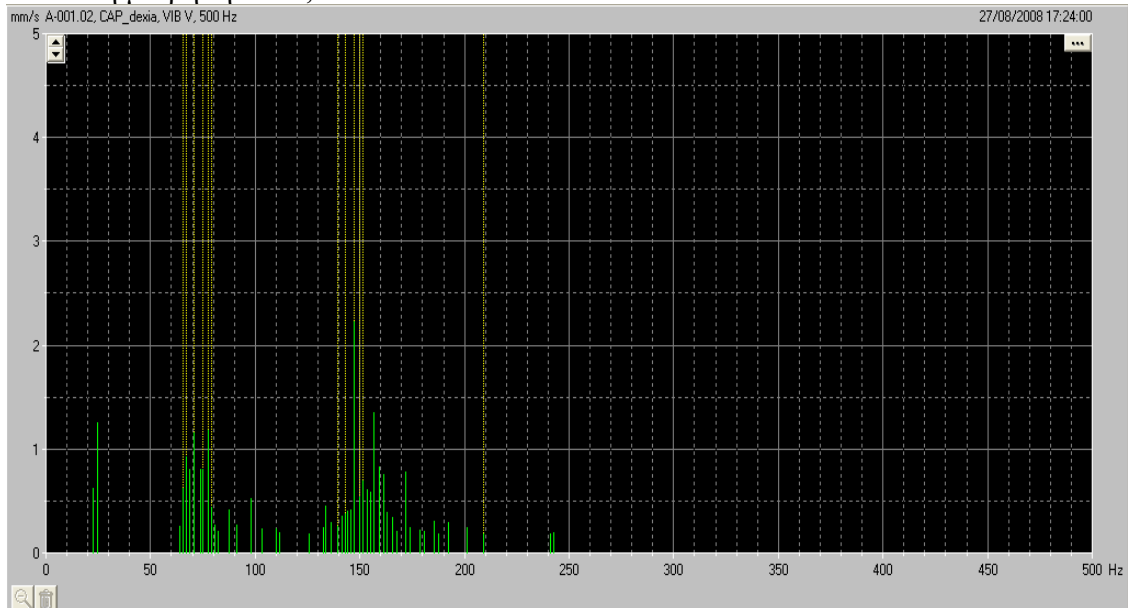
Φάσμα 12.5Φ14: Μέτρηση υπό φορτίο ($A=7$) για την περίπτωση βλάβης δύο σπασμένων δοντιών σ'ένα γρανάζι με τον αισθητήρα μαγνητικά προσαρτημένο στην θέση μέτρησης.



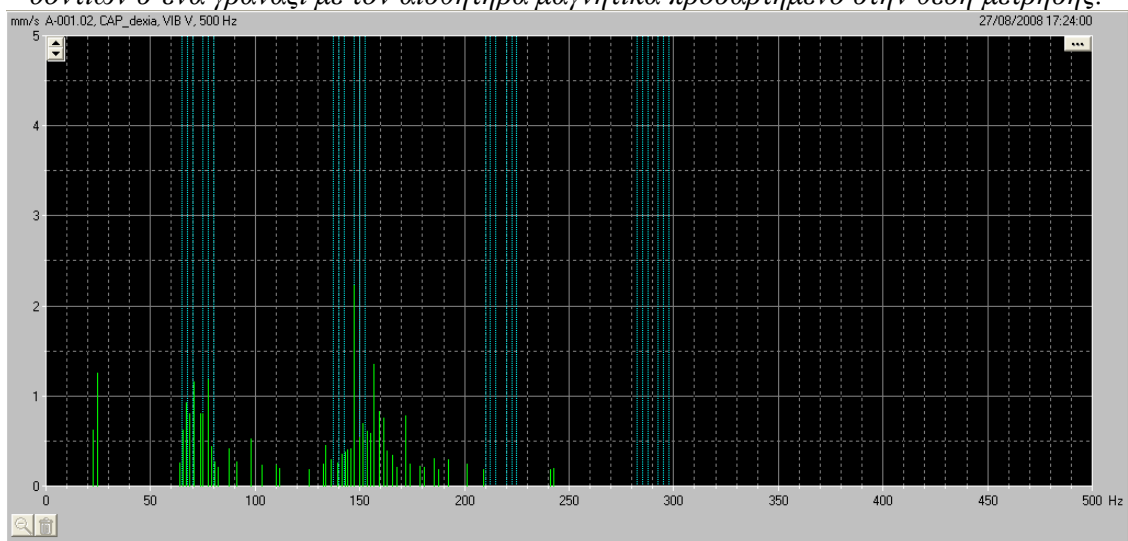
Φάσμα 12.5Φ15: Ιδιο με το προηγούμενο με την μόνη διαφορά ότι εμφανίζει τις πλευρικές συχνότητες που διαμορφώνονται γύρω από την GMF

Παρατηρούμε ότι εάν και η 1X GMF παραμένει μικρότερη της 2X GMF για τους λόγους που έχουμε προαναφέρει, αρχίζει και σχηματίζεται γύρω από την 1X GMF η αναμενόμενη διάχυση ενέργειας με ορατές πλέον τις συχνότητες περιστροφής του γραναζιού στις 90 και στις 180° ως πλευρικές ζώνες αυτής.

