

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΚΜΗΧΑΝΙΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΝΑΤΣΗΣ



ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΤΟΥΣ ΓΕΩΡΓΙΚΟΥΣ
ΕΛΚΥΣΤΗΡΕΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ
ΚΑΛΛΙΜΑΝΗ ΙΩΑΝΝΗ

ΑΘΗΝΑ 2010

ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΒΑΑΒΩΝ ΣΤΟΥΣ ΓΕΩΡΓΙΚΟΥΣ ΕΛΚΥΣΤΗΡΕΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός αυτής της εργασίας ήταν η πρόγνωση και η διάγνωση βλαβών σε γεωργικά μηχανήματα με την μέθοδο της ανάλυσης των δονήσεων αλλά και την χρήση της ακουστικής ανάλυσης. Έγιναν μετρήσεις σε σημεία του γεωργικού ελκυστήρα που παρουσιάζουν συχνά βλάβες όπως είναι τα ρουλεμάν του άξονα μετάδοσης της κίνησης (PTO) και τα ακροφύσια εκτόξευσης πετρελαίου (μπεκ) στο σύστημα τροφοδοσίας του πετρελαιοκινητήρα.

Με την χρήση των νέων αυτών τεχνολογιών προσδιορίζεται ακριβώς ο χρόνος συντήρησης του ελκυστήρα με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους συντήρησης και την αύξηση της αξιοπιστίας.

Λέξεις κλειδιά: μηχανική δόνηση, ακουστική ανάλυση, έλεγχος ρουλεμάν, έλεγχος μπεκ, συντήρηση, διάγνωση, πρόγνωση .

DIAGNOSIS AND FORECAST OF DAMAGE IN AGRICULTURAL TRACTORS

ABSTRACT

The aim of this work was the forecast and the diagnosis of any damage in agricultural machines with the method of analysis of the vibrations but also the use of the acoustic analysis. Measurements were made in those parts of an agricultural tractor that are often damaged like the bearings of the axis of transmission of movement (PTO) and the injectors of oil in the system of fuelling of the oil engine.

With the use of this new technologies the time of maintenance of a tractor is precisely determined so the reduction of the cost of maintenance and the increase of reliability are achieved.

Words keys: mechanic vibration, acoustics analysis, bearing control, maintenance, diagnosis, forecast.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός αυτής της εργασίας ήταν η πρόγνωση και η διάγνωση βλαβών σε γεωργικούς ελκυστήρες με την χρήση νέων τεχνολογιών. Έγιναν μετρήσεις στα ρουλεμάν του άξονα μετάδοσης της κίνησης ΡΤΟ με την μέθοδο της ανάλυσης των κρούσεων και της ανάλυσης των δονήσεων. Επίσης, έγινε ηχογράφηση του ήχου των μπεκ και ανάλυση αυτού.

Για την πραγματοποίηση όλων των παραπάνω θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Αθανάσιο Νάτση επίκουρο καθηγητή του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών για την πολύτιμη βοήθεια του, τον φίλο Χρήστο Δημητρόπουλο για την βοήθεια του στην λήψη και στην ανάλυση των μετρήσεων, τον Τσαγκαρόπουλο Μιχάλη, καθώς και τους ιδιοκτήτες των ελκυστήρων για την προθυμία τους να μας βοηθήσουν.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδερφή μου, που με ανέχτηκαν όλο αυτό τον καιρό.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.

1.	Συντήρηση.....	6
1.1	Ορισμός της συντήρησης.....	6
1.2	Η σημασία της συντήρησης.....	6
1.3	Ο στόχος της συντήρησης.....	7
1.4	Η συντήρηση των γεωργικών ελκυστήρων	7
1.5	Δαπάνες για την συντήρηση των γεωργικών ελκυστήρων.....	10
2.	Αστοχία -αξιοπιστία μηχανικών συστημάτων.....	13
2.1	Ορισμός αξιοπιστίας	13
2.2	Αστοχία συντήρησης.....	14
2.3	Σχέση της αξιοπιστίας και του κόστους συντήρησης.....	15
3.	Διάγνωση και πρόγνωση.....	16
3.1	Ορισμοί.....	16
3.2	Τεχνικές διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών.....	16
3.3	Ταλαντώσεις.....	21
3.3.1	Περιοδικές ταλαντώσεις.....	21
3.3.2	Σύνθετες ταλαντώσεις.....	21
3.3.3	Χαρακτηριστικά μεγέθη ταλαντώσεων.....	22
3.3.4	Μέτρηση μηχανικών ταλαντώσεων.....	24
3.4	Όργανα μετρήσεων.....	26
3.4.1	Οι τύποι των οργάνων μέτρησης.....	26
3.5	Αισθητήρες.....	27
3.5.1	Οι αισθητήρες (sensors)των οργάνων μέτρησης.....	27
3.5.2	Οι απαραίτητες ιδιότητες των αισθητήρων.....	28
3.5.3	Τύποι αισθητήρων.....	28
3.5.3.α	Αισθητήρες μετατόπισης.....	28
3.5.3.β	Αισθητήρες ταχύτητας.....	30
3.5.3.γ	Αισθητήρες επιτάχυνσης.....	32
3.5.4	Εύρεση του σωστού σημείου μέτρησης.....	34
3.5.5.	Τρόποι έδρασης του αισθητήρα στο σημείο μέτρησης.....	37
3.6.	Εμφάνιση δονήσεων λόγω της ύπαρξης κάποιας δυσλειτουργίας στην μηχανή.....	40
3.6.1.	Πηγές δονήσεων.....	40
3.6.2.	Οι συχνότητες των πηγών των δονήσεων.....	45
3.6.3.	Εύρος συχνοτήτων.....	45
3.6.4.	Παράγοντες κλίμακας.....	47

4	Έλεγχος της κατάστασης των εδράνων κύλισης(ρουλεμάν).....	49
4.1	Ορισμός.....	49
4.2	Τύποι ρουλεμάν.....	50
4.3	Τα υλικά κατασκευής των ρουλεμάν.....	53
4.4	Η φροντίδα και η συντήρηση των ρουλεμάν.....	53
4.4.1	Λίπανση.....	53
4.4.1α	Πλεονεκτήματα λίπανσης.....	53
4.4.1β	Κύριοι μέθοδοι λίπανσης.....	54
4.4.2.	Τοποθέτηση των ρουλεμάν.....	55
4.5	Η φθορά των ρουλεμάν.....	55
4.6.	Αστοχίες των ρουλεμάν.....	60
4.7	Διάρκεια ζωής εδράνων κύλισης.....	61
4.8	Τρόποι ελέγχου της κατάστασης των εδράνων κύλισης(ρουλεμάν).....	61
4.8.1	Μέτρηση των κρουστικών παλμών.....	62
4.8.1.α.	Ελάχιστη τιμή dBc και μέγιστη τιμή dBm.....	62
4.8.1.β.	Κωδικοί ένδειξης κατάστασης ρουλεμάν.....	63
4.8.2	Μέτρηση του επιπέδου των δονήσεων-κραδασμών.....	66
4.8.2.α	Εισαγωγή.....	66
4.8.2.β.	Μέτρηση του επιπέδου των δονήσεων-κραδασμών (τιμές overall).....	67
4.8.2.γ.	Αξιολόγηση εξέλιξης τιμών (trend).....	69
4.8.3	Διάγνωση με την χρήση της ανάλυσης κατά συχνότητα.....	70
4.8.3.α.	Εισαγωγή.....	70
4.8.3.β.	Επεξεργασία χρονικού σήματος.....	70
4.8.4.	Διάγνωση με την χρήση της ανάλυσης κατά συχνότητα FFT (ανάλυση Spectrum).....	71
4.8.4.α.	Εισαγωγή.....	71
4.8.4.β.	Τυπικές συχνότητες βλαβών σε ρουλεμάν.....	72
4.8.4.γ.	Προσδιορισμός των τυπικών συχνοτήτων βλαβών των ρουλεμάν.....	73
4.8.4.δ.	Μεταβολή της συχνότητας των δονήσεων των ρουλεμάν συναρτήσει της εξέλιξης της φθοράς.....	74
4.8.5	Διάγνωση με την χρήση της ανάλυσης κατά συχνότητα στο πεδίου του χρόνου (ανάλυση Cepstrum).....	75
5.	Η χρήση της ακουστικής στην διάγνωση βλαβών.....	77
5.1	Εισαγωγή.....	77
5.2	Τί είναι Ήχος.....	77
5.4	Ηχητική πίεση.....	78
5.5	Μονάδα μέτρησης της ηχητικής πίεσης.....	78
5.6	Τύποι μικροφώνων.....	78

5.7	Χαρακτηριστικά μέτρησης ήχων και θορύβων από μηχανές (overall).....	80
5.8	Χαρακτηριστικά της ανάλυσης της συχνότητας ήχων που προέρχονται από ταλαντώσεις(ανάλυση FFT).....	81
5.9	Μετρήσεις σε μηχανές με στηθοσκόπιο.....	82

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

1.	Τα όργανα μετρήσεων.....	84
1.1.	Bearing Checker.....	84
1.2	Vibrotest 60.....	90
1.3	OneproD MV2.....	92
2	Τα τμήματα στα οποία έγινε έλεγχος.....	94
2.1	Άξονας μετάδοσης της κίνησης (PTO).....	94
2.2	Ακροφύσια εκτόξευσης πετρελαίου (μπεκ).....	99
2.2.1.	Ο κινητήρας ντίζελ.....	99
2.2.2	Τύποι κινητήρων ντίζελ.....	100
2.2.1.	Ο ρόλος των ακροφυσίων εκτόξευσης πετρελαίου (μπεκ).....	101
2.2.3	Ανάλυση μηχανικών εγχυτήρων.....	102
2.2.4	Ανάλυση εγχυτήρων που είναι ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι.....	104
3	Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γεωργικών ελκυστήρων που χρησιμοποιήθηκαν.....	107
4.	Τρόπος διεξαγωγής των μετρήσεων.....	112
4.1	Μετρήσεις του άξονα μετάδοσης της κίνησης (PTO).....	112
4.2	Μετρήσεις των ακροφυσίων εκτόξευσης πετρελαίου (μπέκ).....	114

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

1.1	Μετρήσεις του ρουλεμάν του άξονα μετάδοσης της κίνησης (PTO).....	116
1.1.1	Μετρήσεις εξοικείωσης με τα όργανα μετρήσεων.....	116
1.1.2	Μετρήσεις σε καινούργιους γεωργικούς ελκυστήρες.....	116
1.1.2.α	New Holland T4050.....	117
1.1.2.β.	McCormick GM50.....	128
1.1.3	Μετρήσεις σε μεταχειρισμένους γεωργικούς ελκυστήρες.....	129
1.1.3.α	New Holland T4050.....	129
1.1.3.β	New Holland TN65N.....	138
1.1.3.γ	Massey Ferguson 178.....	146
1.1.3.δ	Zetor 7711.....	153
1.1.3.ε.	Zetor 6911.....	159

1.2	Καταγραφή του ήχου των ακροφύσιων εκτόξευσης πετρελαίου (μπέκ).....	165
1.2.1	Καταγραφή ήχου σε καινούργιους γεωργικούς ελκυστήρες.....	165
1.2.2	Καταγραφή ήχου σε μεταχειρισμένους γεωργικούς ελκυστήρες.....	166
1.2.2.α	New Holland T4050.....	166
1.2.2.β	New Holland TN65N.....	167
1.2.2.γ	Massey Ferguson 178.....	169
1.2.2.δ	Zetor 7711.....	170
1.2.2.ε	Zetor 6911.....	171

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπεράσματα.....	172
-------------------	-----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλιογραφία.....	174
-------------------	-----

1. Συντήρηση.

1.1 Ορισμός της συντήρησης.

Η συντήρηση είναι ένα σύνολο δραστηριοτήτων που έχουν ως στόχο τη διατήρηση μιας παραγωγικής μονάδας σε λειτουργία. Περιλαμβάνει δραστηριότητες όπως ο έλεγχος, οι δοκιμές, οι μετρήσεις, οι αντικαταστάσεις, οι ρυθμίσεις εξαρτημάτων, οι επισκευές και σε μερικές περιπτώσεις διοικητικές ενέργειες.

Η συντήρηση περιλαμβάνει το σύνολο των μέτρων για τη διατήρηση και την αποκατάσταση του τεχνικού εξοπλισμού ενός συστήματος στη κατάσταση που αρχικά είχε σχεδιαστεί να λειτουργεί, καθώς και τον προσδιορισμό και την αποτίμηση της πραγματικής κατάστασης αυτού (Καλαμποκά, 2007).

Με τον όρο συντήρηση εννοούμε:

- Τεχνικό και χρονικό σχεδιασμό εργασιών
- Διαχείριση υλικών και ανταλλακτικών
- Διαχείριση ανθρώπινου δυναμικού
- Διαχείριση εργαλείων και μέσων γενικότερα
- Προληπτικούς, προγνωστικούς και διαγνωστικούς ελέγχους
- Προληπτικές ενέργειες και αντικαταστάσεις
- Προγραμματισμό και εκτέλεση προγράμματος λίπανσης
- Επισκευές, βελτιώσεις, κατασκευές
- Γενικές ετήσιες συντηρήσεις.

1.2 Η σημασία της συντήρησης.

Όσο τεχνολογικά εξελιγμένα και να είναι τα μηχανήματα παραγωγής, είναι αδύνατο να λειτουργούν και να αποδίδουν, τουλάχιστον στο επίπεδο που είναι σχεδιασμένα να το κάνουν, χωρίς την απαραίτητη επίβλεψη και συντήρηση. Η συντήρηση σε ένα γεωργικό μηχάνημα έχει στόχο την αδιάκοπη λειτουργία του για την εκτέλεση όλων των εργασιών που έχει σχεδιαστεί να κάνει, 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 την πλευρά την ποιότητας εργασίας
- Πληροφορίες για παραπέρα βελτίωση του εξοπλισμού και της οργάνωσης. (Τσώλη, 2007)

1.3 Ο στόχος της συντήρησης.

Η συντήρηση δεν έχει στόχο μόνο τις επισκευές, αλλά αποτελεί έναν κρίσιμης σημασίας παράγοντα για την διατήρηση του γεωργικού εξοπλισμού σε καλή απόδοση για μεγάλο χρονικό διάστημα.

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

- Μειώνει το επενδύμενο κεφάλαιο
- Μειώνει την ποιοτική υποβάθμιση του εξοπλισμού
- Μειώνει τις βλάβες του εξοπλισμού
- Αυξάνει τη διάρκεια ζωής των μηχανών
- Αυξάνει την παραγωγικότητα του προσωπικού της συντήρησης
- Βελτιώνει τη συμμόρφωση σε νόμους και κανονισμούς
- Μειώνει περιττές επισκευές μηχανών
- Μειώνει την επανάληψη δραστηριοτήτων συντήρησης
- Μειώνει την απόρριψη (ελαττωματικών) προϊόντων
- Αυξάνει την αξιοπιστία
- Αυξάνει την ασφάλεια
- Μειώνει τους τραυματισμούς
- Μειώνει την κατανάλωση ενέργειας
- Μειώνει την ποσότητα των απαραίτητων διαθέσιμων ανταλλακτικών
- Μειώνει τα ελαττώματα σε καινούριες μηχανές
- Μειώνει τις λανθασμένες ενέργειες συντήρησης
(Τσώλη, 2007)

1.4. Η συντήρηση των γεωργικών ελκυστήρων.

Στα γεωργικά μηχανήματα εφαρμόζεται η περιοδική συντήρηση της μηχανής. Σε αυτή την μέθοδο η μηχανή ελέγχεται σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, για παράδειγμα κάθε 50 ώρες ή μία φορά το χρόνο, ασχέτως εάν δουλεύει καλά ή όχι.

Η χρονική περίοδος για την συντήρηση του γεωργικού μηχανήματος ορίζεται στατιστικά από τον κατασκευαστή ως ο χρόνος κατά τον οποίο το 2% των καινούργιων ή επισκευασμένων εξαρτημάτων αποτυγχάνει. Αυτό σημαίνει ότι το 98% δουλεύει καλά, συνεπώς η αντικατάσταση του εξαρτήματος δεν είναι σωστή αφού το εξάρτημα έχει ακόμα χρόνο ζωής με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος λειτουργίας.

Εκτός όμως από το κόστος της περιοδικής συντήρησης που περιλαμβάνει αλλαγή λαδιών, φίλτρων, καθάρισμα του φίλτρου αέρα, γρασάρισμα, πλύσιμο

κ.λπ. υπάρχει και το κόστος ορισμένων εξαρτημάτων τα οποία καταστρέφονται λόγω φθορών και πρέπει να αντικαθίστανται.

Τα έξοδα που συνδέονται με τις φροντίδες αυτές εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το χρόνο λειτουργίας του μηχανήματος. Παρ' όλα αυτά η συντήρηση εξαρτάται και από άλλους παράγοντες.

- Όσο καλύτερη είναι η κατάσταση του γεωργικού εξοπλισμού, τόσο μειώνονται τα έξοδα για την συντήρησή του. Όσο καλή και αν είναι η συντήρηση και η φροντίδα πάντα θα υφίσταται και θα απαιτείται αντικατάσταση των εξαρτημάτων. Καλή όμως φροντίδα και προσεκτική λειτουργία των μηχανημάτων μπορεί να επιβραδύνουν τη φθορά.
- Συντήρηση-επισκευές λόγω ατυχημάτων. Από τη φύση της εργασίας είναι πολύ πιθανόν να συμβούν κάποια ατυχήματα τα οποία απαιτούν αλλαγή των κατεστραμμένων εξαρτημάτων. Στην κατηγορία όμως αυτή ο παράγοντας "χειριστής" παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του ύψους των δαπανών. Ένας προσεκτικός χειριστής μειώνει τα ατυχήματα και τις δαπάνες μέχρι εξάλειψης.
- Συντήρηση-επισκευές λόγω ολιγωρίας του χειριστή. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται οι δαπάνες εκείνες που οφείλονται στην ολιγωρία τον χειριστή να ακολουθήσει τις οδηγίες του κατασκευαστή για τη συντήρηση των μηχανημάτων (ημερήσια, εβδομαδιαία, ετήσια κ.λπ.) ή αμελεί να επισκευάσει ή να ρυθμίσει κάποιο εξάρτημα με αποτέλεσμα καταστροφή του εξαρτήματος και μεγαλύτερη δαπάνη.
- Γενική επισκευή μηχανημάτων. Τα μηχανήματα με το χρόνο υφίστανται γενικότερη φθορά και απαιτείται αντικατάσταση τμημάτων, ώστε να διατηρούνται σε καλή κατάσταση. Συνήθως οι επισκευές (αυτού του τύπου γίνονται κατά τις νεκρές περιόδους (χειμώνα) και αντικαθίστανται τμήματα που έχουν υποστεί μεγάλη φθορά (συμπλέκτες, ιμάντες, αλυσίδες, άξονες, κ.λπ.). Οι προγραμματισμένες επισκευές μειώνουν τις δαπάνες και αυξάνουν την αξιοπιστία των μηχανημάτων.

Στην έννοια των δαπανών συντήρησης και επισκευών περιλαμβάνονται τόσο το κόστος των εξαρτημάτων όσο και της εργασίας. Η συντήρηση μπορεί να γίνει στο συνεργείο των παραγωγών ή και σε οργανωμένο συνεργείο επισκευών. Για τον υπολογισμό των δαπανών θα πρέπει ο παραγωγός να τηρεί ακριβές ημερολόγιο, που να περιλαμβάνει την αξία των ανταλλακτικών και των άλλων υλικών καθώς και τη διάρκεια της συντήρησης(Τσατσαρέλης, 1997).