---Ένατη μέτρηση: $A=8,0A$

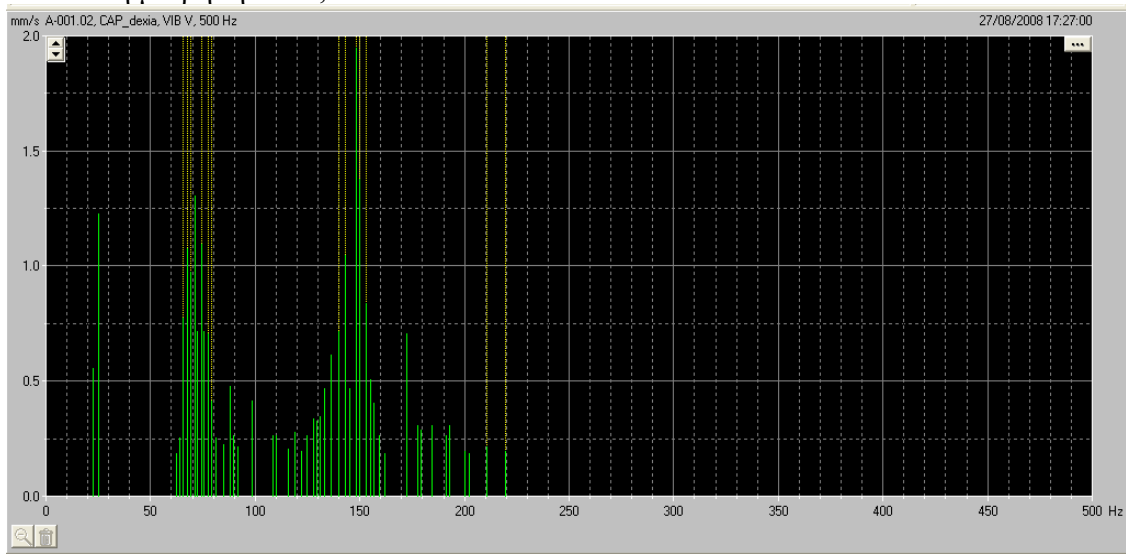


Φάσμα 12.5Φ16: Μέτρηση υπό φορτίο ($A=8$) για την περίπτωση βλάβης δύο σπασμένων δοντιών σ'ένα γρανάζι με τον αισθητήρα μαγνητικά προσαρτημένο στην θέση μέτρησης.

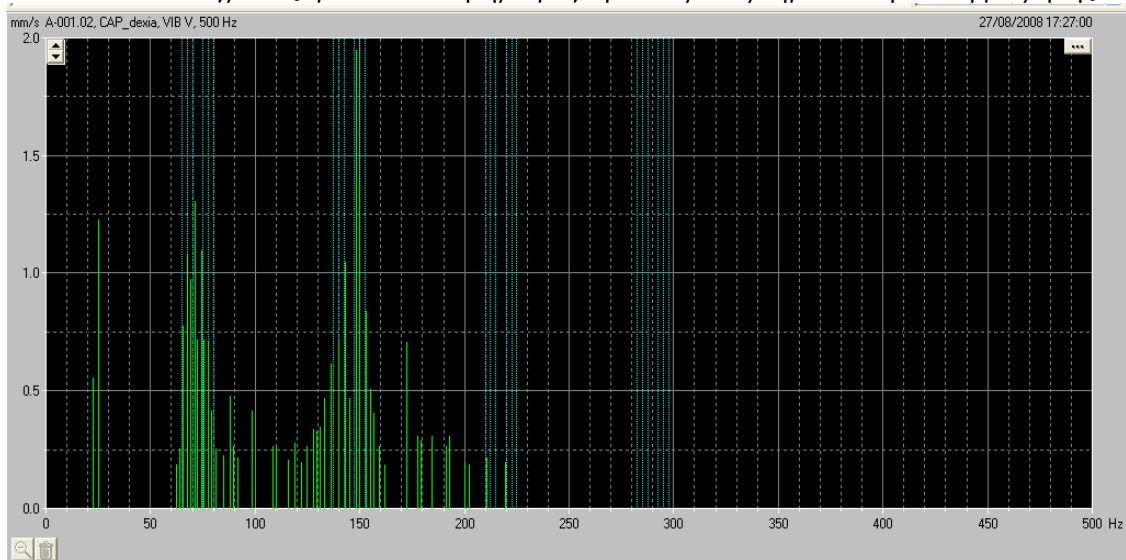


Φάσμα 12.5Φ17: Ιδιο με το προηγούμενο με την μόνη διαφορά ότι εμφανίζει τις πλευρικές συχνότητες που διαμορφώνονται γύρω από την GMF