(A= Ωρες εργασίας, B= Αριθμός διαδικασίας, Γ= Διαδικασίες σέρβις, Δ= Λειτουργικός έλεγχος, E= Συμπλήρωση στάθμης, ΣΤ= Καθαρισμός, Z= Λίπανση, H= Αντικατάσταση, Θ= Ρύθμιση, I= Σελίδα)

A	B	Γ	Δ	E	ΣΤ	Z	H	Θ	I
Περιστασιακό	1	Ρύθμιση του συμπλέκτη του κινητήρα					•		7
	2	Ρύθμιση των ιμάντων του ανεμιστήρα					•		8

σέρβις	3	Ρύθμιση των μάντων κίνησης					•		9
	4	Βαλβίδα εξαγωγής, ξηρό φίλτρο αέρα		•					9
Όταν ανάψει η προειδοποιητική λυχνία	5	Κύριο στοιχείο, ξηρό φίλτρο αέρα		•					10
	6	Δοχείο υγρού φρένων		•					11
	7	Φίλτρο διαχωρισμού νερού							11
Σέρβις ανά 10 ώρες	8/9	Κάρτερ λαδιού		•					12
	10	Μπαταρία		•					13/14
	11	Δοχείο υγρού υδροστατικού συστήματος διεύθυνσης		•					14
	12	Δοχείο διαστολής ψυκτικού υγρού		•					14
	13	Δοχείο πλαστικής συσκευής παρμπρίζ		•					15
	14	Φίλτρα αέρα καμπίνας			•				15
	15	Συμπυκνωτής			•				15
	16	Φίλτρο κλιματιστικού και αφύγρανσης	•						16
	17	Πίσω μειωτήρες				•			17
	18	Υδραυλικό				•			17
	19	Κοτσαδούρες				•			17
	20	Κύλινδροι διεύθυνσης, μοντέλα με τετρακίνηση				•			18
Σέρβις ανά 50 ώρες	21/22	Μπροστινοί πείροι περιστροφής, μοντέλα με τετρακίνηση				•			18
	23	Κύλινδρος διεύθυνσης, μοντέλα με κίνηση σε 2 τροχούς				•			19
	24	Κύλινδρος διεύθυνσης και ράβδος στη δεξιά πλευρά, μοντέλα με κίνηση σε 2 τροχούς				•			19
	25	Ακραξόνια, μοντέλα με κίνηση σε 2 τροχούς				•			19
	26	Άρθρωση μπροστινού άξονα, μοντέλα με κίνηση σε 2 τροχούς				•			20
	27	Οριζόντια, τηλεσκοπικά μπράτσα				•			20
	28	Φίλτρο πετρελαίου			•				20
	29	Αλλαγή λαδιού, κάρτερ κινητήρα (μοντέλα με 4 κυλίνδρους)					•		21
	30	Αλλαγή λαδιού, κάρτερ κινητήρα (μοντέλα με 3 κυλίνδρους)					•		21
	31	Φίλτρο πετρελαίου					•		21
	32	Φίλτρο αντλίας πετρελαίου			•				22
	33	Φίλτρο λαδιού υδραυλικού					•		22
	34	Φίλτρο λαδιού, υδροστατικό σύστημα διεύθυνσης και βοηθητικών εργασιών					•		22

	35	Φίλτρο λαδιού κινητήρα							•	23
Σέρβις ανά	36	Φίλτρο λαδιού υδροστατικού συστήματος διεύθυνσης (ξεχωριστό δοχείο)			•					23
300 ώρες	37	Ξηρό φίλτρο αέρα (εξωτερικό στοιχείο)			•					23
	38	Πίσω σασμάν και υδραυλικό	•	•						24
	39	Περίβλημα μπροστινού άξονα	•	•						24
	40	Χειρόφρενο σασμάν	•					•		24
	41	Μειωτήρες μπροστινού άξονα	•	•						25
	42	Μπροστινοί τροχοί, μοντέλα με κίνηση σε 2 τροχούς					•			25
	43	Ακραξόνια, μοντέλα με τετρακίνηση					•			25
Σέρβις ανά 900 ώρες	44	Βαλβίδες κινητήρα	•					•		26
	45	Φίλτρο αέρα καμπίνας							•	26
Σέρβις ανά 1200 ώρες ή κάθε χρόνο	46	Ξηρό φίλτρο αέρα (στοιχεία: εσωτερικό και εξωτερικό)							•	26
	47	Ρεζερβουάρ πετρελαίου			•					27
	48	Λάδι υδροστατικού συστήματος διεύθυνσης							•	27
	49	Μπέκ	•					•		28
Σέρβις ανά	50	Λάδι περιβλήματος μπροστινού άξονα, μοντέλα με τετρακίνηση							•	28
1200 ώρες ή κάθε 2 χρόνια	51	Λάδι περιβλήματος μπροστινού άξονα, μοντέλα με τετρακίνηση							•	28
	52	Σύστημα ψύξης κινητήρα	•		•					29
	53	Λάδι πίσω σασμάν και υδραυλικού							•	31
Γενικό Σέρβις	Εξαέρωση του συστήματος πετρελαίου									27
	Εξαέρωση του συστήματος φρένων									28
	Ηλεκτρικό σύστημα									28
	Συντήρηση αμαξώματος									29
	Αποθήκευση του τρακτέρ									31

Πίνακας 1: Διαδικασίες σέρβις για έναν γεωργικό ελκυστήρα.

Οι επισκευές αυτές γίνονται όσο περνά ο χρόνος περισσότερες. Εκτός από τις επισκευές αυτές, απαιτούνται επίσης, όπως αναφέρθηκε πριν, επισκευές και αντικαταστάσεις τμημάτων λόγω κακού χειρισμού ή ατυχημάτων, που επιβαρύνουν το κόστος λειτουργίας του μηχανήματος. Η καλή διαχείριση του ελκυστήρα και των άλλων γεωργικών μηχανημάτων απαιτείται για να διατηρούνται οι δαπάνες αυτές κατά το δυνατό χαμηλές. Η συχνή συντήρηση συντελεί προς το σκοπό αυτό. Το συνολικό κόστος επισκευών και συντηρήσεων μπορεί να δοθεί από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Συνολικό κόστος} = Q_0 k x^m$$

όπου :

- Q_0 = η τιμή αγοράς
- x = η συνολική (μέχρι το έτος υπολογισμού) χρήση του ελκυστήρα σε χιλιάδες ώρες (h/1000)
- k και m = τιμές του πίνακα 2

Μηχάνημα	Οικον. ζωή (h)	Κόστος επισκευών-συντήρησης ολόκληρης οικ. ζωής (% της Q_0)	k	m	Κόστος ΕΣ ανά 100 ώρες (% Q_0)
Ελκυστήρες με 2κινητ. τροχούς	12.000	100	0.007	2.0	0.83
Ελκυστήρες με 4κινητ.τροχοῦς και ερπυστριοφόροι	16.000	80	0.003	2.0	0,50
Άροτρα	2.000	100	0.29	1.8	5,00
Δισκοφόρα άροτρα	2.000	60	0.18	1.7	3,00
Δισκοσβάρνες	2.000	60	0.18	1.7	3,00
Οδοντωτές σβάρνες	2.000	70	0.27	1.4	3.50
Καλλιεργητές	2.000	70	0.27	1.4	3,50
Σκαλιστήρια	2.000	80	0.17	2.2	4,00
Φρέζες	1.500	80	0.36	2.0	5,33
Σπαστικές σιτηρών	1.500	75	0.32	2.1	5,00
Σπαρτικές γραμ καλλιεργειών	1.500	75	0.32	2,1	5,00
θεριζοαλωνιστικές	3.000	40	0.04	1.7	3,00
Συλλεκτικές βάμβακος	3.000	80	0,11	1.8	2.67
Τευλοεξαγωγείς	1.500	100	0.59	1.3	6.67
Συγκομιδής πατάτας	2.500	70	0.19	1.4	2,80
Δεματ. χόρτου μικρών δεμάτων	2.000	80	0.23	1.8	4,00
Δεματ. μεγάλων δεμάτων	3.000	75	0.10	1.8	2.50
Δεματ κυλινδρ. Δεμάτων	1.500	90	0.43	1.8	6,00
Λιπαματοδιανομείς	1.200	80	0.63	1.3	6.67
Ψεκαστήρες	1.500	70	0.41	1.3	4.67
Πλατφόρμες μεταφοράς	3.000	80	0.19	1.3	2.50

Πίνακας 2: Στοιχεία κόστους επισκευών-συντήρησης γεωργικών μηχανημάτων.

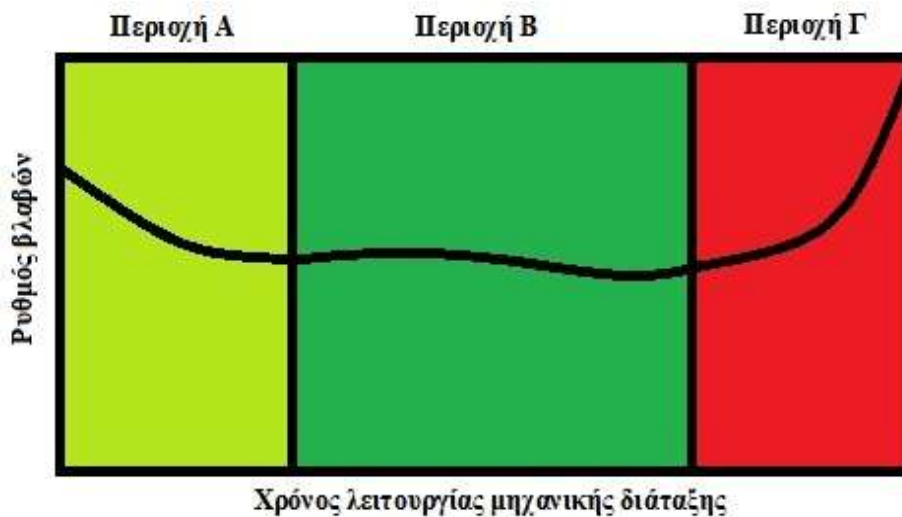
Για τον υπολογισμό του κόστους συντήρησης ενός δεδομένου χρόνου, υπολογίζεται το κόστος του συνόλου των ετών μέχρι και το συγκεκριμένο έτος και στη συνέχεια αφαιρείται το κόστος του συνόλου των ετών μέχρι το προηγούμενο του ζητούμενου(Τσατσαρέλης, 1997).

Σημειώνουμε ότι ο ρυθμός βλαβών σε όλες τις μηχανικές διατάξεις είναι συνάρτηση του συνολικού χρόνου λειτουργίας τους.

- Στην Α περιοχή , όταν δηλαδή οι μηχανικές διατάξεις είναι σχεδόν καινούριες, υπάρχει ένας μεγάλος ρυθμός βλαβών. Η περιοχή ονομάζεται περίοδος αρχικών

βλαβών και οφείλεται στην εμφάνιση κατασκευαστικών ατελειών, λαθών στη συναρμολόγηση, απορρυθμίσεις λόγω μεταφοράς τους κλπ.

- Η περιοχή Β έχει σταθερό αριθμό τυχαίων βλαβών και αποτελεί τη συνηθισμένη κατάσταση "στρωμένων" μηχανικών διατάξεων.
- Στην περιοχή Γ έχουμε αύξηση του ρυθμού των βλαβών γιατί όσο μεγαλώνει η ηλικία των μηχανημάτων, τόσο αυξάνουν οι φθορές τους με τελικό αποτέλεσμα την αχρήστευση της μηχανής.



Εικόνα 1: Ρυθμός εμφάνισης βλαβών(Bechara, 2008)

Εάν η δαπάνη της συντήρησης και των επισκευών είναι μεγαλύτερη από την ετήσια απόσβεση επιβάλλεται η αντικατάσταση του ελκυστήρα από άλλον καινούργιο.

Για μηχανές που χρησιμοποιούνται πέραν της οικονομικής ζωής, οι αθροιστικές δαπάνες μπορεί να θεωρηθεί ότι αυξάνονται με ένα σταθερό ποσοστό. Το ποσοστό αυτό (€/h) υπολογίζεται από το συνολικό αθροιστικό κόστος με διαίρεση με τη διάρκεια της οικονομικής ζωής.

2. Αστοχία -αξιοπιστία μηχανικών συστημάτων.

2.1 Ορισμός αξιοπιστίας.

Η αξιοπιστία είναι η πιθανότητα ένα τεχνολογικό σύστημα να λειτουργεί όπως προβλέπεται, δηλαδή σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, για κάποιο χρονικό διάστημα t στο μέλλον. Η αξιοπιστία προβλέπει μαθηματικά την συμπεριφορά του συστήματος υπό αναμενόμενες επιχειρησιακές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, εκφράζει αριθμητικά την πιθανότητα το σύστημα να λειτουργήσει χωρίς αστοχία για δεδομένο χρονικό διάστημα σε ένα περιβάλλον για το οποίο έχει σχεδιασθεί. Υπενθυμίζουμε ότι σε κάθε χρονική στιγμή το μηχάνημα χαρακτηρίζεται από την λειτουργική του κατάσταση· είτε, δηλαδή, είναι σε κατάσταση λειτουργήσιμη είτε μη λειτουργήσιμη.

Η θεωρία των πιθανοτήτων και οι εφαρμογές της παίζουν θεμελιώδη ρόλο στον ορισμό της έννοιας της αξιοπιστίας και την ανάλυση αυτής. Συγκεκριμένα, δεν είναι δυνατή ούτε η κατανόηση της έννοιας της αξιοπιστίας ούτε η διενέργεια του οποιουδήποτε υπολογισμού των παραμέτρων αυτής χωρίς μια θεμελιωμένη αντίληψη και πρακτική ευχέρεια στα βασικά στοιχεία της θεωρίας των πιθανοτήτων.

Η αξιοπιστία ενός συστήματος, π.χ. ενός μηχανήματος, ορίζεται μέσω των παρακάτω πιθανοτήτων:

$R(t)$: Η πιθανότητα το θεωρούμενο μηχάνημα να βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργήσιμη την χρονική στιγμή t .

$F(t)$: Η πιθανότητα το θεωρούμενο μηχάνημα να βρίσκεται σε κατάσταση μη λειτουργήσιμη την χρονική στιγμή t .

Είναι προφανές ότι το άθροισμα των δύο παραπάνω πιθανοτήτων ισούται με μονάδα, από όπου προκύπτει ότι

$$R(t) = 1 - F(t)$$

Η σχέση αυτή είναι μια θεμελιακή σχέση που οδηγεί στον υπολογισμό της αξιοπιστίας, $R(t)$, είτε άμεσα είτε έμμεσα, υπολογίζοντας πρώτα την αναξιοπιστία, $F(t)$, κάτι που καμιά φορά είναι πιο εύκολο να υπολογιστεί. Για παράδειγμα, η αναξιοπιστία $F(t)$ έχει συχνά χρησιμοποιηθεί για την πρόγνωση αποθεμάτων ανταλλακτικών. Στο σημείο αυτό είναι αναγκαίο να προβούμε στις παρακάτω διευκρινιστικές παρατηρήσεις :

Οι χαρακτηρισμοί λειτουργήσιμη και μη λειτουργήσιμη, αφορούν στην ικανότητα (δυνατότητα) του μηχανήματος να λειτουργήσει σύμφωνα με τις προδιαγραφές του. Δεν υποδηλώνουν αν το μηχάνημα λειτουργεί ή όχι. Ένα μηχάνημα μπορεί να μην λειτουργεί και να είναι σε λειτουργήσιμη κατάσταση. Ας υιοθετήσουμε την σύμβαση ότι ο όρος σε λειτουργία ή εκτός λειτουργίας υπάγεται στην βούληση του χρήστη ενώ ο όρος λειτουργήσιμη ή μη λειτουργήσιμη

χαρακτηρίζει πιθανολογικά την κατάσταση του μηχανήματος, δηλαδή την ικανότητά του προς λειτουργία.

Η συνάρτηση $R(t)$ είναι συνάρτηση του χρόνου λειτουργίας του μηχανήματος ή και του ημερολογιακού χρόνου με αφετηρία κάποια δεδομένη χρονική στιγμή. Μπορεί επίσης να είναι συνάρτηση και άλλων ισοδύναμων μεγεθών, όπως κύκλοι λειτουργίας π.χ. διανυθέντα χιλιόμετρα, ώρες λειτουργίας.

Οι συναρτησιακές μορφές της $R(t)$ ανήκουν συνήθως σε όλο το φάσμα της οικογένειας Weibull και των μερικών περιπτώσεών της όπως π.χ. η εκθετική και η κανονική κατανομή. Η συνάρτηση Weibull είναι η εμπειρική συνάρτηση πυκνότητας πιθανοτήτων (ΣΠΠ ή PDF) που προτάθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '40 μετά από παρατηρήσεις αστοχιών σε αεροπορικές κατασκευές, κυρίως ατράκτους αεροσκαφών. Από πολύ νωρίς διαπιστώθηκε ότι έχει ισχύ και σε άλλες κατασκευές όχι απαραίτητα αεροπορικών κατασκευών. Τέτοιες ήταν π.χ. οι ηλεκτρονικές λυχνίες της τεχνολογίας της εποχής. Σημειωτέον ότι η ηλεκτρονική λυχνία εκείνης της εποχής (διαρκούντος του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου) έδωσε έναυσμα σε πολλές παρατηρήσεις αστοχιών που η μελέτη τους συνετέλεσε στην θεμελίωση της θεωρίας της Αξιοπιστίας. Η συνάρτηση Weibull είναι μια ευέλικτη και εύπλαστη τριπαραμετρική ΣΠΠ η οποία με την βοήθεια των παραμέτρων σχήματος (α), κλίμακας (β) και θέσης (γ) μπορεί να απεικονίσει ένα ευρύ φάσμα πληροφοριακών στοιχείων του κύκλου ζωής ενός τεχνολογικού συστήματος. Για τον λόγο αυτό και επειδή είναι προσιτή σε αναλυτική επεξεργασία, η εφαρμογή της στην ανάλυση αξιοπιστίας είναι συνηθέστατη. Με κατάλληλα επιλεγμένες τιμές των παραμέτρων της έχει τη δυνατότητα να απεικονίσει πληθώρα εμπειρικών στοιχείων από παρατήρηση αστοχιών. Επιπλέον η δυνατότητά της να εμπεριέχει μαθηματικά θεμελιωμένες ΣΠΠ (π.χ. για $\beta = 1$ ισοδυναμεί προς την εκθετική, ενώ για $\beta > 3$ είναι κάπως συμμετρική και προσεγγίζει πολύ στην κανονική κατανομή, κλπ) την καθιστά πολύτιμο εργαλείο στην ανάλυση αξιοπιστίας. Μια άλλη χρήσιμη, αν και όχι τόσο διαδεδομένης χρήσης, συνάρτηση πυκνότητας πιθανοτήτων είναι η Γάμα. Τριπαραμετρική και αυτή, «μιμείται» την Weibull ή την Λογαριθμική-Κανονική και αυτό την καθιστά εξ' ίσου «βολική» και χρήσιμη στην μοντελοποίηση στοιχείων από πρακτικές παρατηρήσεις (Τσαρούχας και Ναζλής και Λυμπερόπουλος).

2.2 Αστοχία συντήρησης.