---Δέκατη μέτρηση: $A=8,7A$



Φάσμα 12.5Φ18: Μέτρηση υπό φορτίο ($A=8,7$) για την περίπτωση βλάβης δύο σπασμένων δοντιών σ' ένα γρανάτζι με τον αισθητήρα μαγνητικά προσαρτημένο στην θέση μέτρησης



Φάσμα 12.5Φ19: Ιδίο με το προηγούμενο με την μόνη διαφορά ότι εμφανίζει τις πλευρικές συχνότητες που διαμορφώνονται γύρω από την GMF

Το παραπάνω είναι ίσως το φάσμα που αναπαριστά καλύτερα όλα αυτά που έχουμε πει προηγουμένως. Γύρω από την 1X GMF έχουν διαμορφωθεί καθαρά ως πλευρικές ζώνες οι συχνότητες περιστροφής των σπασμένων δοντιών. Το πλάτος των συχνοτήτων αυτών είναι αρκετά μεγάλο και έτσι μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα πως πρόκειται για μία ανεπανόρθωτη βλάβη στο γρανάτζι το οποίο πρέπει να αλλαχθεί. Όσον αφορά την 2X GMF παρατηρούμε πως και αυτής το πλάτος είναι αρκετά μεγάλο και πως υπάρχει και σ' αυτή διάχυση ενέργειας γύρω από την GMF. Αυτή η διάχυση ενέργειας όμως είναι σε πολύ μεγαλύτερο πλάτος απ' ό τι της 1X GMF. Έτσι οι πλευρικές ζώνες που

διαμορφώνονται πιθανόν να είναι η ταχύτητα περιστροφής του περιοδικού παλμού που ευθύνεται για την κακή ευθυγράμμιση των δύο γραναζιών.

Από την κάθε μέτρηση πινακοποιούμε το μέγιστο πλάτος της 1X GMF(αυτή είναι που αναπαριστά καλύτερα την βλάβη των σπασμένων δοντιών) και την ένδειξη του ρεύματος του inverter(φορτίο) στις διάφορες περιπτώσεις. Προκύπτει λοιπόν ο ακόλουθος πίνακας:

α/α	Μέγιστο πλάτος(mm/sec)	Φορτίο(A)
1	0,1	0
2	0,18	1
3	0,25	2
4	0,38	3
5	0,5	4
6	0,74	5
7	0,8	6
8	1,2	7
9	1,2	8
10	1,3	8,7

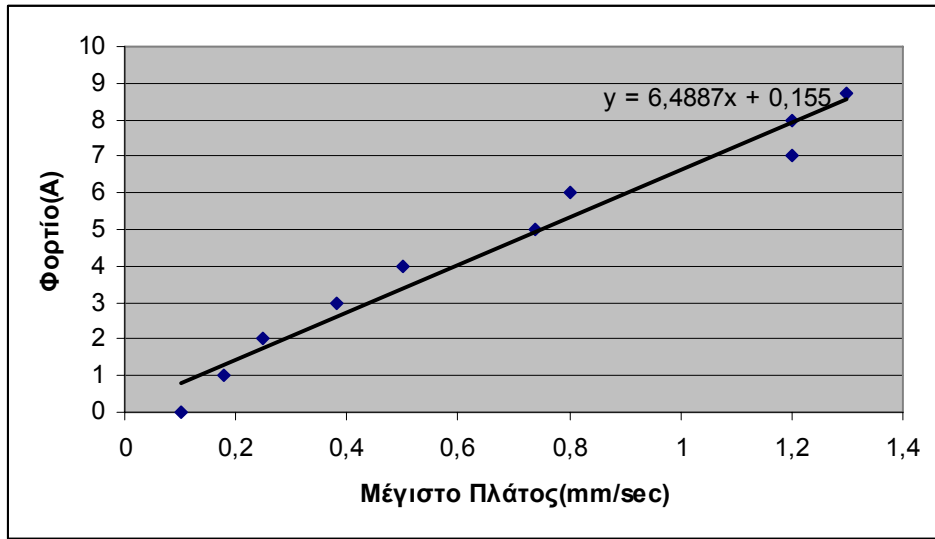
Πίνακας 12.5Π1:Παρουσίαση υπό μορφή πίνακα του πλάτους της συχνότητα 1X GMF και του επιβαλλόμενου φορτίου μέσω της ένδειξης του inverter για κάθε περίπτωση.