Η περιοδική συντήρηση έχει ως σκοπό η μηχανή να συντηρηθεί πριν εμφανίσει κάποια αστοχία. Όλο το πρόγραμμα της συντήρησης στηρίζεται στον υπολογισμό του στατιστικού μέσου χρόνου αστοχίας και του μέσου χρόνου επισκευών ώστε να δημιουργηθεί το πρόγραμμα συντήρησης.

Ο υπολογισμός του μέσου χρόνου αστοχίας προϋποθέτει ότι έχουμε μια καινούργια μηχανή η οποία φυσιολογικά θα φθαρεί βαθμιαία. Οι μηχανές, όμως, σήμερα δεν ακολουθούν ένα μέσο όρο στη λειτουργία τους. Αποτέλεσμα αυτής της πραγματικότητας είναι το ότι:

- Είτε γίνονται διάφορες επισκευές χωρίς να απαιτούνται.
- Είτε η μηχανή αστοχεί πριν προλάβουν να γίνουν οι διάφορες αναγκαίες επισκευές.

Και οι δύο από αυτές τις περιπτώσεις είναι αστοχίες συντήρησης που ανεβάζουν δραματικά το κόστος της συντήρησης μηχανών.

Με την περιοδική συντήρηση, θεωρείται ότι ο ρυθμός αστοχίας(το ποσοστό των μηχανών που αστοχούν στη μονάδα του χρόνου)από μια υψηλή τιμή θα πάρει μια τιμή αρκετά χαμηλότερη μετά από την συντήρηση.

Παρ' όλα αυτά, η πρακτική απέχει αρκετά από τις θεωρητικές καμπύλες. Μια έρευνα που έγινε σε αεροπορικές εταιρίες και κάλυπτε 235 συστήματα που αποτελούνταν από μηχανολογικές μονάδες, όπως αντλίες, μοτέρ και άλλα εξαρτήματα, έδειξε τελείως αντίθετα αποτελέσματα.

Για το 66% των εξαρτημάτων ο ρυθμός αστοχίας ήταν πολύ υψηλός για εξαρτήματα που είχαν υποστεί πρόσφατα συντήρηση. Στη συνέχεια ο ρυθμός έπεφτε σταθερά για να σταθεροποιηθεί τελικά σε μια συγκεκριμένη τιμή. Αυτό σημαίνει ότι κάθε φορά που η μηχανή συντηρείτο, η αξιοπιστία της μειωνόταν προσωρινά εξαιτίας της ανθρώπινης επίδρασης.

Για το 15% των εξαρτημάτων ο ρυθμός αστοχίας ήταν σταθερός. Αυτό σημαίνει ότι στα εξαρτήματα αυτά δεν σημειώθηκε καμιά μείωση στο ρυθμό αστοχίας εξαιτίας της συντήρησης.

Για το 11% των εξαρτημάτων ο ρυθμός αστοχίας ήταν χαμηλότερος μετά την συντήρηση, αλλά στη συνέχεια αυξάνονταν πολύ γρήγορα

Γι' αυτό το λόγο η συντήρηση των μηχανικών συστημάτων είναι πολύ πολύπλοκη διαδικασία που πρέπει να γίνεται την κατάλληλη στιγμή. Ο καλύτερος τρόπος υπολογισμού αυτής της στιγμής είναι μόνο μέσω των συγχρόνων συστημάτων πρόγνωσης βλαβών. Τα συστήματα αυτά έχουν την δυνατότητα εκτός της πρόγνωσης των βλαβών να κάνουν και διάγνωση των βλαβών(Νάτσης, 2005).

2.3 Σχέση της αξιοπιστίας και του κόστους συντήρησης.

Μειωμένη αξιοπιστία σημαίνει αυξημένο κόστος συντήρησης. Για την αύξηση της αξιοπιστίας και ταυτόχρονα την μείωση του κόστους συντήρησης, απαιτητέ η χρήση νέων τεχνολογιών πρόγνωσης και διάγνωσης βλαβών στην συντήρηση των ελκυστήρων. Με την χρήση αυτών των τεχνολογιών καθορίζεται με ακρίβεια ο χρόνος που πρέπει να γίνεται η συντήρηση μειώνοντας έτσι την αστοχία συντήρησης.

3. Διάγνωση και πρόγνωση.

3.1 Ορισμοί.

Ο όρος διάγνωση σημαίνει ο προσδιορισμός της βλάβης από τα σήματα που λαμβάνονται από τα διαγνωστικά συστήματα ή από τα συμπτώματα που εμφανίζει το μηχανικό σύνολο.

Αντίθετα πρόγνωση είναι η πρόβλεψη της πορείας μια βλάβης, η οποία στηρίζεται στα παρατηρούμενα σήματα ή συμπτώματα.

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών σε μηχανές. Η μέθοδος που εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση επηρεάζεται από τον τύπο της μηχανής, το κόστος αγοράς του διαγνωστικού εξοπλισμού αλλά και το πόσο αξιόπιστη και αποδοτική είναι η μέθοδος διάγνωσης (Νάτσης, 2005).

3.2 Τεχνικές διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών.

- **Οπτικός έλεγχος**

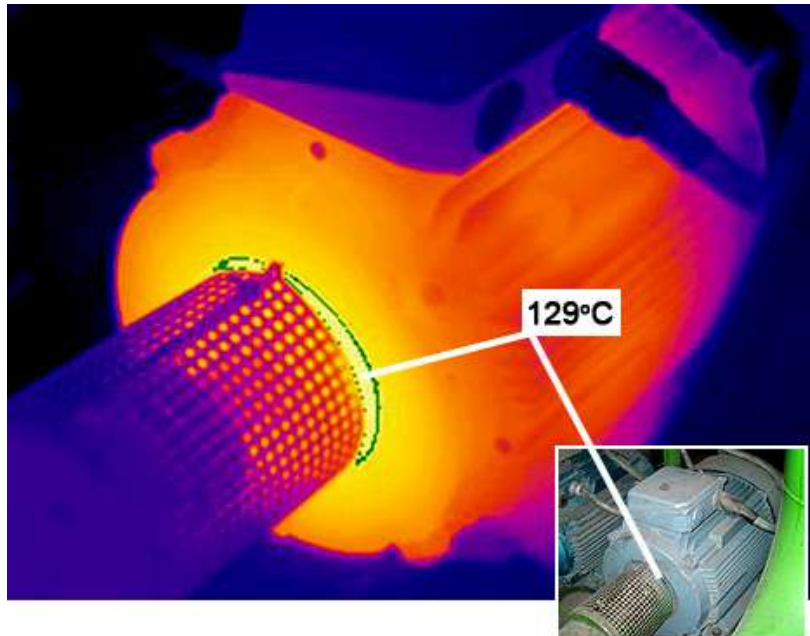
Οι οπτικοί έλεγχοι του εξοπλισμού είναι μια απλή μέθοδος για τον προσδιορισμό της λειτουργικής κατάστασής του. Εξάλλου, τέτοιου είδους έλεγχοι πραγματοποιούνται εύκολα παράλληλα με άλλες διαδικασίες συντήρησης. Μέχρι και σήμερα όμως ο τακτικός οπτικός έλεγχος των μηχανών και όλων των συστημάτων γενικότερα αποτελεί ένα βασικό στοιχείο της διάγνωσης που μπορεί να εντοπίσει πιθανά προβλήματα τα οποία ίσως δεν θα εντοπιζόντουσαν με την εφαρμογή των άλλων τεχνικών μόνο. Άρα, το επιπλέον κόστος των οπτικών ελέγχων είναι συχνά αμελητέο.

- **Θερμογραφία**

Η θερμογραφία είναι μία μέθοδος με την οποία μετράμε τη θερμοκρασία των επιφανειών μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας. Με την μέθοδο αυτή προσδιορίζουμε και ερμηνεύουμε τις θερμοκρασιακές διαφορές που εμφανίζονται στον εξοπλισμό και εξάγουμε συμπεράσματα ως προς την κατάσταση στην οποία βρίσκεται (www.traininmain.eu).

Η θερμογραφία βασίζεται στην αρχή ότι κάθε επιφάνεια εκπέμπει ενέργεια με την μορφή της θερμοκρασιακής ακτινοβολίας. Το μήκος κύματος που εκπέμπεται εξαρτάται από την θερμοκρασία. Η ακτινοβολία ανιχνεύεται με κατάλληλες υπέρυθρες κάμερες (θερμοκάμερες) οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας το οποίο με κατάλληλη βαθμονόμηση εκφράζεται σε θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα, οι υπέρυθρες κάμερες εμφανίζουν τις απόλυτες θερμοκρασιακές διαφορές με ασπρόμαυρες ή έγχρωμες διακυμάνσεις. Πάντα όμως λαμβάνουμε υπόψη το υλικό από το οποίο

αποτελείται το σώμα, την κατάσταση της επιφάνειας του σώματος και την κατάσταση της ατμόσφαιρας μεταξύ του σώματος και του οργάνου μέτρησης (επίπεδο υγρασίας), που αποτελούν σημαντικό παράγοντα για επίτευξη σωστής μέτρησης θερμοκρασίας. Εφόσον έχουν γίνει σωστά οι μετρήσεις, οποιαδήποτε ανωμαλία στη θερμική κατάσταση που παρατηρούμε εκλαμβάνεται ως ένδειξη πιθανών προβλημάτων του συστήματος (Κορωναίος και Σαργέντης, 2003).



Εικόνα 2: Θερμογραφία ηλεκτρικού κινητήρα.

• Ανάλυση λιπαντικού - Τριβολογία

Πολλές και διαφορετικές τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν για την ανάλυση της χημικής σύστασης του λιπαντικού.

Πιο συγκεκριμένα, η τριβολογία αναφέρεται στην τριβή που δημιουργείται κατά την λειτουργία περιστρεφόμενων τμημάτων των μηχανών καθώς και στον τρόπο λίπανσής τους ώστε να περιοριστούν οι φθορές λόγω τριβής. Η σιδηρογραφία και η ανίχνευση μαγνητικών θραυσμάτων εξετάζουν σιδηρούχα σωματίδια από φθορά που βρίσκονται στα λιπαντικά για να προσδιορίσουν το είδος και το μέγεθος της φθοράς, ενώ η φασματομετρική ανάλυση λιπαντικού ελέγχει την ύπαρξη και μετράει την ποσότητα μολυσματικών ουσιών στο λιπαντικό μέσω ατομικής εκπομπής ή φασματομέτρου απορρόφησης και προσδιορίζει μεταλλικά και μη μεταλλικά στοιχεία τα οποία μπορεί να σχετίζονται με την αρχική κατάσταση βλάβης διαφόρων εξαρτημάτων του εξοπλισμού. Η χρωματογραφία ελέγχει τις αλλαγές των ιδιοτήτων των λιπαντικών, όπως είναι το ιξώδες, το pH και το περιεχόμενο νερού μέσω επιλεγμένης απορρόφησης και ανάλυσης (www.traininmain.eu).

- **Υπέρηχοι**

Υπάρχουν πολλές τεχνικές ελέγχου με χρήση υπερήχων, αλλά όλες χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν σφάλματα ή ανωμαλίες σε συγκολλήσεις, επιστρώσεις, σωληνώσεις, αγωγούς, άξονες και ούτω καθ' εξής. Ρήγματα, κενά, συσσωρεύσεις ουσιών, διαβρώσεις και σκουριές ανακαλύπτονται με τη μετάδοση υπερηχητικών παλμών ή κυμάτων διαμέσου του υλικού και αποτιμώντας το εξερχόμενο σήμα προσδιορίζεται η θέση και η έκταση της ασυνέχειας του υλικού.

Κύρια περιοχή εφαρμογής της τεχνικής είναι ο εντοπισμός ρωγμών του στατικού εξοπλισμού. Οι υπέρηχοι που εντοπίζονται και μετρώνται είναι δυνατό να παρέχουν στον αναλυτή πληροφορίες για την τοποθεσία και τη σοβαρότητα της ρωγμής. Η εφαρμογή της όμως προϋποθέτει την εκ των προτέρων γνώση των πιθανών σημείων εμφάνισης ρωγμής, διαφορετικά η γενική χρήση της είναι εξαιρετικά δαπανηρή (www.traininmain.eu).



Εικόνα3: Συσκευή υπέρηχων.

Οι παραπάνω μέθοδοι με εξαίρεση τον οπτικό έλεγχο είναι μέθοδοι υψηλού κόστους που εφαρμόζονται στην βιομηχανία και η εφαρμογή τους στην γεωργική μηχανολογία δεν είναι συμφέρουσα.

Αντίθετα η **μέτρηση κρουστικών παλμών** και η **μέτρηση του επιπέδου των δονήσεων-κραδασμών** είναι νέες τεχνικές που εφαρμόζονται στην βιομηχανία αλλά μπορούν να εφαρμοστούν και στην γεωργική μηχανολογία.

- **Μέτρηση κρουστικών παλμών.**

Με αυτήν την μέθοδο διερευνάμε την ύπαρξη ή μη του λιπαντικού στρώματος και την κατάσταση των επιφανειών των σωμάτων κύλισης και των διαδρόμων κίνησης των ρουλεμάν καθώς και άλλες αιτίες δημιουργίας κρουστικών φορτίων στα ρουλεμάν. Βασικό πλεονέκτημα είναι η ταχύτητα των μετρήσεων και η ευκολία στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Στην μέθοδο αυτή δεν ενδιαφερόμαστε για τη δόνηση που προκαλείται από κάποιον κρουστικό παλμό αλλά για τον κρουστικό παλμό αυτόν καθ' αυτόν. Αρκούν μόνο δυο τιμές για την αξιολόγηση της κατάστασης ενός ρουλεμάν:

dBm: η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή για ένα μικρό αριθμό ισχυρών κρουστικών παλμών.

dBc: η οποία αντιστοιχεί στον βασικό παλμό για έναν μεγάλο αριθμό ασθενών κρουστικών παλμών.

Οι τιμές των dBm και dBc έχουν εύρος 60db σε κανονικοποιημένη κλίμακα. Η τιμή dBi είναι ο αρχικός θόρυβος που προκαλεί η περιστροφή του άξονα της μηχανής και του ρουλεμάν ταυτόχρονα. Για να μη λάβουμε υπ' όψη μας το θόρυβο αυτό εισάγουμε την έννοια του αρχικού θορύβου dBi ο οποίος θα αποτελέσει αφετηρία για τον έλεγχο του ρουλεμάν.

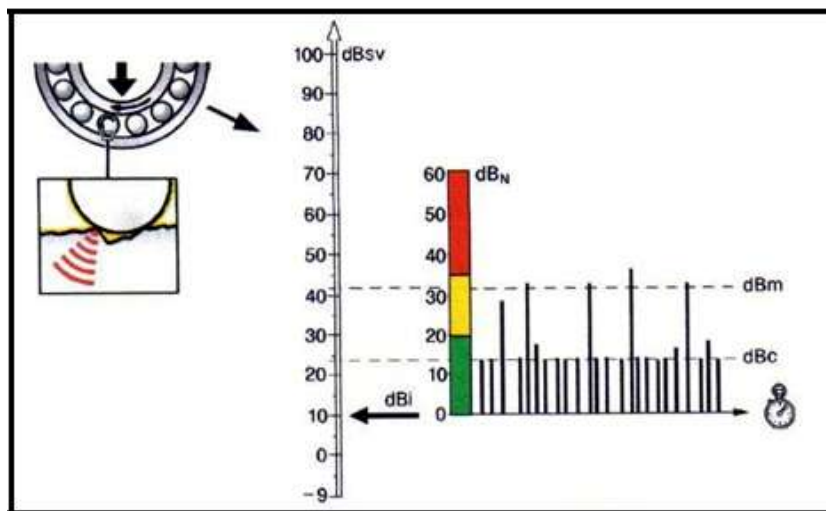
Ανάλογα με τις τιμές των dBm και dBc αξιολογείται η κατάσταση του ρουλεμάν:

-**Πράσινη περιοχή** για dBm μέχρι 20 φορές dBc, που αντιστοιχεί σε άριστο ρουλεμάν.

-**Κίτρινη περιοχή** για dBm από 21 μέχρι 34 φορές dBc, αμφίβολη κατάσταση.

-**Κόκκινη περιοχή** για dBm μεγαλύτερο από 34 φορές dBc, κακή κατάσταση.

Μεγάλες τιμές dBm και μικρή διαφορά dBm dBc είναι ένδειξη φτωχής λίπανσης αφού η διαφορά dBm dBc παρέχει πληροφορία για τη λίπανση των ρουλεμάν (bearing checker manual).



Εικόνα 4: Οι τιμές των dBm και dBc σε κανονικοποιημένη κλίμακα.

• Μέτρηση του επιπέδου των δονήσεων.

Για την διάγνωση και πρόγνωση βλαβών σε μηχανές γίνεται μελέτη πολλών μεταβλητών όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η πίεση λαδιού, ο θόρυβος, οι ταλαντώσεις και οι δονήσεις, οι ηλεκτρικές τάσεις, η σύσταση καυσαερίων κλπ. Όμως η πιο αξιόπιστη μέθοδος είναι αυτή της ανάλυσης του ήχου και της ανάλυσης των δονήσεων. Τώρα, από την ανάλυση του ήχου και την ανάλυση των

δονήσεων, αν και έχουν την ίδια πηγή, η πιο αξιόπιστη είναι η ανάλυση των δονήσεων γιατί δεν επηρεάζεται από τον εξωτερικό θόρυβο. Έτσι πιο σημαντική εργασία για την προληπτική διάγνωση βλαβών σε μηχανές είναι η μέτρηση, η ανάλυση και η αξιολόγηση των μετρήσεων των μηχανικών δονήσεων.

Στις μηχανές παράγονται δονήσεις που οφείλονται στις περιστροφικές ή στις παλινδρομικές κινήσεις. Οι δονήσεις αυτές ονομάζονται μηχανικές. Για παράδειγμα, μια κακή ζυγοστάθμιση σε μια μηχανή οδηγεί στην δημιουργία φυγοκεντρικών δυνάμεων με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δυνάμεις στους άξονες, όπως μαγνητικές και υδραυλικές, και έτσι να έχουμε την ανάπτυξη δονήσεων σε αυτούς. Οι δονήσεις αυτές μεταφέρονται στα έδρανα κύλισης (ρουλεμάν) και στις βάσεις τους. Επίσης, μεταφέρονται από τα λιπαντικά των εδράνων ολίσθησης (κουζινέτων) και στις φωλιές των κουζινέτων. Όλες αυτές οι δυνάμεις και οι ταλαντώσεις μεταφέρονται και στις βάσεις των μηχανών και στο εξωτερικό κέλυφος αυτών. Οι δονήσεις που μεταδίδονται εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους. Οι πιο σημαντικές είναι η κατάσταση των λιπαντικών, τα έδρανα και οι βάσεις τους, η μάζα του άξονος.

Οι μηχανικές δονήσεις που μεταφέρονται στο εξωτερικό κέλυφος των μηχανών και στα εξωτερικά μέρη αυτών μετρώνται με επιταχυνσιόμετρα **accelerometers**, με ανιχνευτές ταχύτητας **velocity transducers** ή με ανιχνευτές μετατόπισης **displacement transducers**. Οι ανιχνευτές αυτοί συνδέονται με φορητά όργανα μέτρησης, που ονομάζονται συνήθως όργανα μέτρησης δονήσεων **Vibration Meters**. Οι μηχανικές δονήσεις που υπάρχουν στα εξωτερικά μέρη των μηχανών δημιουργούν και ακουστικό θόρυβο γύρω από τις μηχανές. Η στάθμη του ακουστικού θορύβου είναι ανάλογος της στάθμης των μηχανικών δονήσεων και μετράται σε dB με μετρητές θορύβου. Πολλά όργανα μέτρησης δονήσεων μετρούν επίσης και την στάθμη θορύβου σε dB (Κανδύλης, 2004 β).