Ύστερα , έχοντας σαν δεδομένα τις τιμές του πίνακα προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα, που το τελευταίο αυτών αναφέρει και την γραμμική σχέση που αρχικά ζητούσαμε. Κάποιες μικρές αποκλίσεις από την ευθεία μπορούν να δικαιολογηθούν ως:

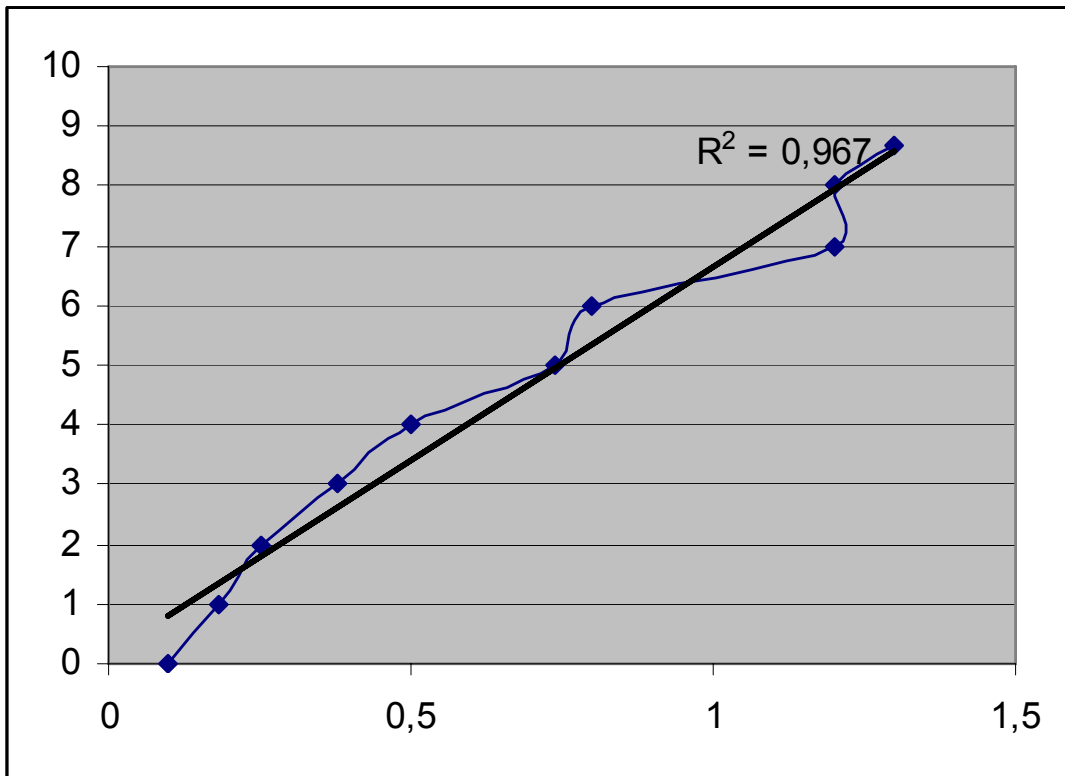
1. Σφάλματα κατά την μέτρηση(πχ ο αισθητήρας δεν εδράζεται το ίδιο σωστά σ' όλες τις μετρήσεις)
2. Σφάλματα που προέρχονται από τις στρογγυλοποιήσεις όσον αφορά τις συχνότητες που δημιουργεί το ίδιο το πρόγραμμα. Ας αναφέρουμε ένα παράδειγμα για να γίνουμε πιο κατανοητοί. Όταν το πρόγραμμα αναγνωρίσει δύο παλμούς οι οποίοι βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους στο εύρος συχνοτήτων, ο ένας εκ των οποίων είναι η GMF και ο άλλος είτε προέρχεται από την λανθασμένη ευθυγράμμιση είτε από κάποιον άλλο τυχαίο λόγο(πχ ο αισθητήρας δεν εδράζεται σωστά), θα αντιστοιχήσει τους δύο κραδασμούς σε έναν είτε προσθέτοντάς τους, είτε αντιστοιχίζοντας ένα κομμάτι του τυχαίου κραδασμού στην GMF και ένα ως πλευρική ζώνη αυτής.