Μία ιδανική μηχανή δεν ταλαντεύεται καθόλου εφ' όσον οι ενέργεια των ταλαντώσεων είναι εις βάρος της ισχύος της μηχανής. Καλός σχεδιασμός μηχανής σημαίνει χαμηλή στάθμη των ταλαντώσεων. Κατά την πάροδο του χρόνου η δυναμική συμπεριφορά της μηχανής αλλάζει με συνέπεια την αύξηση της στάθμης των μηχανικών δονήσεων.

Έτσι για να ελέγξουμε σε πια κατάσταση είναι η μηχανή και αν υπάρχει κάποια βλάβη, για να δούμε πότε θα χρειαστεί αντικατάσταση ένα φθαρμένο εξάρτημα, καθώς επίσης να δούμε αν υπάρχει κακή ζυγοστάθμιση και ευθυγράμμιση των αξόνων, η πιο αποτελεσματική και αξιόπιστη μέθοδος είναι η μέτρηση δονήσεων. Έτσι, η μέτρηση των μηχανικών δονήσεων μας πληροφορεί σε τί κατάσταση βρίσκονται τα μέρη των μηχανών, μας βοηθάει να προβλέψουμε πως εξελίσσονταν οι βλάβες και καθορίζει τον χρόνο που πρέπει να αντικαταστήσουμε φθαρμένα εξαρτήματα με ιδιαίτερα μεγάλη ακρίβεια.

Η διάρκεια ζωής ενός εξαρτήματος μπορεί να προβλεφθεί από το επίπεδο των δονήσεων. Αυτό γίνεται τακτικά στα προγράμματα της προβλεπτικής συντήρησης χρησιμοποιώντας δεδομένα δονήσεων. Το επίπεδο των δονήσεων εξαρτάται από τη συνολική ενέργεια εισόδου της μηχανής. Μέρος της

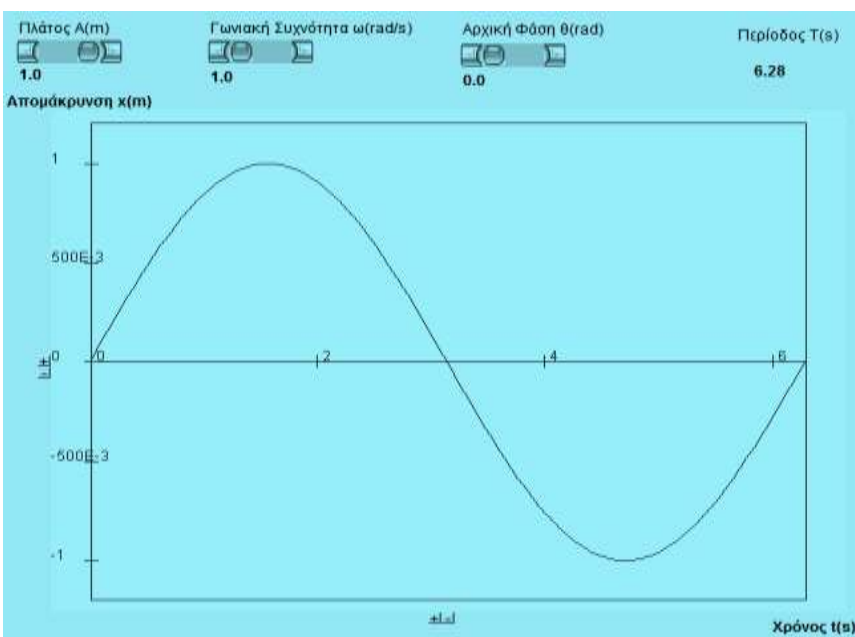
εισερχόμενης ενέργειας μετατρέπεται σε δονήσεις και θόρυβο. Αυτό συμβαίνει λόγω των επιφανειών τριβής των στοιχείων μηχανής, όπως τα έδρανα, οι οδοντωτοί τροχοί, οι σύνδεσμοι και άλλα. Μια μεγάλη μηχανή με μεγάλη ενέργεια εισόδου θα έχει μεγαλύτερο επίπεδο δονήσεων από μία μικρότερη. Υπάρχουν διεθνή πρότυπα που τυποποιούν το επίπεδο των δονήσεων σε σχέση με το μέγεθος της μηχανής, καθώς είναι αδύνατο να πετύχουμε πολύ χαμηλά επίπεδα δόνησης από μία μεγάλη μηχανή.

3.3 Ταλαντώσεις

3.3.1 Περιοδικές ταλαντώσεις.

Στη Φυσική με τον όρο ταλάντωση χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε παλινδρομική περιοδική μεταβολή οποιουδήποτε φυσικού μεγέθους γύρω από μία κεντρική τιμή. Με άλλα λόγια ταλάντωση είναι η αρμονική μεταβολή μεγέθους γύρω από μία τιμή και η οποία επαναλαμβάνεται. Οι ταλαντώσεις που εμφανίζονται στα διάφορα τμήματα των μηχανών μπορεί να είναι περιοδικές, απεριοδικές ή τυχαίες.

Οι περιοδικές ταλαντώσεις επαναλαμβάνονται συνεχώς συναρτήσει του χρόνου. Η βασική μορφή της περιοδικής ταλάντωσης είναι η αρμονική. Καλείται



επίσης ημιτονική ταλάντωση και έχει συγκεκριμένη συχνότητα. Μπορεί να δημιουργηθεί για παράδειγμα από κακή ζυγοστάθμιση ενός άξονα.

Εικόνα 5: Αρμονική ταλάντωση

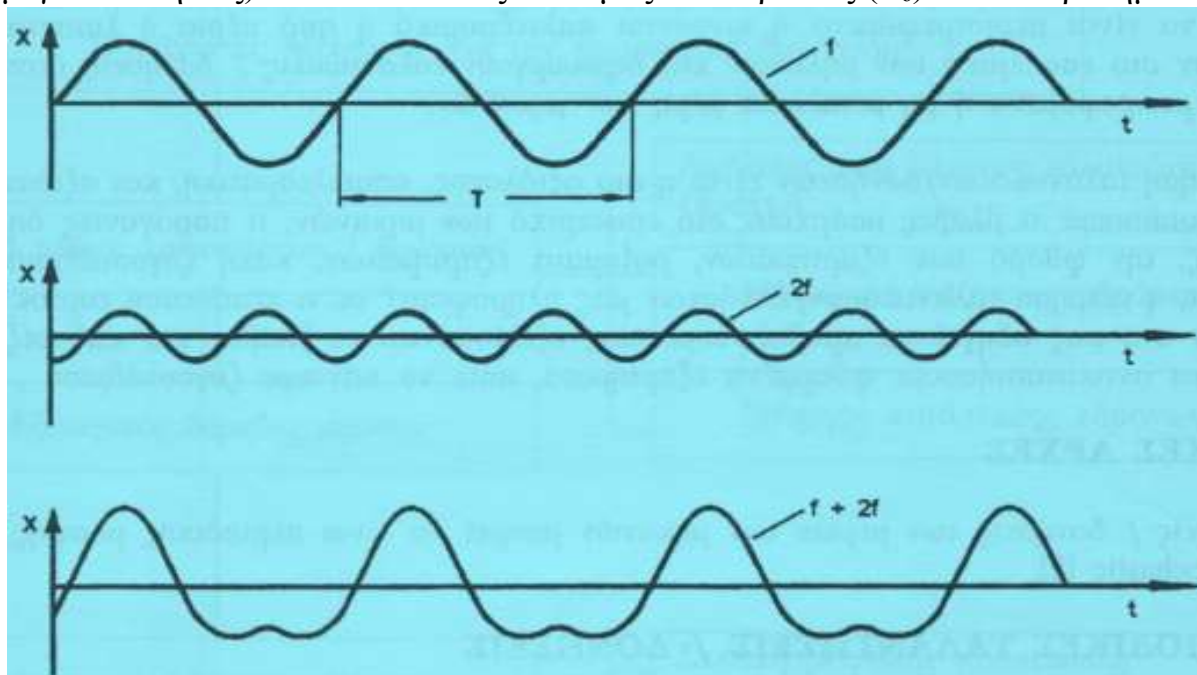
3.3.2 Σύνθετες ταλαντώσεις

Εάν σε μία μηχανή συνυπάρχουν δυο ή περισσότερες αρμονικές ταλαντώσεις διαφορετικής συχνότητας, όπως για παράδειγμα σε ένα κιβώτιο γραναζιών, προστίθενται με αποτέλεσμα να έχουμε ένα άθροισμα ταλαντώσεων.

Το αποτέλεσμα της σύνθεσης δύο αρμονικών ταλαντώσεων εξαρτάται από τα πλάτη, τις γωνιακές συχνότητες και τις αρχικές φάσεις των αρχικών ταλαντώσεων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι περιπτώσεις όπου οι αρχικές ταλαντώσεις έχουν την ίδια γωνιακή συχνότητα. Το αποτέλεσμα της σύνθεσης των δύο ταλαντώσεων είναι και πάλι αρμονική ταλάντωση. Όταν οι αρχικές ταλαντώσεις έχουν το ίδιο πλάτος και οι γωνιακές συχνότητες διαφέρουν λίγο τότε το αποτέλεσμα της σύνθεσης των δύο ταλαντώσεων είναι το διακρότημα.

Οι εναλλαγές του πλάτους της σύνθετης ταλάντωσης ονομάζονται διακροτήματα (μία ταλάντωση της οποίας το πλάτος μεταβάλλεται περιοδικά με το χρόνο ονομάζεται διακρότημα).

Ο χρόνος ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς μηδενισμούς (ή δύο διαδοχικές μεγιστοποιήσεις) του πλάτους ονομάζεται περίοδος (T_{δ}) του διακροτήματος.



Εικόνα 6: Σύνθετη ταλάντωση

3.3.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη ταλαντώσεων.

Από τις ταλαντώσεις τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν περισσότερο είναι η περίοδος, η συχνότητα και το πλάτος της ταλάντωσης και η γωνία φάσης.

• Περίοδος

Περίοδος ονομάζεται το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί μία επανάληψη του φαινομένου. Συμβολίζεται με T και μετριέται σε s (δευτερόλεπτα). Εξ 'ορισμού προκύπτει ότι $T = \Delta t / N$, όπου N είναι ο αριθμός των επαναλήψεων που έγιναν σε χρονικό διάστημα Δt . Η μετατροπή μονάδων RPM σε Hz γίνεται διαιρώντας τον αριθμό $RPM/60$.

- **Συχνότητα**

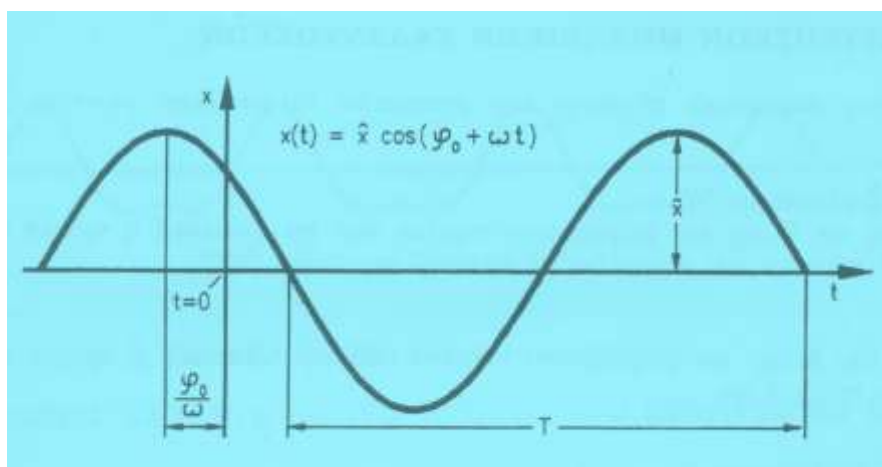
Συχνότητα ονομάζεται ο αριθμός των επαναλήψεων που έγιναν στη μονάδα του χρόνου, δηλαδή ο αριθμός των επαναλήψεων διά του χρονικού διαστήματος στο οποίο μετρήσαμε. Συμβολίζεται με f και μετριέται σε δευτερόλεπτα εις τη μείον ένα ή s^{-1} , ή Hz ή σε ή περιστροφές ανά λεπτό (RPM). Έτσι, ισχύει $f=N/\Delta t$, όπου N είναι ο αριθμός των διαταραχών που πέρασαν σε χρονικό διάστημα Δt . Η συχνότητα είναι αντίστροφο μέγεθος της περιόδου και ισχύει: $fT=(N/\Delta t)(\Delta t/N)=(N\Delta t/\Delta tN)=1$. Στις περιστρεφόμενες μηχανές η μέτρηση της συχνότητας είναι υψίστης σημασίας.

- **Πλάτος**

Το μέγεθος που διαταράσσεται λαμβάνει μία μέγιστη και μία ελάχιστη τιμή. Είναι αδύνατον να διαταράσσεται περιοδικά ένα μέγεθος, δηλαδή να είναι περιοδικό φαινόμενο, χωρίς να λαμβάνει μια μέγιστη και μια ελάχιστη τιμή. Θεωρώντας ως μηδέν το μέσο της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής, έχουμε ότι η απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής είναι ίση με την απόλυτη τιμή της μέγιστης. Αυτή η απόλυτη τιμή ονομάζεται πλάτος του κύματος. Συμβολίζεται με A και μετριέται σε μονάδες μήκους, συνήθως μέτρα. Το πλάτος μιας ταλάντωσης δεν είναι πάντα σταθερό και συνήθως εξαρτάται, όπως και η φάση, από το χρόνο στον οποίο μελετάμε. Το πλάτος του κύματος σε ένα σημείο έχει άμεση σχέση με την ενέργεια του ταλαντωτή. Το πλάτος χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της μέγιστης τιμής της ταλάντωσης της μηχανής.

- **Γωνία φάσης**

Η γωνία φάσης εκφράζει το σημείο έναρξης μέτρησης στο χρόνο $t=0$. Η γωνία φάσης είναι σημαντική παράμετρος για την ζυγοστάθμιση της μηχανής ή για διάγνωση των αιτιών που προκαλούν την ταλάντωση.



Εικόνα 7: Κύρια χαρακτηριστικά αρμονικής ταλάντωσης.

3.3.4 Μέτρηση μηχανικών ταλαντώσεων.

Τρεις είναι οι παράμετροι μέτρησης των μηχανικών ταλαντώσεων στις μηχανές που χρησιμοποιούνται σήμερα. Είναι η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση.

- Μετατόπιση (x).

Είναι η απόκλιση της θέσης του μετρούμενου σημείου από την κανονική ή αρχική του θέση. Μονάδες μέτρησης είναι το χιλιοστό του μέτρου "m" ή χιλιοστό της ίντσας "mil".

$$x = \frac{a}{4\pi^2 f^2} = \int v dt$$

- Ταχύτητα (v).

Είναι η ταχύτης της δέσης του μετρούμενου σημείου από την κανονική ή αρχική του θέση. Μονάδα μέτρησης είναι το mm/s ή ips.

- Επιτάχυνσης (a).

Είναι η μεταβολή αύξησης της ταχύτητας ή επιτάχυνσης της θέσης του μετρούμενου σημείου από την κανονική ή αρχική του θέση. Μονάδα μέτρησης είναι το m/s² ή g ($g=9,81\text{m/s}^2$).

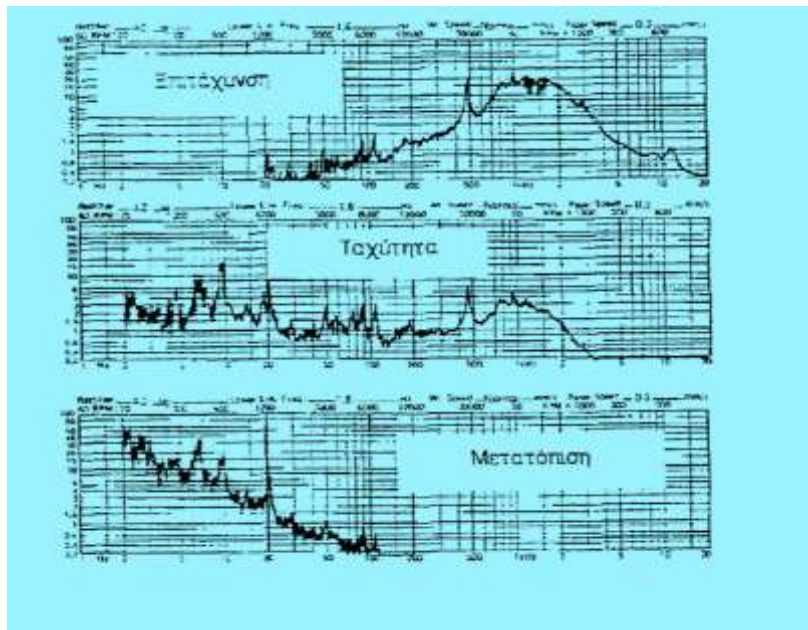
$$u = \frac{a}{2\pi f} = \int a dt$$

Η επιτάχυνση και η ταχύτητα χρησιμοποιούνται για την δημιουργία του φάσματος συχνοτήτων. Επίσης ενδείκνυνται για μετρήσεις που μας ενδιαφέρουν κυρίως οι υψηλές συχνότητες. Αντίθετα, η μετατόπιση ενδείκνυνται για μετρήσεις που μας ενδιαφέρουν οι χαμηλές συχνότητες και χρησιμοποιείται κυρίως για ζυγοσταθμίσεις η γενικά εκεί που έχουμε μεγάλες μετατοπίσεις(Νάτσης, 2005). Μπορούμε χρησιμοποιώντας μαθηματικές σχέσεις, ηλεκτρονικά κυκλώματα ή λογισμικά να μετατρέψουμε την μετατόπιση, την ταχύτητα και της επιτάχυνση από την μία μονάδα στην άλλη. Αυτή η μετατροπή ισχύει όμως μόνο για αρμονικές ταλαντώσεις. Βέβαια τα σύγχρονα όργανα μέτρησης έχουν την δυνατότητα να μετρήσουν και τα τρία μεγέθη με την χρήση κατάλληλων λογισμικών(Κανδύλης, 2007 β).

Μετατροπή	Μετατόπιση δόνησης x (mm)	Ταχύτητα δόνησης υ(mm/s)	Επιτάχυνση δόνησης α (m/s ²)
Μετατόπιση δόνησης x=	1	υ/ω	α/ω ²
Ταχύτητα δόνησης υ=	s*ω	1	α/ω
Επιτάχυνση δόνησης α=	s*ω ²	υ*ω	1

Πίνακας 3: Μαθηματικοί τύποι μετατροπής μονάδων μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης όπου $\omega = 2\pi f$ και κατά προσέγγιση $\omega = \eta/10$ όπου $\ll \eta \gg$ είναι η ταχύτητα του άξονα σε rpm (στροφές ανά λεπτό).

Η μετατροπή των μονάδων μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης από την μια μονάδα στην άλλη μπορεί να γίνει με μαθηματικές σχέσεις, με ηλεκτρονικά κυκλώματα ή με λογισμικά. Στα μοντέρνα όργανα μέτρησης ταλαντώσεων που αναφερόμαστε γίνεται με λογισμικά.



Εικόνα 8: Φάσμα μετατόπισης ταχύτητας και επιτάχυνσης για την ίδια δόνηση(Νάτσης, 2005).