Παραθέτουμε παρακάτω τα διαγράμματα που εξήχθησαν μέσω του προγράμματος *Microsoft Office Excel 2003*, με απώτερο σκοπό την εξαγωγή μίας γραμμικής σχέσης που να μπορεί να μας αποδώσει το πλάτος της 1XGMF ως συνάρτηση του φορτίου. Η σχέση αυτή είναι:

$$y = 6,4887 * x + 0,155$$

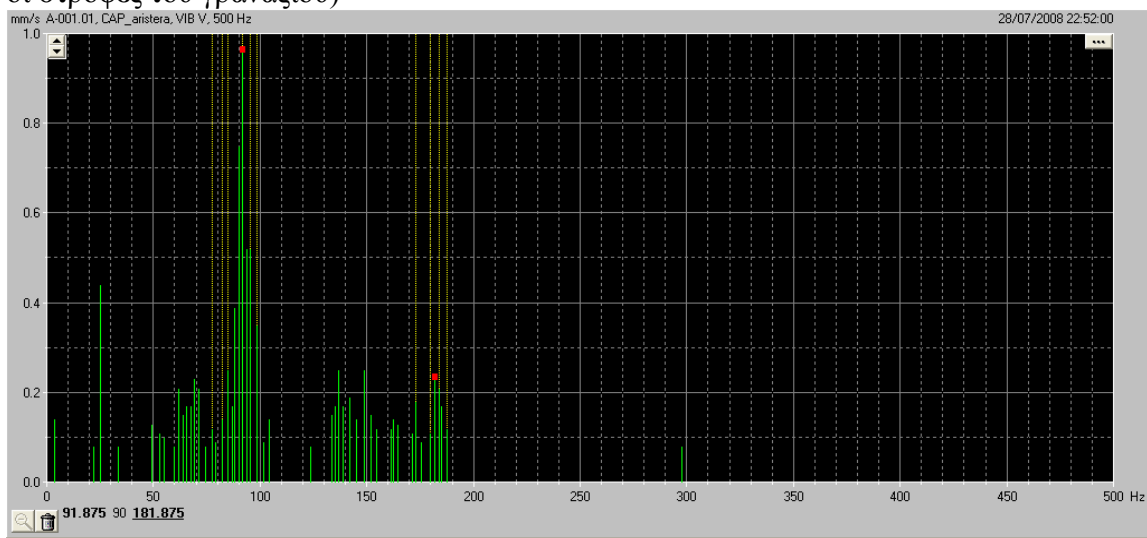


Διάγραμμα 12.5Δ1: Εξαγωγή γραμμικής σχέσης βάσει των πειραματικών σημείων.

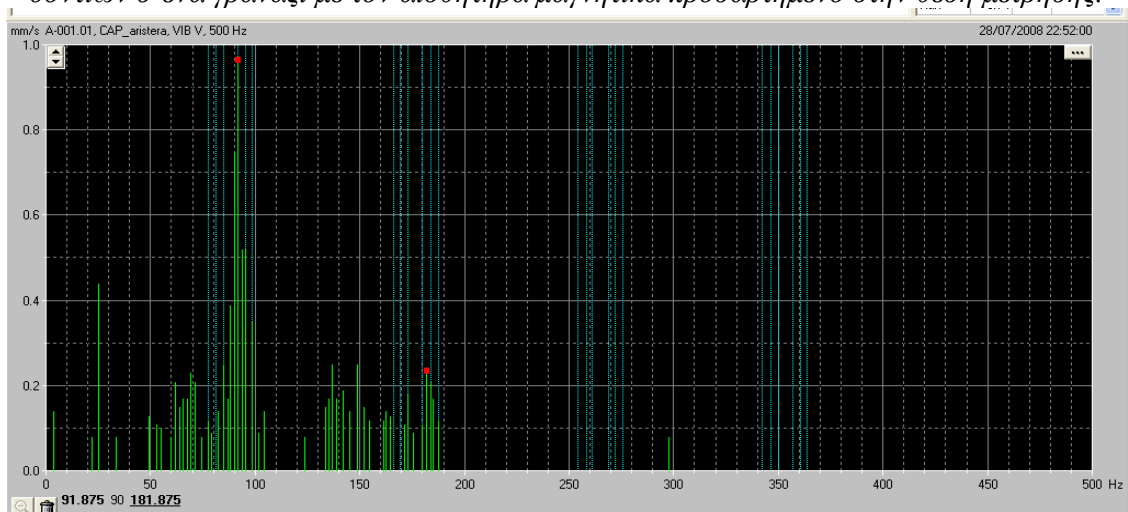


Διάγραμμα 12.5Δ2: Προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων στην γραμμική σχέση.

Παραθέτουμε παρακάτω ένα φάσμα που πήραμε κάποια άλλη χρονική στιγμή με την ένδειξη του inverter στα 7 A, ενώ είχαμε προσπαθήσει να αφαιρέσουμε από την διάταξή μας οποιαδήποτε άλλη βλάβη. Παρατηρούμε ότι η μορφή του πλησιάζει την επιθυμητή που είχαμε περιγράψει παραπάνω αφού η 1X GMF έχει πλάτος μεγαλύτερο της 2X καθώς και ότι οι πλευρικές ζώνες γύρω και από τις δύο συχνότητες που προαναφέραμε αντικατοπτρίζουν τις ταχύτητες περιστροφής των δύο σπασμένων οδόντων. Σημειώνουμε, πως η η 1X GMF και η 2X GMF είναι σ' αυτή την περίπτωση στα 91 και 181Hz αντίστοιχα. Δεν είναι οι ίδιες μ' αυτές του προηγούμενου παραδείγματος αφού ναι μεν το προβληματικό γρανάζι παραμένει το ίδιο και στις δύο μετρήσεις αλλά, το συνεργαζόμενο είναι διαφορετικό και άρα αλλάζουν οι συχνότητες αυτές, όπως αλλάζουν βέβαια και οι συχνότητες περιστροφής των προβληματικών δοντιών(αλλάζουν οι στροφές του γραναζιού)

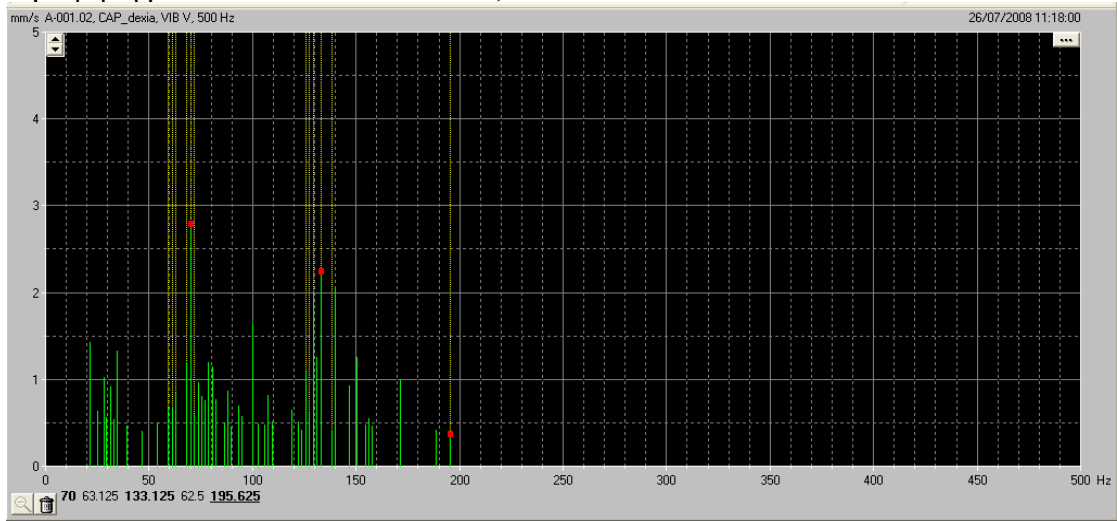


Φάσμα 12.5Φ21: Μέτρηση υπό φορτίο(A=7) για την περίπτωση βλάβης δύο σπασμένων δοντιών σ' ένα γρανάζι με τον αισθητήρα μαγνητικά προσαρτημένο στην θέση μέτρησης.



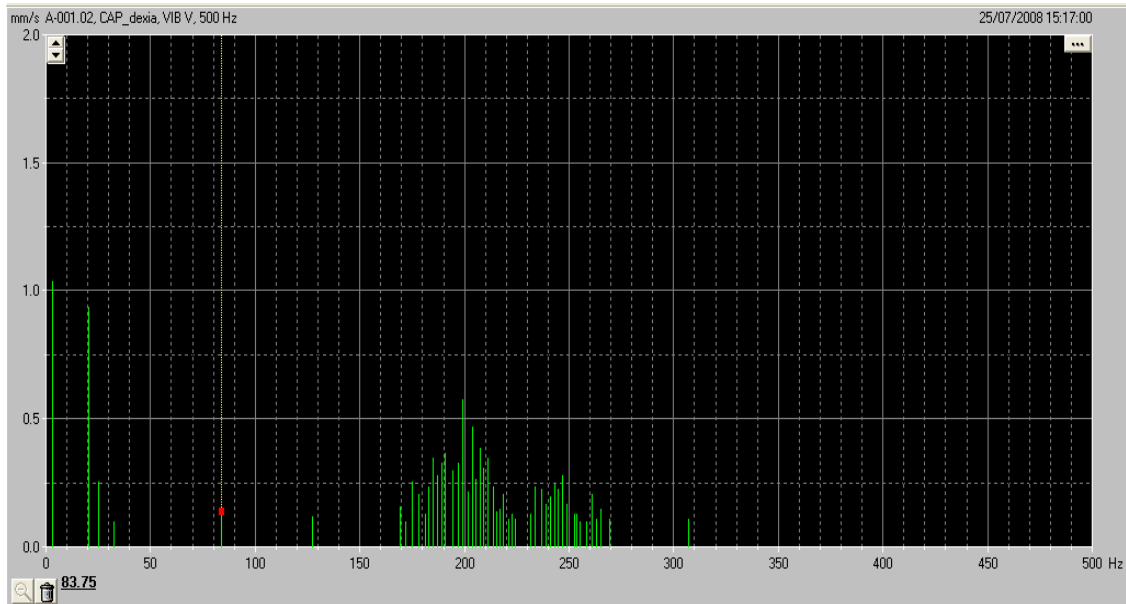
Φάσμα 12.5Φ22: Ιδιο με το προηγούμενο με την μόνη διαφορά ότι εμφανίζει τις πλευρικές συχνότητες που διαμορφώνονται γύρω από την GMF