Στο παραπάνω διάγραμμα που δείχνει την επιτάχυνση, την ταχύτητα και τη μετατόπιση για την ίδια δόνηση μπορούμε να δούμε ότι η επιτάχυνση συμπιέζει τις κορυφές που βρίσκονται σε χαμηλές συχνότητες και ενδείκνυται για σήματα που περιέχουν ψηλές συχνότητες. Αντίθετα, η μετατόπιση συμπιέζει τις κορυφές που βρίσκονται σε υψηλές συχνότητες και για αυτό είναι κατάλληλο για χαμηλές συχνότητες. Σε μετρήσεις ευρέως φάσματος για την μέτρηση των δονήσεων των περιστρεφόμενων τμημάτων των μηχανών μετράται στο 70% των περιπτώσεων η ταχύτητα και η επιτάχυνση στο 30% των περιπτώσεων (Νάτσης, 2005).

3.4 Όργανα μετρήσεων

3.4.1 Οι τύποι των οργάνων μέτρησης

Τα όργανα μετρήσεων που χρησιμοποιούνται στην προληπτική συντήρηση χωρίζονται ανάλογα με το μέγεθος και τον τρόπο λειτουργίας τους σε τρεις κατηγορίες:

- Φορητοί Αναλυτές(Data Collectors).

Αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούνται από τεχνικούς οι οποίοι επισκέπτονται τις μηχανές ανά τακτά χρονικά διαστήματα ώστε να πάρουν τις λεγόμενες υπογραφές δονήσεων. Η αποθήκευση των δεδομένων γίνεται στην μνήμη του οργάνου. Τα αποτελέσματα αργότερα μεταφέρονται σε υπολογιστή όπου αναλύονται στο λογισμικό που υπολογίζει την φθορά κάθε εξαρτήματος και προβλέπει τον χρόνο που πρέπει να αντικατασταθεί ή ακόμη πότε πρέπει να ζυγοσταθμισθεί η μηχανή. Παραδείγματα φορητών αναλυτών είναι το vibrotest 60 της εταιρίας Brüel & Kjær Vibro και το Bearing Checker της εταιρίας SPM που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες τις εργασίας.



Εικόνα 9α. Φορητός αναλυτής Brüel & Kjær Vibro



Εικόνα 9. Φορητός αναλυτής Bearing Checker

- Μικρές συσκευές

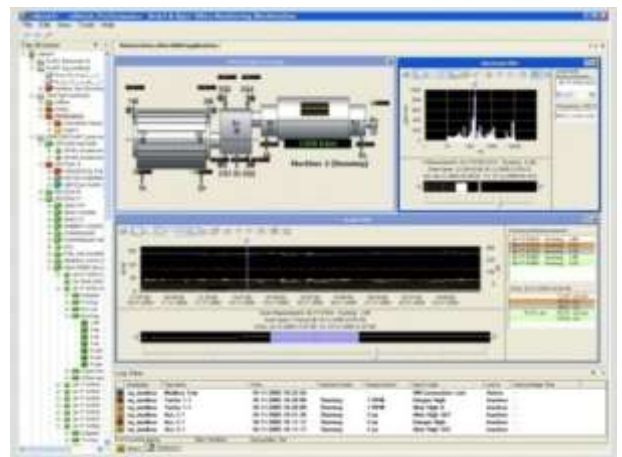
Είναι συσκευές που τοποθετούνται σε διάφορες μηχανές όπως ανεμιστήρες, κινητήρες για την μόνιμη παρακολούθηση των δονήσεων τους με οπτικές και ψηφιακές ενδείξεις. Με τον τρόπο αυτό οι μηχανικοί της εταιρίας ξέρουν ακριβώς σε τι κατάσταση είναι οι μηχανές. Επίσης υπάρχει ειδοποίηση με συναγερμό όταν κάτι δεν πάει καλά.

- Ειδικές συσκευές μόνιμης εγκατάστασης

Εγκαθίστανται σε μεγάλες μηχανές ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση όλων των λειτουργικών μερών των μηχανών επί 24ώρου βάσεως και η αυτόματη διάγνωση βλαβών και πρόβλεψη χρόνου αντικατάστασης του κάθε φθαρμένου εξαρτήματος με την χρήση δυναμικών αναλύσεων όπως FFT, CEPSTRUM κλπ και έξυπνων λογισμικών. Παράδειγμα συσκευής μόνιμης εγκατάστασης είναι το Vibrocontrol 6000 της εταιρίας Brüel & Kjaer καθώς και το ειδικό λογισμικό Compass 6000 που το συνοδεύει.



Εικόνα 10α. Συσκευή μόνιμης εγκατάστασης Vibrocontrol 6000



Εικόνα 10 β. Λογισμικό Compass 6000

3.5 Αισθητήρες

3.5.1 Οι αισθητήρες (sensors) των οργάνων μέτρησης.

Τα όργανα μετρήσεων χρησιμοποιούν ειδικούς αισθητήρες για την συλλογή του μηχανικού σήματος από το περίβλημα της μηχανής, που είναι ανάλογο της στάθμης δονήσεων και το μετατρέπουν σε μία μετρούμενη ποσότητα όπως είναι το ηλεκτρικό ρεύμα ή η τάση.

Η μέθοδος μέτρησης της απόλυτης τιμής ταλαντώσεων γίνεται επάνω στα έδρανα κύλισης ή ολίσθησης ή στο πλησιέστερο σημείο των εδράνων. Η μέτρηση αυτή είναι η πιο αποδοτική και αξιόπιστη για την αξιολόγηση της λειτουργίας μιας μηχανής, για την προληπτική διάγνωση βλαβών και για την πρόβλεψη του χρόνου αντικατάστασης φθαρμένων εξαρτημάτων. Με την μέθοδο αυτή μπορούμε επίσης να διαπιστώσουμε κακή ζυγιστάθμιση, κάμψη αξόνων, σπασμένα γρανάζια ή ραϊσμάτα αυτών, φθορά εδράνων, κακή ευθυγράμμιση ζεύξεων αξόνων κλπ.



3.5.2 Οι απαραίτητες ιδιότητες των αισθητήρων.

Οι αισθητήρες για να εξασφαλίζουν την σωστή λειτουργία των οργάνων μέτρησης θα πρέπει να έχουν τις παρακάτω ιδιότητες:

- Μεγάλη δυναμική περιοχή και γραμμικότητα χωρίς παραμόρφωση του σήματος. Πιο συγκεκριμένα οι αισθητήρες πρέπει να έχουν καμπύλη απόκρισης από πολύ χαμηλές συχνότητες κάτω του 1 Hz μέχρι πολύ υψηλές έως τα 12 KHz. Η τόσο μεγάλη περιοχή συχνοτήτων είναι αναγκαία διότι οι θεμελιώδεις συχνότητες των αξόνων και οι υποαρμονικές τους εκτείνονται κάτω του 1 Hz, ενώ οι συχνότητες ιδιοσυντονισμού των τμημάτων της μηχανής και οι αρμονικές τους υπερβαίνουν τα 12 KHz.
- Περιοχή θερμοκρασίας από -70°C έως $+250^{\circ}\text{C}$. Πολλές μηχανές που εργάζονται στην ύπαιθρο μπορεί να έχουν τέτοιες θερμοκρασίες σε διάφορα μέρη τους.
- Χαμηλή ευαισθησία σε άσχετες παραμέτρους όπως σκόνη, μαγνητικά πεδία, πεδία θερμοκρασίας κλπ.
- Σταθερά χαρακτηριστικά για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα.
- Εύκολη και σταθερή τοποθέτηση στα διάφορα μέρη των μηχανών.
- Να μην επηρεάζονται από ακουστικά σήματα που βρίσκονται γύρω από τις μηχανές (Κανδύλης δ).

3.5.3 Τύποι αισθητήρων.

Οι αισθητήρες ανάλογα με τις μονάδες μέτρησης κατά τα πρότυπα ISO1000 που χρησιμοποιούν χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες :

1) Ανιχνευτές μετατόπισης **displacement transducers** με μονάδες μέτρησης σε m, mm, Mm.

2) Ανιχνευτές ταχύτητας **velocity transducers** με μονάδες μέτρησης σε m/s, mm/s ή ms^{-1} , mms^{-1} .

3) Ανιχνευτές επιτάχυνσης **accelerometers** με μονάδες μέτρησης σε m/s^2 (ms^{-2})

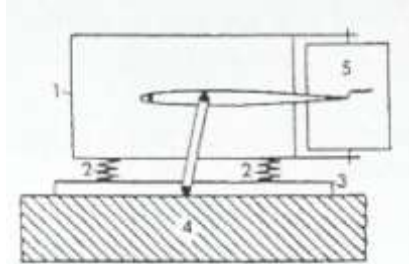
Οι μονάδες μέτρησης της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης μπορεί να δοθούν σε τιμές κορυφής (peak) και ενεργού τιμής (rms) λόγω του ότι τα σήματα στα οποία αντιστοιχούν είναι ημιτονικά.

3.5.3.α Αισθητήρες μετατόπισης

Υπάρχουν δύο τύποι αισθητήρων μετατόπισης, ο αισθητήρας μεταλλικού στελέχους με γραφίδα και καταγραφική συσκευή και οι αισθητήρες δινορευμάτων ή εγγύτητας.

- Αισθητήρας μεταλλικού στελέχους.

Χρησιμοποιούνται κυρίως για την μέτρηση της μετατόπισης. Η μέτρηση γίνεται με την βοήθεια κινητού στελέχους που είναι συνδεδεμένο με μία γραφίδα η οποία καταγράφει τη στάθμη ταλάντωσης στην καταγραφική συσκευή. Η ανάλυση του γραφήματος μπορεί να δώσει, εκτός από τη στάθμη ταλάντωσης, και τη συχνότητα. Ο τρόπος αυτός δίνει περιορισμένες πληροφορίες για την κατάσταση της μηχανής και για αυτό οι αισθητήρες αυτοί έχουν περιορισμένη χρήση.



Εικόνα 11: Αισθητήρας μεταλλικού στελέχους.

Πλεονεκτήματα:

- 1) Παρέχει άμεση καταγραφή.

Μειονεκτήματα

- 1) Δεν παρέχει τάση εξόδου, με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να επεξεργαστούμε αναλογικά ή ψηφιακά την έξοδο, γεγονός που αποτελεί και το σπουδαιότερο μειονέκτημα αυτών των αισθητήρων.
 - 2) Έχει μηχανική αδράνεια και επομένως η χρήση του περιορίζεται σε πολύ χαμηλές συχνότητες.
 - 3) Απαιτεί υψηλές μετατοπίσεις.
 - 4) Δεν έχει ευαισθησία.
 - 5) Καταστρέφεται γρήγορα.
 - 6) Έχει υψηλό κόστος.
 - 7) Προσθέτει φορτίο στην μηχανή.
 - 8) Είναι ευαίσθητο στον προσανατολισμό.
- Αισθητήρες δινορευμάτων ή εγγύτητας

Μετρούν την μετατόπιση και στηρίζονται στην αρχή της δημιουργίας δινορευμάτων. Όταν ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται στον σιδηρομαγνητικό πυρήνα, τότε, σύμφωνα με το νόμο της επαγωγής, προκαλείται ένα ηλεκτρικό πεδίο. Το πεδίο αυτό ασκεί δυνάμεις στα ελεύθερα φορτία του σιδηρομαγνητικού πυρήνα και τα θέτει σε κίνηση με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ρεύματα, τα οποία έχουν κλειστή τροχιά και λέγονται δινορεύματα (eddy currents). Οι απώλειες δινορευμάτων αναφέρονται στη θερμότητα που παράγεται λόγω των δινορευμάτων και έχουν ωμικό χαρακτήρα.

Για παράδειγμα, κατά την περιστροφή των αξόνων, δημιουργούνται στον άξονα δινορεύματα των οποίων η τιμή εξαρτάται από την μαγνητική διαπερατότητα, την αγωγιμότητα του υλικού, καθώς και την απόσταση του αισθητήρα από τον άξονα.

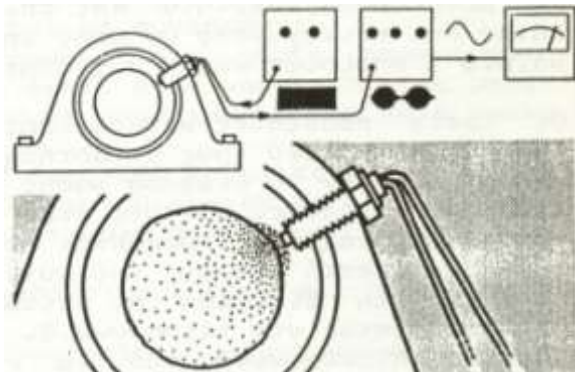
Εφόσον τα διάφορα υλικά έχουν διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες, οι μετρήσεις των αισθητήρων επηρεάζονται από το είδος του υλικού του άξονα. Αυτό αποτελεί και το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου. Υπάρχουν σύγχρονοι αισθητήρες που μετρούν ταυτόχρονα το εύρος και την φάση της εξόδου και έτσι δίνουν έξοδο ανεξάρτητη από το είδος του υλικού. Χρησιμοποιούνται κυρίως εκεί όπου η χρήση των επιταχυνσιομέτρων είναι αδύνατη. Συνήθεις χρήσεις αυτού του είδους αισθητήρων είναι η μέτρηση ακτινικών και αξονικών ταλαντώσεων, ταλαντώσεις εδράνων κλπ.

Πλεονεκτήματα:

- 1) Δεν έχει κινούμενα μέρη.
- 2) Δεν έρχεται σε επαφή με τους προς μέτρηση άξονες.
- 3) Παρέχει σήμα από DC και άνω.

Μειονεκτήματα

- 1) Δίνει λανθασμένα σήματα λόγω ατελειών της ατράκτου των αξόνων προς μέτρηση και λόγω διαφορετικών μαγνητικών χαρακτηριστικών των αξόνων.
- 2) Απαιτεί βαθμονόμηση.
- 3) Έχει πολύ μικρή δυναμική περιοχή 100:1 που περιορίζει πρακτικά την απόκριση της συχνότητας στην περιοχή DC-200Hz μόνο.



Εικόνα 12: Αισθητήρας δινορευμάτων

3.5.3.β Αισθητήρες ταχύτητας

- Αισθητήρες κινητού στοιχείου.

Βασίζονται στην ηλεκτροδυναμική αρχή. Ένας αισθητήρας ταχύτητας αποτελείται από ένα πηνίο που φέρεται σε δύο ελικοειδή ελατήρια μεμβράνης και κρέμεται χωρίς τριβή εντός μαγνητικού πεδίου ενός μόνιμου μαγνήτη. Όταν ο αισθητήρας εφαρμόζεται στο σημείο που θέλουμε να κάνουμε μέτρηση, η θέση

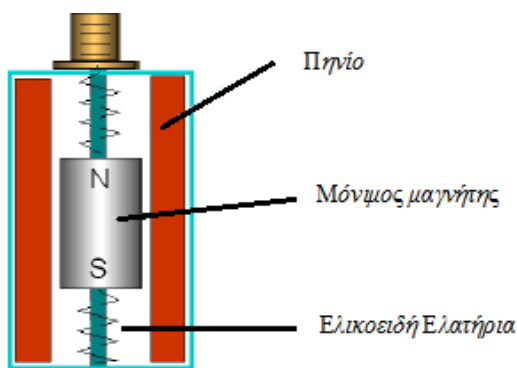
του πηνίου παραμένει σταθερή σε όλες τις συχνότητες που βρίσκονται πάνω από την συχνότητα συντονισμού του (ιδιοσυχνότητα), ενώ ο μαγνήτης που δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο πάλλεται στο ρυθμό του πλάτους της ταλάντωσης. Έτσι, καθώς το πηνίο βρίσκεται στο μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη, έχουμε την παραγωγή ηλεκτρικής τάσης ανάλογη προς το πλάτος της ταλάντωσης. Την τάση αυτή μετράει το όργανο για να μας δείξει την ένδειξη. Ο τύπος του αισθητήρα αυτού δεν απαιτεί τάση για την λειτουργία του, αλλά δημιουργεί τάση και έτσι είναι ενεργός αισθητήρας.

Πλεονεκτήματα:

- 1) Στιβαρή κατασκευή
- 2) Υψηλή ευαισθησία ακόμη και στις χαμηλές συχνότητες
- 3) Υψηλής τάσης εξόδου από χαμηλή εσωτερική σύνθετη αντίσταση
- 4) Δεν απαιτεί τροφοδότηση
- 5) Υδατοστεγές, ερμητικώς κλειστό σε κενό, αντέχει σε χημική διάβρωση διότι έχει περίβλημα από ανοξείδωτο χάλυβα.

Μειονεκτήματα

- 1) Συχνότητα απόκρισης μέχρι 2000Hz (120.000 RPM)
- 2) Ευαισθησία σε ισχυρά μαγνητικά εξωτερικά πεδία



Εικόνα 13α: Αισθητήρας ταχύτητας (εσωτερική διατομή)



Εικόνα 13β: Αισθητήρας ταχύτητας

- Οπτικοί αισθητήρες.

Η λειτουργία των οπτικών αισθητήρων στηρίζεται στο φαινόμενο Doppler. Μία δέσμη φωτός, συνήθως από Laser, πέφτει στην ταλαντευόμενη επιφάνεια. Στην ανακλώμενη δέσμη από την ταλαντευόμενη επιφάνεια λόγω του φαινομένου Doppler θα έχουμε μία μετατόπιση στην συχνότητα. Η μετατόπιση αυτή μετράται με ένα συμβολόμετρο (συνήθως τύπου Michelson) και δίνει την ταχύτητα ταλάντωσης. Οι οπτικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ταχύτητας και της μετατόπισης.

Πλεονεκτήματα:

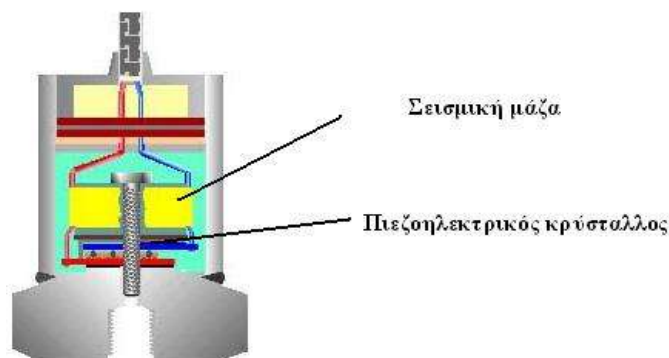
1) Δεν επιβαρύνουν με πρόσθετο φορτίο την κατασκευή

Μειονεκτήματα

1) Έχουν υψηλό κόστος

3.5.3.γ Αισθητήρες επιτάχυνσης

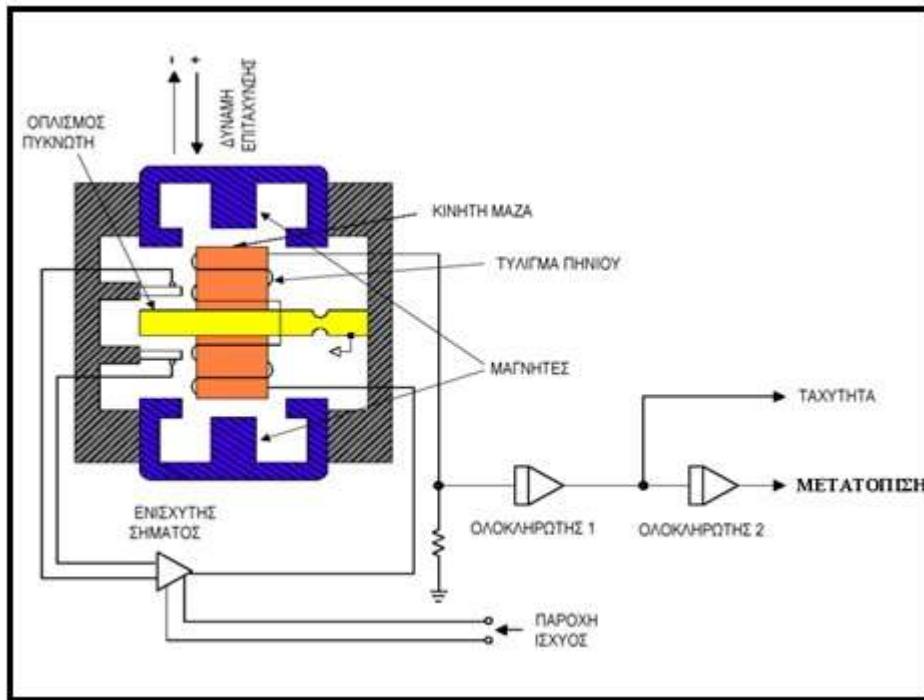
Τα επιταχυνσιόμετρα είναι οι πιο διαδεδομένοι τύπος αισθητήρων που χρησιμοποιείται σήμερα.