---μέτρηση με το inverter ανοικτό: $A=8,7$.



Φάσμα 12.5Φ23: Μέτρηση υπό φορτίο ($A=8,7$) για την περίπτωση βλάβης δύο σπασμένων δοντιών σ' ένα γρανάτζι με τον αισθητήρα μαγνητικά προσαρτημένο στην θέση μέτρησης.

--- Αποσύνδεση μειωτήρα με σκοπό την αύξηση των στροφών(1670rpm) και μέτρηση στην δεξιά πλευρά της πειραματικής διάταξης με κακή ευθυγράμμιση και δύο σπασμένα δόντια.



Φάσμα 12.5Φ24: Μέτρηση χωρίς την επιβολή φορτίου για την περίπτωση βλάβης δύο σπασμένων δοντιών σ'ένα γρανάζι με τον αισθητήρα μαγνητικά προσαρτημένο στην θέση μέτρησης.

Το παραπάνω φάσμα πάρθηκε με μηδενικό φορτίο, έτσι ώστε να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης σ'ένα διαφορετικό εύρος στροφών απ'αυτό που μετράγαμε μέχρι τώρα. Διακρίνουμε μόνο την 1X GMF και παρατηρούμε ότι εάν και το πλάτος της στην συγκεκριμένη μέτρηση δεν είναι αυξημένο(κάτι τέτοιο είναι λογικό αφού έχουμε μηδενικό φορτίο), υπάρχει μια μεγάλη διάχυση ενέργειας γύρω απ' αυτήν εμφανιζόμενη ως πλευρικές ζώνες. Αυτό και μόνο είναι ένα γεγονός που μας υποδεικνύει με μεγάλη βεβαιότητα ότι στο γρανάζι υπάρχει κάποια βλάβη και χρειάζεται αλλαγή. Αυτή η βλάβη είναι το σπάσιμο ενός δοντιού. Το γεγονός ότι δεν μπορούμε να διακρίνουμε στις πλευρικές ζώνες κάποιες συχνότητες περιστροφής, οι οποίες θα μας έδιναν με σιγουριά το μέγεθος και την τοπολογία του προβλήματος(δηλαδή ότι σ'αυτό το γρανάζι υπάρχει 1,2 ή περισσότερα σπασμένα δόντια και τα οποία έχουν κάποια διαφορά φάσης μεταξύ τους) οφείλεται κατά κύριο λόγο σε δύο αιτία:

1. Η ταχύτητα περιστροφής του γραναζιού, η οποία είναι πολύ μεγάλη.
2. Το ότι τα σπασμένα δόντια του εξεταζόμενου γραναζιού βρίσκονται σε δύο σημεία που έχουν διαφορά φάσης μεταξύ τους 90°. Αυτές οι διακριτές γραμμές λοιπόν, που παρουσιάζονται στο αποδιαμορφωμένο φάσμα δεν μπορούν να αποτυπώσουν αυτή τη μικρή διαφορά φάσης ως ξεχωριστή ταχύτητα περιστροφής πάνω στο τελικό φάσμα. Όπως έχουμε προαναφέρει για τέτοιες περιπτώσεις είναι ιδανική η μελέτη του χρονικού σάματος από την οποία μπορεί κανείς να βγάλει αξιόπιστα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 13ο

Γενικά συμπεράσματα:

Μετά και την ολοκλήρωση των μετρήσεων και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, μπορούμε να αναφερθούμε στην μεγάλη ταχύτητα και η αξιοπιστία του μηχανήματος μέτρησης κραδασμών T30 της σουηδικής εταιρίας SPM.

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. Η μέθοδος EVAM, με ανάλυση του φάσματος του σήματος των μετρήσεων (VIB) για έλεγχο όλων των στοιχείων μηχανής εφαρμόζεται με πολύ μεγάλη ευκολία και δίνει 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.

Παρακάτω, αναφέρονται υπό μορφή πίνακα τα συμπεράσματα που εξήχθησαν για την μορφή του φάσματος κραδασμών από τον κάθε τύπο βλάβης οδοντωτού τροχού που πειραματιστήκαμε:

Γενικά συμπεράσματα/ τύπο βλάβης					
Μορφή χαρακτηριστικών μεγεθών φάσματος	1 X GMF	2 X GMF	Κλασματικές της GMF	Επίδραση φορτίου	Μορφή πλευρικών ζωνών
Κακή ευθυγράμμιση	Συνήθως εμφανίζεται ένα μεγάλο περιοδικό χτύπημα με μεγάλο πλάτος & μικρή διάχυση ενέργειας.	Εμφανίζονται τόσο η 2X όσο και κάποιες φορές και οι 3X, 4X και 5X. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι δυνατόν το πλάτος κάποιας αρμονικής της GMF να είναι μεγαλύτερο απ' αυτό της πρώτης.	Δεν υπάρχει κάτι αξιοσημείωτο όσον αφορά τις κλασματικές συχνότητες της GMF	Το πλάτος στην συχνότητα που εμφανίζεται το μεγάλο περιοδικό χτύπημα αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου, ενώ στις υπόλοιπες αρμονικές μπορεί και να μειώνεται.	Δεν υπάρχει κάτι αξιοσημείωτο όσον αφορά τις πλευρικές ζώνες.
Εκκεντρότητα κ' χάρη μεταξύ των κατατομών	Εμφανίζεται μια μεγάλου πλάτους αιχμή, με μεγαλύτερη διάχυση ενέργειας συγκριτικά με την παραπάνω βλάβη εμφανιζόμενη ως πλευρικές ζώνες.	Και εδώ παρατηρείται η εμφάνιση πολλών αρμονικών της συχνότητας εμπλοκής των τροχών καθώς και το ότι σε κάποιες περιπτώσεις κάποια απ' αυτές τις αρμονικές μπορεί να ξεπεράσει σε πλάτος την 1X.	Δεν παρατηρήθηκε κάτι αξιοσημείωτο όσον αφορά τις κλασματικές συχνότητες της GMF	Ενδέχεται τα πλάτη της GMF να μειώνονται με την αύξηση του φορτίου	Παρουσιάζεται ένα σχετικά υψηλό μέσο επίπεδο πλάτους πλευρικών ζωνών. Αν η διαφορά συχνοτήτων μεταξύ των πλευρικών ζωνών είναι ίση μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα για το ποιο γρανάζι περιστρέφεται έκκεντρα.
Σπασμένο δόντι	Προκαλείται μια πολύ μεγάλη αιχμή στην 1X GMF	Το πλάτος της 2X GMF, αν και σε καμία περίπτωση αμελητέο, είναι πάντοτε μικρότερο της 1X GMF.	Δεν παρατηρήθηκε κάτι αξιοσημείωτο όσον αφορά τις κλασματικές συχνότητες της GMF	Τόσο τα πλάτη της GMF όσο και οι πλευρικές συχνότητες αυτών αυξάνουν σχεδόν ισόποσα με την αύξηση του φορτίου.	Οι πλευρικές ζώνες γύρω από την GMF και τις αρμονικές της έχουν καταρχήν μεγάλο πλάτος καθώς και αποτελούν ισχυρή ένδειξη για την "τοπολογία" αλλά και τον αριθμό των σπασμένων δοντιών στο γρανάζι μας. Ως πλευρικές ζώνες της GMF διαμορφώνονται οι συχνότητες περιστροφής των σπασμένων δοντιών.
"Υποχώρηση" της ονομαστικής διαμέτρου	Πρόκληση μιας αιχμής μικρού σχετικά πλάτους χωρίς μεγάλη διάχυση ενέργειας γύρω απ' αυτήν.	Είναι ορατή, αν και όχι πολύ μεγάλη. Πάντοτε όμως είναι μικρότερη της 1X GMF.	Εμφάνιση της 1½ XGMF καθώς και διαμόρφωση πλευρικών ζωνών γύρω από αυτήν	Τόσο τα πλάτη της 1½ XGMF όσο και οι πλευρικές συχνότητες αυτών μειώνονται με την αύξηση του φορτίου.	Οι πλευρικές ζώνες είναι η +/-2 ή η +/-3 συχνότητα περιστροφής του προβληματικού γραναζιού.

Πίνακας 13.111: Συμπεράσματα διπλωματικής εργασίας.