Εικόνα 14: Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο

Τα σύγχρονα επιταχυνσιόμετρα κατασκευάζονται από ειδικά πιεζοηλεκτρικά υλικά και βασίζονται στην αρχή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Εσωτερικά του επιταχυνσιόμετρου υπάρχει πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος χαλαζία, **quartz**, για την μετατροπή της μηχανικής ταλάντωσης σε ηλεκτρική. Επάνω στον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο ή στο πλάι σε επαφή με αυτόν βρίσκεται μια σεισμική μάζα m . Εάν το σύστημα υπόκειται σε μηχανικές ταλαντώσεις, η σεισμική μάζα δημιουργεί εναλλασσόμενες μηχανικές δυνάμεις στον κρύσταλλο, συμπιεστικές ή διατμητικές, οι οποίες προκαλούν παραμορφώσεις στην δομή του. Οι παραμορφώσεις αυτές βάσει της αρχής του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου παράγουν εναλλασσόμενο ηλεκτρικό φορτίο. Το ηλεκτρικό αυτό φορτίο παράγεται από την ταλαντούμενη μετατόπιση των μορίων του κρυστάλλου και είναι ανάλογο με την μηχανική ταλάντωση. Την ποσότητα αυτή του ηλεκτρικού φορτίου μετράει το όργανο και μας δείχνει την επιτάχυνση της ταλάντωσης.

Ένας άλλος τρόπος είναι η μέτρηση αλλαγών στην χωρητικότητα ενός πυκνωτή. Ο πυκνωτής αποτελεί μέρος της ανάρτησης μάζας και η τιμή του μεταβάλλεται με την κίνηση αυτής της μάζας. Η αξιοποίηση της μεταβολής της χωρητικότητας του πυκνωτή μας παρέχει μέτρηση επιτάχυνσης.



Εικόνα 15: Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιόμετρου με πυκνωτή.

Όταν το επιταχυνσιόμετρο διεγερθεί από σήμα σταθερής επιτάχυνσης θα δώσει σταθερή έξοδο συναρτήσει της συχνότητας μέχρι σχεδόν τη συχνότητα ιδιοσυντονισμού του.

Συνήθως με το μέγεθος του επιταχυνσιόμετρου αυξάνεται η ευαισθησία του και ελαττώνεται η άνω περιοχή συχνοτήτων. Λόγω της κατασκευής του αυτής το αισθητήριο αυτό παρέχει υψηλή συχνότητα ιδιοσυντονισμού, της τάξεως των 35 kHz και η καμπύλη απόκρισης του είναι εκμεταλλεύσιμη στην περιοχή 1 Hz-20 kHz περίπου. Το χαμηλό τμήμα της δυναμικής καμπύλης περιορίζεται μόνο από τον θόρυβο των καλωδίων σύνδεσης και των προενισχυτών.

Οι αισθητήρες μπορούν με κατάλληλη τερματική συσκευή, να πάρουν μετρήσεις σε επιτάχυνση σε ταχύτητα αλλά και σε μετατόπιση. Πιο αναλυτικά με την ολοκλήρωση της τιμής της επιτάχυνσης μπορούμε να πάρουμε την τιμή της ταχύτητας της ταλάντωσης και με διπλή ολοκλήρωση μπορούμε να πάρουμε την τιμή της μετατόπισης της ταλάντωσης. Αυτό όμως επηρεάζει την ευαισθησία τους η οποία δεν είναι η ίδια σε όλα τα μετρούμενα μεγέθη, αλλά εξαρτάται από την συχνότητα ταλάντωσης. Υπάρχουν επιταχυνσιόμετρα που μετρούν κατακόρυφες ταλαντώσεις, οριζόντιες καθώς και επιταχυνσιόμετρα που μετρούν ταυτόχρονα σε τρεις διευθύνσεις x.y.z..

Πλεονεκτήματα:

- 1) Δεν έχουν κινούμενα τμήματα που μπορούν να υποστούν φθορές.
- 2) Έχουν στιβαρή κατασκευή με αποτέλεσμα να είναι ανθεκτικά στις δυσμενείς συνθήκες γύρω από τις μηχανές και να αντέχουν ακόμα και σε θερμοκρασίες από -74°C ως $+250^{\circ}\text{C}$

- 3) Παρέχουν πολύ μεγάλη δυναμική περιοχή, από κλάσματα του Hz ως άνω των 60000 Hz
- 4) Δεν είναι ευαίσθητα στα μεταβλητά μαγνητικά πεδία των μηχανών και έτσι μπορούν να τοποθετηθούν με οποιονδήποτε προσανατολισμό.
- 5) Έχουν μικρές διαστάσεις και πολύ μικρό βάρος.
- 6) Είναι ερμητικώς κατασκευασμένα σε κέλυφος από ανοξείδωτο χάλυβα. υψηλή σταθερότητα

Μειονεκτήματα:

- 1) Είναι παθητικά αισθητήρια που απαιτούν τροφοδότηση
- 2) Έχουν χαμηλή ευαισθησία στις χαμηλές συχνότητες.

3.5.4 Εύρεση του σωστού σημείου μέτρησης.

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω οι δονήσεις που δημιουργούνται στο εσωτερικό των μηχανών λόγω των κινούμενων τμημάτων τους, μεταφέρονται στο εξωτερικό τους περίβλημα ακολουθώντας διαφορετικούς δρόμους. Ανάλογα την πορεία που ακολουθούν αλλού η ένταση τους εξασθενεί περισσότερο και αλλού λιγότερο. Έτσι είναι δυνατόν από ένα σωστά επιλεγμένο σημείο να πάρουμε μετρήσεις που θα μας δώσουν μια πλήρη εικόνα όλων των δονήσεων των κινούμενων μερών εντός και εκτός της μηχανής και θα μας βοηθήσουν να δούμε πια είναι η πραγματική κατάσταση της.

Η διαδικασία εύρεσης του κατάλληλου σημείου περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενες δοκιμαστικές μετρήσεις σε διάφορα σημεία της μηχανής ώστε να πάρουμε τα αποτελέσματα με τη μεγαλύτερη λεπτομέρεια ως προς τις συχνότητες και την ένταση των πλατών αλλά και με το χαμηλότερο δυνατό υπόβαθρο θορύβου.

Χρησιμοποιώντας το επιταχυνσιόμετρο λαμβάνουμε δοκιμαστικά μετρήσεις από διάφορα σημεία της μηχανής ενώ η μηχανή εργάζεται σε σταθερές και φυσιολογικές θερμοκρασίες, σε σταθερή πίεση, με σταθερό φορτίο και σταθερό αριθμό στροφών. Σε μηχανές με μεταβαλλόμενες στροφές και φορτίο θα πρέπει να λαμβάνουμε μετρήσεις στα ακραία όρια λειτουργίας τους καθώς και σε επιλεγμένες στιγμές εντός αυτών των ορίων.

Τα επιταχυνσιόμετρα πρέπει να τοποθετούνται σε θέσεις όσο το δυνατόν πιο κοντά στην ευθεία μετάδοσης των ταλαντώσεων και να αποφεύγουμε τις μετρήσεις πάνω στο εξωτερικό κάλυμμα μιας μηχανής γιατί μπορεί να έχουμε παραπλανητικές ενδείξεις λόγω χαλαρότητας ή συντονισμού του καλύμματος. Πρέπει να προσέξουμε ώστε ο άξονας της μέγιστης ευαισθησίας του να συμπίπτει με την μετρητική κατεύθυνση της θέσης που έχουμε επιλέξει.

Οι κραδασμοί πρέπει να μετρηθούν κατά την αξονική, την οριζόντια και την κατακόρυφη κατεύθυνση.

- Κατά την αξονική κατεύθυνση.

Κάτω από ιδανικές συνθήκες, οι μετρήσεις κατά την αξονική κατεύθυνση παρουσιάζουν χαμηλά επίπεδα κραδασμών, καθώς οι περισσότερες δυνάμεις εμφανίζονται κάθετα στον άξονα. Η μέτρηση κατά την κατεύθυνση αυτή αποτελεί καλή ένδειξη κακής ευθυγράμμισης ή κάμψης αξόνων.

- Κατά την οριζόντια κατεύθυνση.

Οι μετρήσεις κατά την κατεύθυνση αυτή φανερώνουν τους περισσότερους κραδασμούς, οι οποίοι οφείλονται στην ευκαμψία της μηχανής στο οριζόντιο επίπεδο. Επίσης, φανερώνουν την ύπαρξη αζυγοσταθμίας η οποία δημιουργεί ακτινικούς κραδασμούς κατά το οριζόντιο και κατά το κατακόρυφο επίπεδο. Επειδή συνήθως οι μηχανές μπορούν να κινηθούν πιο ελεύθερα κατά το οριζόντιο επίπεδο, ενδείξεις αυξημένων κραδασμών κατά το επίπεδο αυτό συχνά αποτελούν ασφαλείς ενδείξεις για την ύπαρξη αζυγοσταθμίας.

- Κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση.

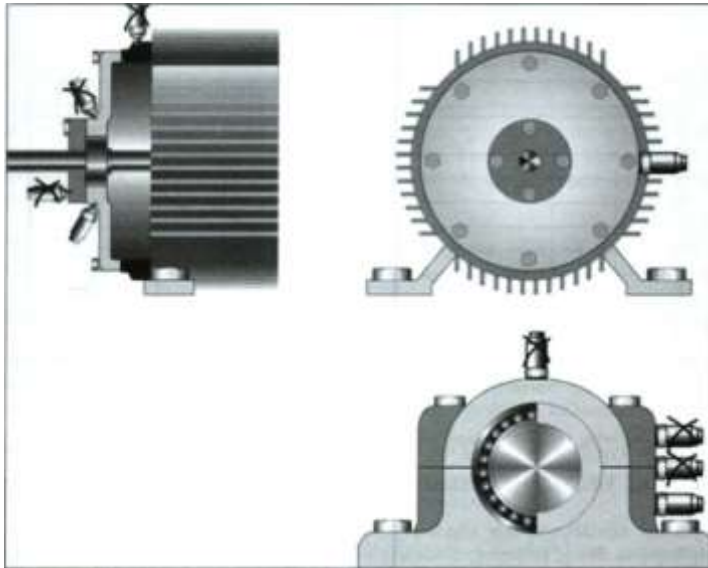
Οι μετρήσεις σε αυτήν την κατεύθυνση παρουσιάζουν συνήθως χαμηλότερα επίπεδα κραδασμών από ότι στην οριζόντια διεύθυνση λόγω της δυσκαμψίας που οφείλεται στο πλαίσιο στήριξης της μηχανής και στη βαρύτητα.

Τα επιταχυνσιόμετρα μπορούν να τοποθετηθούν κατά αξονική ή ακτινική φορά. Περιβλήματα εδράνων ή γραναζιών είναι ιδανικά μέρη τοποθέτησης επιταχυνσιομέτρων. Αν είναι δυνατό, επιλέγουμε μία επίπεδη επιφάνεια όπου τοποθετούμε τον ακροδέκτη του οργάνου στο σημείο μέτρησης.

Τα σημεία ή το σημείο που δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα μαρκάρονται για να είναι αξιόπιστες και σωστές οι μετέπειτα μετρήσεις. Για να γίνει αυτό όμως θα πρέπει αυτές οι μετρήσεις να πραγματοποιούνται στο ίδιο ακριβώς σημείο, γιατί ακόμα και μερικά εκατοστά μακρύτερα από το σημείο αναφοράς για τις μετρήσεις θα μπορούσε να μας δώσει εντελώς διαφορετικές ενδείξεις. Γι αυτόν τον λόγο, όπως είπαμε, μαρκάρουμε τη θέση αυτή δίνοντας της αριθμό για να σημειώσουμε με ευκρίνεια την θέση αυτή για μελλοντική σύγκριση, π.χ. με ανεξίτηλο μελάνι ή για μεγαλύτερη ασφάλεια μπορούμε να τοποθετήσουμε μαγνητικές βάσεις. Συνήθως σε κάθε μηχανή επιλέγονται τελικά περισσότερα του ενός σημεία ενώ σε μεγάλες μηχανές μπορούμε να έχουμε μέχρι και πέντε σημεία.

Σε περίπτωση που μερικές μηχανές εργάζονται σε διαφορετικές ταχύτητες, σε διαφορετικό αριθμό στροφών ή σε διαφορετικά φορτία μπορούμε να πάρουμε από τα ίδια σημεία ή από διαφορετικά σημεία, μετρήσεις που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες ταχύτητες ,αριθμό στροφών και φορτία.

Τα σημεία που έχουμε επιλέξει πρέπει να τα καταχωρήσουμε στο αρχείο που έχουμε τα διαγράμματα των μηχανών και τις συνθήκες λειτουργίας αυτών(Κανδύλης, 2007 β).

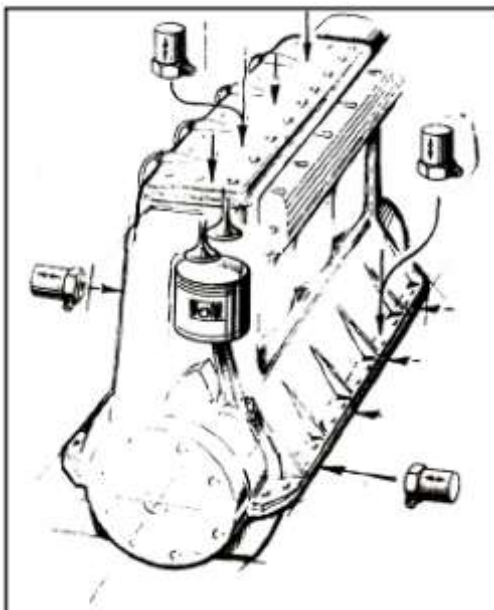


Εικόνα 16: Σωστά και λανθασμένα σημεία τοποθέτησης του αισθητήρα για μέτρηση σε έδρανα κύλισης (ρουλεμάν).

Όσο αφορά τις μηχανές diesel υπάρχουν δύο μέθοδοι ελέγχου που καθορίζουν και το εύρος των συχνοτήτων αλλά και το σημείο της μέτρησης. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει η Καναδική και η Αμερικάνικη μέθοδος.

Η Καναδική κυβέρνηση έχει καθορίζει τα όρια της στάθμης των δονήσεων με μέτρηση της ταχύτητας δόνησης (με την χρήση επιταχυνσιόμετρων) στην περιοχή συχνοτήτων 5-10.000 Hz, σε συγκεκριμένες μετρητικές θέσεις. Οι προδιαγραφές αυτές καθορίζουν μέγιστη στάθμη ταχύτητας δονήσεων στα 10mm/s.

Σύμφωνα με την Αμερικανική μέθοδο οι κυρίες φθορές στις μηχανές diesel είναι στην περιοχή των κεφαλών των κυλίνδρων. Έτσι μετρήσεις στην περιοχή



συχνοτήτων 20KHz-40KHz και τοποθέτηση του επιταχυνσιόμετρου στην κεφαλή του κυλίνδρου θα δείξουν κτυπήματα πιστονιών, φθορά από σπασμένα ελατήρια, κακή λίπανση, μη ομοιόμορφες εκρήξεις και βαλβίδες που έχουν φθορά. Όλες οι βλάβες αυτές, θα δημιουργήσουν υψηλές συχνότητες στο φάσμα ταλαντώσεων. Η εφαρμογή όμως της μεθόδου αυτής δεν είναι εύκολη στην πράξη.

Εικόνα 17: Μηχανή DIESEL με ενδεικτικές θέσεις τοποθέτησης των επιταχυνσιόμετρων

3.5.5. Τρόποι έδρασης του αισθητήρα στο σημείο μέτρησης.

Εκτός από την επιλογή του σωστού σημείου μέτρησης πολύ σημαντικό είναι και ο τρόπος έδρασης του αισθητήρα σε αυτό το σημείο. Για αυτό τον λόγο πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή γιατί σε περίπτωση λάθους στον τρόπο έδρασης θα υπάρξει λάθος και στην καταγραφή της τιμής του πλάτους και της συχνότητας της ταλάντωσης.

Η έδραση της βάσης του επιταχυνσιομέτρου με το σημείο μέτρησης πρέπει να είναι σταθερά για να εξασφαλίσει μέγιστη μετάδοση της δόνησης χωρίς εξασθένηση και να μην χαμηλώνει την ιδιοσυχνότητα συντονισμού του επιταχυνσιομέτρου και μείωση της καμπύλης απόκρισης αυτού στις υψηλές συχνότητες. Η επιφάνεια έδρασης θα πρέπει να είναι καθαρή και λεία όσο είναι δυνατό ώστε να έχουμε υψηλή συχνότητα συντονισμού έδρασης. Τα λιπαντικά πρέπει να αφαιρούνται με κατάλληλα διαλυτικά. Το μέσο έδρασης θα πρέπει να είναι στερεό και ελαφρύ.

Επίσης η μέθοδος τοποθέτησης πρέπει να είναι επαναλήψιμη για να μην επηρεάζεται το σήμα εξόδου του και να έχουμε πάντοτε την ίδια ακρίβεια μετρήσεων.

- Έδραση με Μαγνήτη

Η έδραση με μαγνήτη είναι η μέθοδος που χρησιμοποιούμε τις περισσότερες φορές όταν κάνουμε μετρήσεις σε μηχανές με φορητά όργανα μέτρησης δονήσεων ή όταν κάνουμε προκαταρκτικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό του καλύτερου σημείου μέτρησης.

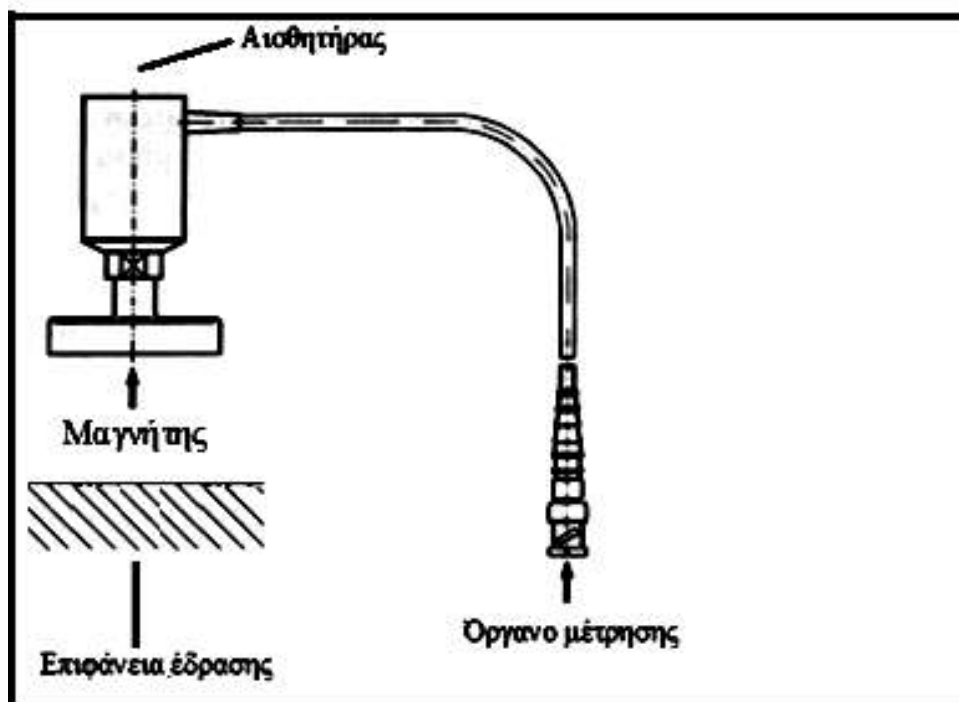
Το μέσο έδρασης είναι μικρός επίπεδος μαγνήτης επάνω στον οποίο βιδώνεται το επιταχυνσιόμετρο. Έτσι έχουμε θετική επαφή η οποία μειώνει την συχνότητα συντονισμού στα 7 kHz που σημαίνει ωφέλιμο εύρος συχνοτήτων από 0 έως 2000 Hz. Δηλαδή εκμεταλλευόμαστε μεγάλη περιοχή συχνοτήτων της καμπύλης απόκρισης του αισθητήρα.

Πλεονεκτήματα

- 1) Ταχείς μετρήσεις.
- 2) Αξιόπιστη σε μετρήσεις υψηλών συχνοτήτων.
- 3) Δίνει μεγάλες επιταχύνσεις 1000-2000 m/s².

Μειονεκτήματα

- 1) Χρησιμοποιείται μόνο σε επιφάνειες από σιδηρομαγνητικό υλικό.
- 2) Δεν εξασφαλίζει την ακριβή επαναληψιμότητα των μετρήσεων.
- 3) Ο μαγνήτης προσθέτει επί πλέον μάζα στο μετρητικό σύστημα.



Εικόνα 18: Έδραση με Μαγνήτη.

- Έδραση με Κοχλιωτό Βύσμα

Είναι η ιδανική μέθοδος τοποθέτησης του αισθητήρα του επιταχυνσιόμετρου στο σημείο μέτρησης σε περιπτώσεις που θέλουμε να τοποθετήσουμε μόνιμα το αισθητήριο σε μηχανές όπως για παράδειγμα στα μόνιμα συστήματα συνεχούς μέτρησης των ταλαντώσεων.

Αρχικά, η επιφάνεια καθαρίζεται καλά από χρώματα, σκόνη, λάδια ή ακαθαρσίες ενώ πρέπει να είναι λεία και επίπεδη. Αφού το σημείο έχει καθαριστεί καλά, μετά ανοίγουμε μια τρύπα με το κατάλληλο σπείρωμα και εκεί βιδώνεται το κοχλιωτό βύσμα επάνω στο οποίο βιδώνεται το επιταχυνσιόμετρο.

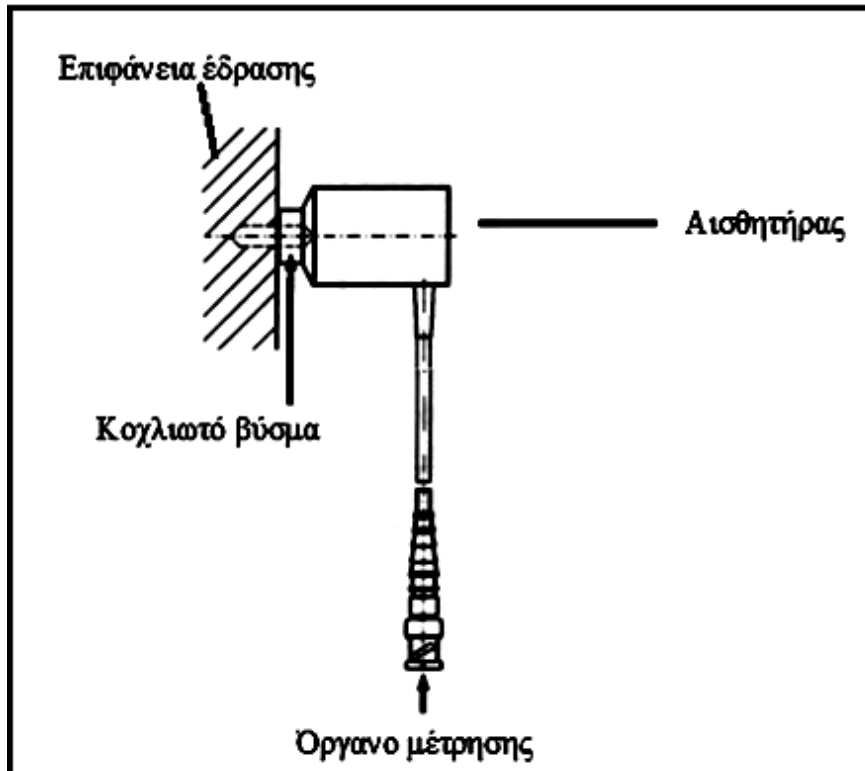
Η ακρίβεια μετρήσεων στην περίπτωση αυτή είναι η καλύτερη δυνατή σε όλη την περιοχή συχνοτήτων 1-2000 Hz. Βέβαια ένα λεπτό στρώμα ειδικού λιπαντικού SILICON τοποθετημένο στην επιφάνεια του σημείου μέτρησης οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα.

Πλεονεκτήματα:

- 1) Καλή ποιότητα έδρασης.
- 2) Μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.
- 3) Ικανοποιητική λειτουργία σε πολύ υψηλές στάθμες.

Μειονεκτήματα

- 1) Μεγάλος χρόνος προετοιμασίας της βάσης.



Εικόνα 19: Έδραση με Κοχλιωτό Βύσμα

- Έδραση με Probe

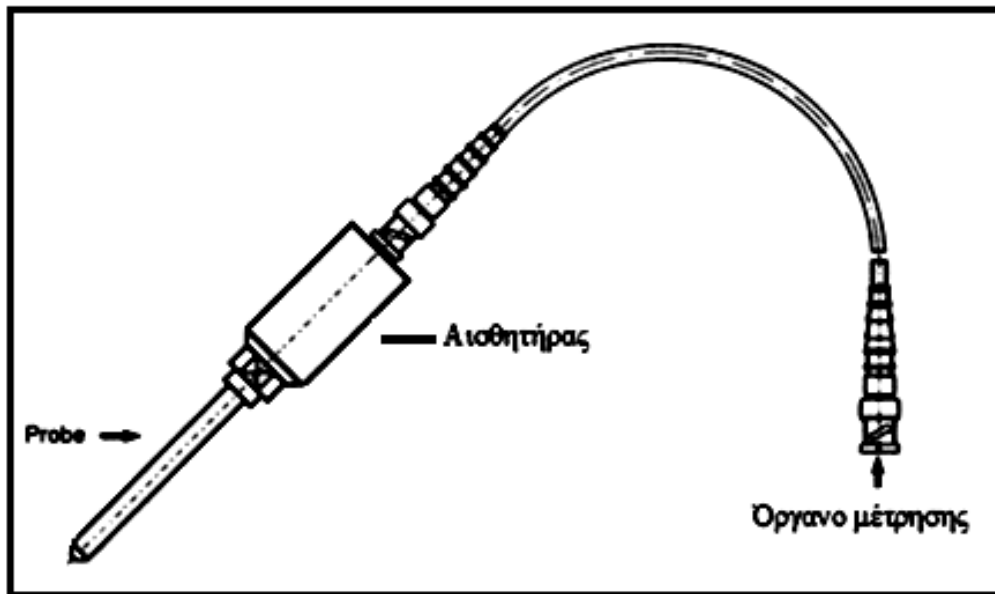
Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε σημεία που η πρόσβαση είναι δύσκολη. Σε αυτή την περίπτωση βιδώνουμε στο αισθητήριο μια αλουμινένια ακίδα ή στέλεχος probe και πιέζουμε σταθερά την ακίδα στο σημείο μέτρησης. Η μέθοδος αυτή δίνει ταχείς μετρήσεις χωρίς όμως μεγάλη ακρίβεια, διότι είναι δύσκολο να κρατάμε την ακίδα με σταθερή πίεση και επίσης η καμπύλη απόκρισης του αισθητήρα ελαττώνεται μέχρι περίπου 500Hz (30.000 RPM), λόγω της μεταλλικής μάζας και του μήκους του probe. Συνιστάται πάντως η χρήση κάτω διαβατού φίλτρου που περιορίζει όμως το εύρος των μετρήσεων σε 0-1000 Hz.

Πλεονεκτήματα:

- 1) Ταχείς μετρήσεις.
- 2) Πρόσβαση σε δύσκολα σημεία.

Μειονεκτήματα

- 1) Μετρήσεις χωρίς μεγάλη ακρίβεια.



Εικόνα 20: Έδραση με Probe

Αυτοί είναι οι τρεις σημαντικότεροι μέθοδοι έδρασης του αισθητήρα στο σημείο μέτρησης. Βέβαια υπάρχουν και άλλοι τρόποι που δεν χρησιμοποιούνται πολύ στην μηχανολογία. Για παράδειγμα, η έδραση με κερί, η έδραση με αυτοκόλλητη επιφάνεια, η έδραση με κόλα και η έδραση με μεταλλική ακίνητη βάση (Κανδύλης, 2007 β).

3.6. Εμφάνιση δονήσεων λόγω της ύπαρξης κάποιας δυσλειτουργίας στην μηχανή.

3.6.1. Πηγές δονήσεων.

Σε όλες τις περιπτώσεις που εμφανίζονται δονήσεις έχουμε κακό σχεδιασμό κάποιου εξαρτήματος ή κάποια κακή κατασκευή. Με άλλα λόγια, οι ατέλειες είναι οι πηγές δόνησης. Μια τέλεια μηχανή δεν θα παρήγαγε καμία δόνηση κατά τη λειτουργία της. Κάθε ατέλεια σημαίνει και μια πηγή δόνησης. Ο προσδιορισμός της πηγής σημαίνει την εύρεση μιας συχνότητας η οποία δημιουργείται από μια συγκεκριμένη βλάβη, που τελικά θα μας οδηγήσει στην πηγή της. Το μέγεθος της δόνησης σε αυτή τη συχνότητα μετριέται με κατάλληλα όργανα, και αναλύεται από αναλυτές, οι οποίοι θα μας καθορίσουν το μέγεθος της βλάβης (Ξαγοράρης, 2008).

- **Αζυγοσταθμία**

Η αζυγοσταθμία είναι η πιο κοινή αιτία δόνησης και η ευκολότερη στο να εντοπιστεί. Εμφανίζεται όταν το κέντρο μάζας του συστήματος δεν ταυτίζεται με

το κέντρο της περιστροφής διότι έχουμε ανομοιόμορφη κατανομή μάζας στο σύστημά μας που μπορεί να οφείλεται είτε σε κατασκευαστικό σφάλμα, είτε σε λαθεμένη έκκεντρη προσθήκη βάρους. Η συχνότητα δόνησης στην οποία παρουσιάζεται η αζυγοσταθμία, είναι ακριβώς ίση με την συχνότητα της ταχύτητας περιστροφής με ένα εύρος ανάλογο προς το ποσό δυσαναλογίας. Τα αποτελέσματα του φαινομένου αυτού είναι κόπωση των ρουλεμάν λόγω των έντονα αναπτυσσόμενων ακτινικών και αξονικών δυνάμεων.

• Κακή ευθυγράμμιση

Η κακή ευθυγράμμιση των συνδέσμων είναι ένας όρος όπου οι άξονες της κινητήριας μηχανής και του υπόλοιπου συστήματος δε βρίσκονται σε ευθυγράμμιση. Πρέπει να σημειώσουμε πως με τον όρο της ευθυγράμμισης εννοούμε την κατακόρυφη, αλλά και οριζόντια ευθυγράμμιση του συστήματός μας. Η κακή ευθυγράμμιση εμφανίζεται στην περιοχή συχνοτήτων ως σειρά αρμονικών της ταχύτητας περιστροφής. Οι αρμονικές παρουσιάζονται λόγω της πίεσης που προκαλείται στον άξονα. Οι αρμονικές, στην πραγματικότητα, δεν είναι δονήσεις σε εκείνες τις συχνότητες, αλλά αποτέλεσμα της διαδικασίας παραγωγής ψηφιακών σημάτων όταν περιορίζεται η κίνηση.

Οι μηχανές κίνησης θερμαίνουν κατά τη λειτουργία τους και την οδηγούμενη μηχανή. Αυτή η αλλαγή θερμοκρασίας προκαλεί έμμεσα μια αλλαγή στη δόνηση και άρα και στις αρμονικές της στο φάσμα των συχνοτήτων.

Έτσι, μπορούμε να παρατηρήσουμε μια μικρή μεταβολή στις αρμονικές της ταχύτητας περιστροφής καθώς το σύστημα έρχεται στην θερμοκρασία λειτουργίας. Και σε αυτή την περίπτωση μιλάμε με σιγουριά για φαινόμενο κακής ευθυγράμμισης. Τα αποτελέσματα του φαινομένου αυτού είναι και πάλι κόπωση των ρουλεμάν λόγω των έντονα αναπτυσσόμενων ακτινικών και αξονικών δυνάμεων. Για αυτό το λόγο πρέπει πάντα να γίνεται μια καλή ευθυγράμμιση τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια.

• Συντονισμός

Κάθε αντικείμενο έχει μία φυσική συχνότητα η οποία εξαρτάται από τη μάζα του, την ακαμψία και την απόσβεση που παρουσιάζει. Κάθε ταλαντωτής μπορεί να ταλαντώνεται σε μία ή περισσότερες συχνότητες. Όταν το σύστημα διεγείρεται στιγμιαία, τότε αρχίζει η ταλάντωση η οποία συμβαίνει με συχνότητα που ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα του. Όταν η ταλάντωση είναι εξαναγκασμένη, η συχνότητά της είναι η συχνότητα του διεγέρτη. Όταν η συχνότητα του διεγέρτη ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή έχουμε συντονισμό.

Υπάρχει μια απλή μέθοδος για να προσδιοριστεί η φυσική συχνότητα οποιουδήποτε αντικειμένου, που ονομάζεται bump test. Με τη μέθοδο αυτή ένας αισθητήρας δόνησης τοποθετείται στο σώμα του οποίου ψάχνουμε την φυσική

συχνότητα. Χρησιμοποιώντας ένα σφυρί κρούσης χτυπάμε το αντικείμενο και μετρούμε το χρονικό σήμα με τον αισθητήρα και κάνουμε ανάλυση FFT. Η επικρατούσα συχνότητα που θα παρουσιαστεί στο φάσμα είναι η φυσική συχνότητα του αντικειμένου.

Οι υψηλές ταλαντώσεις του συντονισμού στις κρίσιμες ταχύτητες μπορούν να είναι καταστροφικές για οποιοδήποτε σύστημα και πρέπει να αποφεύγονται με κάθε κόστος. Συντονισμός μπορεί να προκληθεί σε θεμέλια, σε καλύμματα μηχανών, σε κιβώτια ταχυτήτων ή ακόμη και ιμάντες.

Οι φυσικές συχνότητες ενός συστήματος δεν μπορούν να εξαλειφθούν, αλλά μπορούν να μετακινηθούν σε άλλες συχνότητες με διάφορες μεθόδους. Επίσης δεν εξαρτώνται από την ταχύτητα και έτσι διευκολύνεται ο εντοπισμός τους.

• Δονήσεις ρουλεμάν

Τα περισσότερα όργανα μέτρησης δονήσεων δημιουργούνται ώστε να μπορούν να ελέγχονται τα ρουλεμάν τα οποία όμως σπάνια να βγουν ελαττωματικά από τα εργοστάσια παραγωγής τους. Παρ' όλα αυτά μπορούμε να συναντήσουμε ρουλεμάν, με μειωμένη διάρκεια ζωής για τους εξής λόγους:

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

Πίνακας 4: Παράγοντες που επηρεάζουν την ζωή των εδράνων κύλισης

Αρχικά, το ρουλεμάν εμφανίζει μια συχνότητα, την συχνότητα της ιδιοπεριστροφής του. Λόγο των παραπάνω παραγόντων παρουσιάζονται φθορές στα ρουλεμάν και κατά συνέπεια αρχίζει και η αύξηση της στάθμης των δονήσεων. Με την αύξηση των δονήσεων αρχίζει και η εμφάνιση τριών συχνοτήτων· η συχνότητα του εσωτερικού δακτυλίου, του εξωτερικού δακτυλίου και των σφαιρών. Με την εύρεση αυτών των συχνοτήτων μπορούμε να εντοπίσουμε και την φθορά των ρουλεμάν.

• Ελαττώματα οδοντωτών τροχών

-Συχνότητα εμπλοκής γραναζιών

Η συχνότητα εμπλοκής γραναζιών 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, το πλάτος μπορεί να γίνει σημαντικό. Εάν υπάρχει πρόβλημα στο γρανάζι το οποίο δεν επηρεάζει την σύμπλεξη (π.χ. έναρξη ρωγμής), μπορεί να μην δημιουργηθούν μεγαλύτερα πλάτη στην συχνότητα εμπλοκής. Τα μεγαλύτερα πλάτη στην συχνότητα εμπλοκής αποδεικνύουν 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.

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

- Φθορά δοντιών

Ένα χαρακτηριστικό της φθοράς των δοντιών των τροχών είναι έντονες φυσικές συχνότητες με πλευρικές γύρω τους. Αυτές έχουν μεταξύ τους απόσταση με την ταχύτητα περιστροφής του γραναζιού που έχει το πρόβλημα. Η συχνότητα εμπλοκής μπορεί να έχει αλλαγή στο πλάτος αλλά μπορεί και όχι. Εντούτοις υψηλού πλάτους πλευρικές συχνότητες της συχνότητας εμπλοκής συνήθως συμβαίνουν όταν η φθορά είναι παρούσα. Οι πλευρικές συχνότητες είναι καλύτερος δείκτης της φθοράς από σκέτη τη συχνότητα εμπλοκής.

- Φορτίο Οδόντων

Όταν το φορτίο σε ένα κιβώτιο οδοντωτών τροχών αυξάνεται, τότε και το πλάτος της συχνότητας σύμπλεξης είναι πολύ πιθανό να αυξηθεί. Υψηλά πλάτη στη συχνότητα εμπλοκής δεν καταδεικνύουν απαραίτητα πρόβλημα, ιδίως όταν οι

πλευρικές συχνότητες παραμένουν χαμηλές και οι φυσικές συχνότητες των οδόντων δεν έχουν διεγερθεί. Προτείνεται η ανάλυση φάσματος σε μία βαθμίδα οδοντωτών τροχών να γίνεται όταν αυτή μεταδίδει τη μέγιστη δυνατή ισχύ.

-Εκκεντρότητα οδοντωτού τροχού και υπερβολική χάρη συνεργασιμότητας.

Σαφώς υψηλό πλάτος των πλευρικών συχνοτήτων γύρω από την συχνότητα εμπλοκής συχνά υποδεικνύουν εκκεντρότητα του τροχού, υπερβολική χάρη της συνεργασιμότητας (backlash) ή κακή ευθυγράμμιση των ατράκτων που φέρουν τους τροχούς. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η περιστροφή ενός γραναζιού, μπορεί να επιφέρει σύμπτωση του πλάτους που παράγει ο ένας τροχός στην συχνότητα περιστροφής του άλλου. Αυτό μπορεί γίνει εμφανές και στο πεδίο του χρονικού σήματος. Η απόσταση των πλευρικών συχνοτήτων υποδεικνύει τον τροχό με το πρόβλημα. Μη κατάλληλο backlash επιφέρει λογικά αύξηση του πλάτους στην συχνότητα εμπλοκής και στις φυσικές συχνότητες περιστροφής των τροχών. Αν το πρόβλημα είναι το backlash, τα πλάτη της συχνότητας εμπλοκής πιθανόν να μειώνονται με την αύξηση του φορτίου.

- Κακή ευθυγράμμιση οδοντωτών τροχών

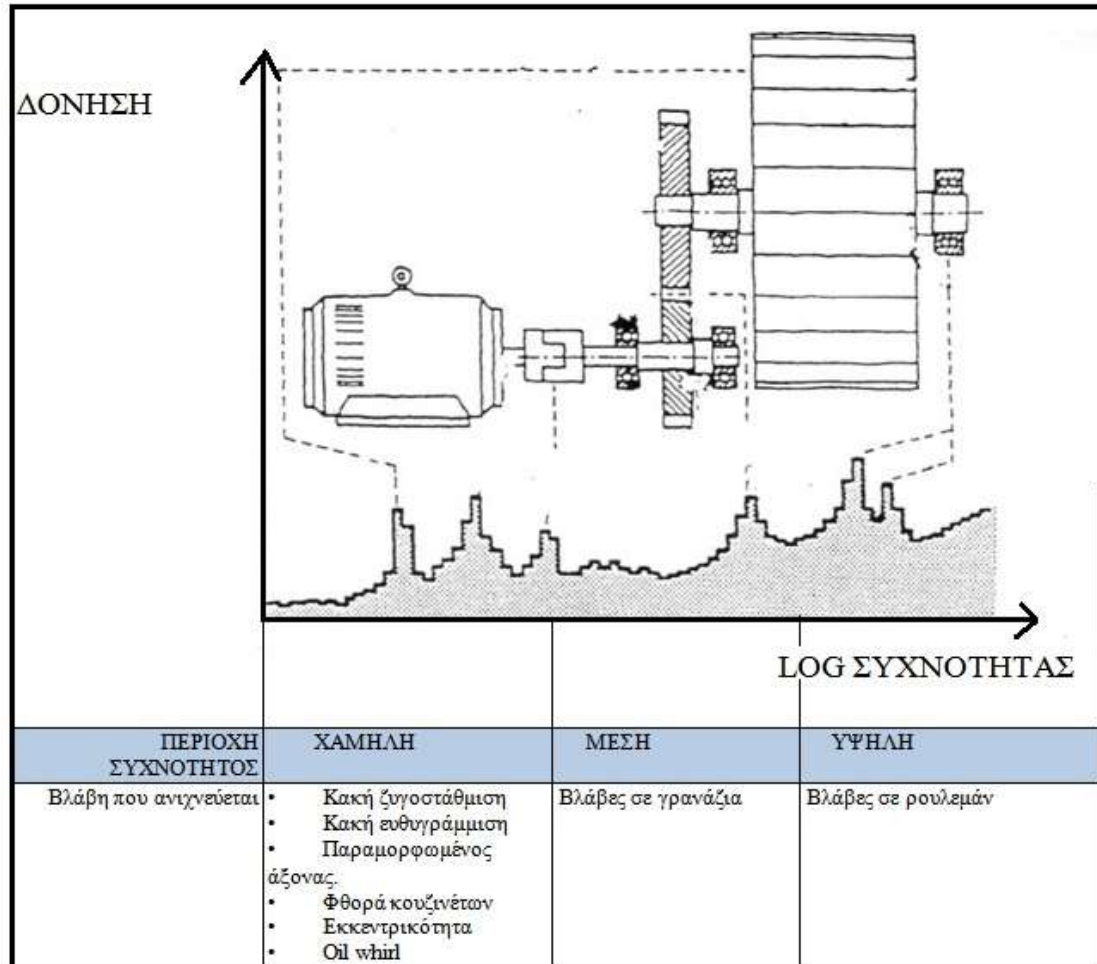
Η κακή ευθυγράμμιση των οδοντωτών τροχών σχεδόν πάντα διεγείρει από τη δεύτερη και πάνω σε σειρά αρμονικές της συχνότητας εμπλοκής, οι οποίες θα έχουν και πλευρικές συχνότητες. Συχνά έχουμε χαμηλά πλάτη στο $1x$ της συχνότητας εμπλοκής συχνότητας και υψηλότερα πλάτη στις αρμονικές της $2x$ και $3x$ της συχνότητας εμπλοκής. Είναι σημαντικό να κρατάμε το μέγιστο του εύρους του φάσματος πάνω από το $3x$ της συχνότητας εμπλοκής ώστε να έχουμε καλύτερη εποπτεία.

-Ραγισμένοι οδοντωτοί τροχοί ή με σπασμένους οδόντες

Ένας οδόντας ραγισμένος ή σπασμένος θα παράγει ταλάντωση με υψηλό πλάτος στο $1x$ της συχνότητας περιστροφής του και επιπλέον θα διεγείρει τη φυσική συχνότητα περιστροφής του τροχού σε απόσταση της ταχύτητας περιστροφής. Είναι ακόμη πιο εμφανές στο πεδίο του χρόνου (στο ηχητικό σήμα) όπου εμφανίζεται περιοδικός παλμός στο σήμα κάθε φορά που το προβληματικό δόντι προσπαθεί να συνεργαστεί με τον αντίστοιχο οδόντα του συνεργαζόμενου τροχού. Ο χρόνος μεταξύ των παλμών αντιστοιχεί στο $1/\text{ταχύτητα}$ του τροχού με το σπασμένο δόντι. Το πλάτος του παλμού στο ηχητικό σήμα πολλές φορές θα είναι αρκετά μεγαλύτερο από το πλάτος που θα έχει η συχνότητα $1x$ περιστροφής του.

3.6.2. Οι συχνότητες των πηγών των δονήσεων.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, όταν υπάρχει κάποιο πρόβλημα στην μηχανή, τότε εμφανίζονται δονήσεις που έχουν συγκεκριμένες συχνότητες ανάλογα με το είδος της βλάβης αλλά και την ποιότητα των διαφόρων συνεργαζόμενων στοιχείων (Κανδύλης, 2004 δ).



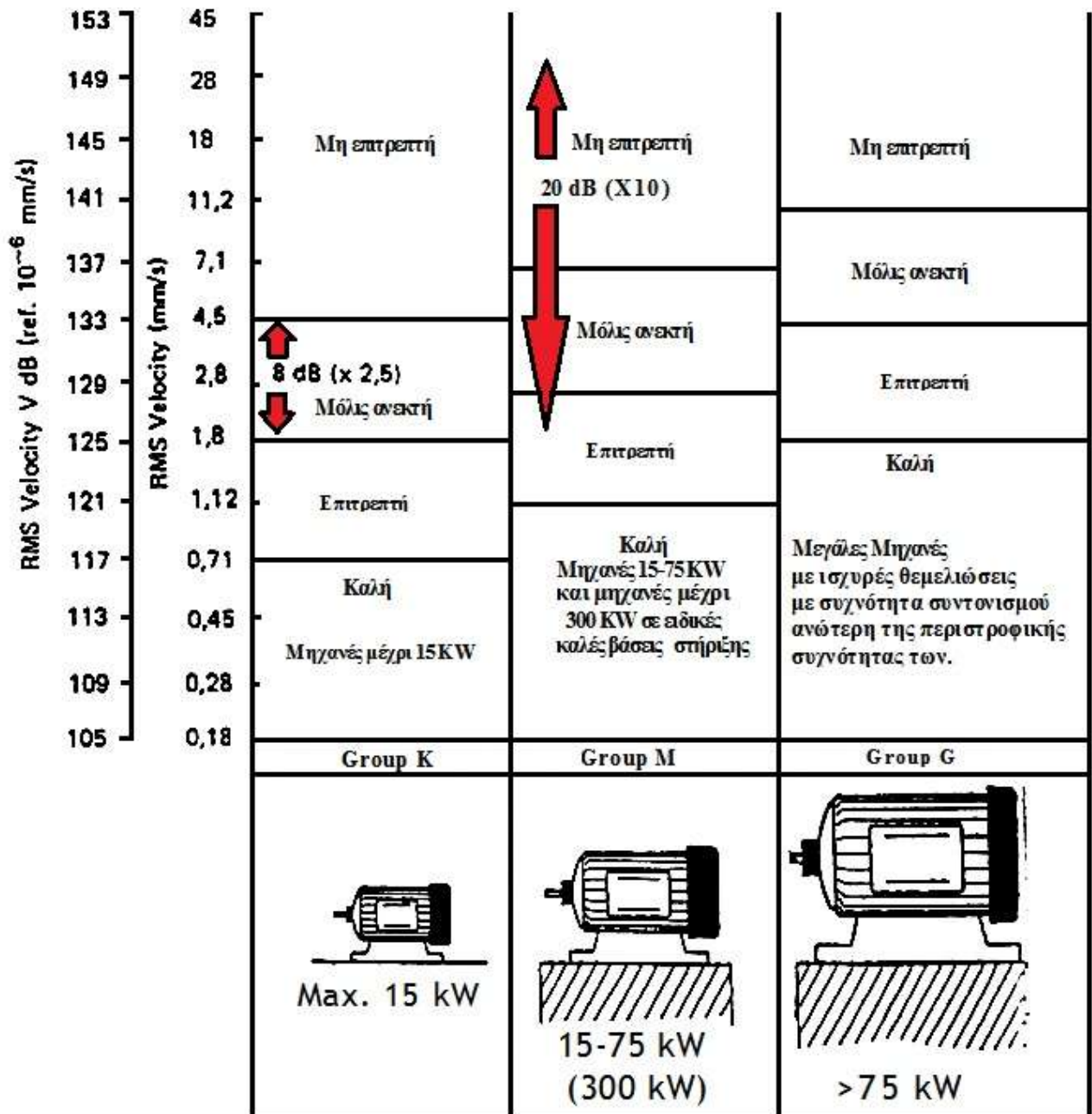
Πίνακας 5: Φάσμα συχνοτήτων μιας μηχανής. Στο κάτω μέρος φαίνονται οι περιοχές συχνοτήτων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, και που εμφανίζονται συχνά βλάβες (Κανδύλης, 2004 δ).

3.6.3. Εύρος συχνοτήτων

Η διάγνωση βλαβών μέσω της μέτρησης της στάθμης των δονήσεων είναι μία τεχνική που προέρχεται από την βιομηχανία. Για αυτό τον λόγο στην βιομηχανία υπάρχουν διεθνή στάνταρ π.χ. **ISO** και **ISO 10816**. Τα στάνταρ αυτά ορίζουν το πεδίο συχνοτήτων εντός του οποίου πρέπει να γίνουν οι μετρήσεις ανάλογα με το μέγεθος της μηχανής και τον τρόπο έδρασης της (Κανδύλης, 2007 β).

Αντίθετα, η διάγνωση βλαβών μέσω της μέτρησης της στάθμης των δονήσεων δεν είναι διαδεδομένη στην γεωργική μηχανολογία. Για αυτό το λόγο

δεν υπάρχουν αντίστοιχα στάνταρ τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν. Σε αυτή την περίπτωση συγκρίνουμε τις παλαιότερες τιμές που έχουμε πάρει από την ίδια μηχανή.

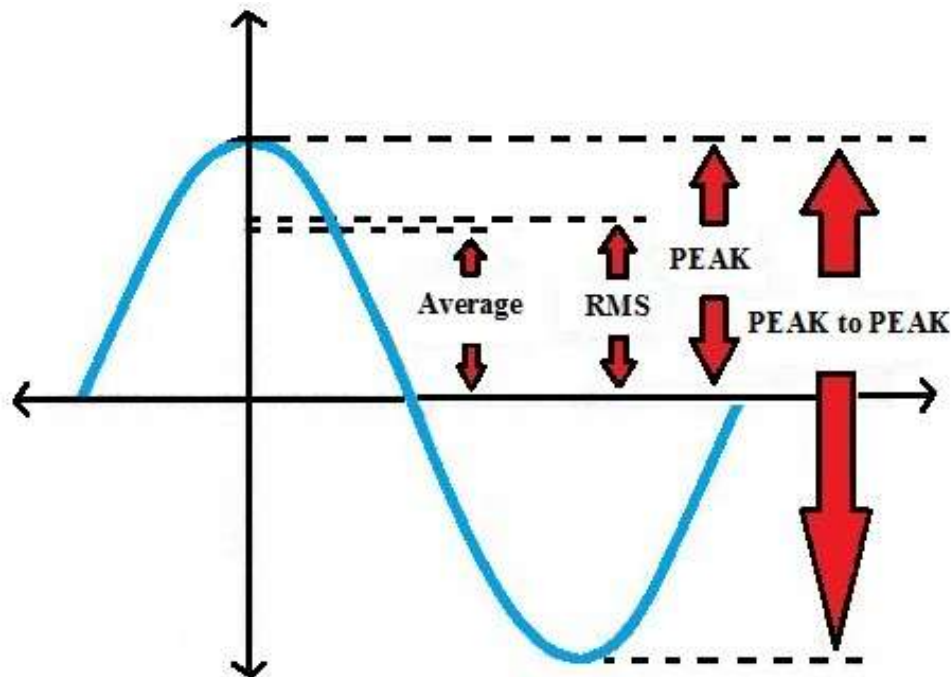


Πίνακας 6: Ταξινόμηση μηχανών σύμφωνα με τις στάθμες δονήσεων που προκαλούν κατά τους διεθνείς κανονισμούς VDI 2056.

3.6.4. Παράγοντες κλίμακας

Όταν συγκρίνουμε μετρήσεις με την ίδια μέθοδο, θα πρέπει να είμαστε σίγουροι ότι οι παράγοντες της κλίμακας μετρήσεων ταιριάζουν. Οι χρησιμοποιούμενοι παράγοντες είναι:

- ο παράγων κορυφής (**PEAK**)
- ο παράγων από κορυφή σε κορυφή (**PEAK to PEAK**)
- ο παράγων του μέσου όρου (**Average**)
- ο παράγων RMS



Εικόνα 21: Παράγοντες κλίμακας

Η τιμή του παράγοντα που ονομάζεται κορυφή (**PEAK**) αντιπροσωπεύει την απόσταση της κορυφής της κυματομορφής από την μηδενική θέση αναφοράς.

Η τιμή του παράγοντα που ονομάζεται από κορυφή σε κορυφή (**PEAK to PEAK**) αντιπροσωπεύει το πλάτος της κυματομορφής και μετράται από την άνω κορυφή μέχρι την κάτω κορυφή της καμπύλης. Η τιμή του παράγοντα του μέσου όρου (**Average**) εκφράζει το μέσο όρο του πλάτους της κυματομορφής.

Για ευκολία δίνουμε στο **PEAK** την τιμή 1.

$$\text{PEAK} = 1.0$$

$$\text{RMS} = 0.707 \times \text{PEAK}$$

$$\text{AVERAGE} = 0.637 \times \text{PEAK}$$

$$\text{PEAK TO PEAK} = 2 \times \text{PEAK}.$$

Conversion Factor	Peak-Peak Value	Peak Value	Effective Value	Average Value
Peak-Peak value	1	0,5	0,35	0,32
Peak value	2	1	0,71	0,64
Effective value	2,83	1,41	1	0,90
Average Value	3,14	1,57	1,11	1

Πίνακας 7: Τιμές που παίρνουν οι παράγοντες για peak=0.5

Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονίσουμε ότι για να έχουν νόημα οι συγκρίσεις των σημάτων που λαμβάνουμε θα πρέπει αυτά να αναφέρονται στο ίδιο εύρος συχνοτήτων και στους ίδιους παράγοντες κλίμακας.

Τα περισσότερα όργανα μετρούν την αξία RMS (μέση τετραγωνική τιμή). Έρευνες έδειξαν ότι το επίπεδο ταχυτήτων των δονήσεων **RMS**, που μετριέται σε φάσμα συχνότητας 3 έως 1000 Hz, είναι το πιο χρήσιμο για την γενική αξιολόγηση της κατάστασης των μηχανών. Ο τεχνικός όρος που χρησιμοποιείται είναι σοβαρότητα των δονήσεων (**Vibration Severity**), που ορίζεται ως ανωτέρω και που επιδεικνύεται σε mm/s ή in/s στο όργανο. Η σοβαρότητα των δονήσεων συσχετίζεται άμεσα με το ενεργειακό επίπεδο δόνησης μηχανών και αποτελεί έναν καλό δείκτη των καταστρεπτικών δυνάμεων που ενεργούν στη μηχανή.

4 Έλεγχος της κατάστασης των εδράνων κύλισης (ρουλεμάν)

4.1 Ορισμός.

Έδρανο στη μηχανολογία λέγεται το στοιχείο μιας μηχανής όπου στηρίζεται ένας άξονας και σκοπεύει στη μεταβίβαση του φορτίου που εφαρμόζεται, προς το έδαφος ή προς άλλες κατασκευές. Τα έδρανα εν γένει χρησιμεύουν σαν «υποδοχείς» των αξόνων και των ατράκτων ενώ επιτρέπουν τη σχετική κίνηση μεταξύ δύο κομματιών προς μία ή περισσότερες κατευθύνσεις με την ελάχιστη τριβή και παράλληλα αποτρέπουν την κίνηση προς την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου. Τα έδρανα λιπαίνονται για να διατηρούνται όσο το δυνατόν πιο χαμηλά οι απώλειες τριβών και οι θερμοκρασίες. Το μέγεθος της τριβής εμφανίζεται είτε ως τριβή κίνησης (που εμποδίζει την αντίθετης κατεύθυνσης σχετική κίνηση δύο επιφανειών), είτε ως τριβή ακινησίας στην περίπτωση που το εμπόδιο της τριβής είναι τέτοιου μεγέθους που καθιστά αδύνατη την κίνηση (www.metadosi-ischios.gr).

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες εδράνων:

- **Έδρανα ολίσθησης (κουζινέτα):** Λέγονται τα έδρανα στα οποία οι επιφάνειες είτε ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη, είτε χωρίζονται από ένα φιλμ λιπαντικού.
- **Έδρανα κύλισης (ρουλεμάν):** Λέγονται τα έδρανα των οποίων τα στοιχεία που δέχονται τη φόρτιση είναι κυλιόμενα σώματα. Στα ρουλεμάν χρησιμοποιούνται σφαιρίδια ή άλλα στοιχεία κύλισης μεταξύ των δακτυλίων του ρουλεμάν, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της τριβής. Τα στοιχεία κύλισης διαχωρίζονται και διατηρούνται στη θέση τους με κλωβούς ή άλλες διατάξεις συγκράτησης.



Εικόνα 22α: Έδρανο ολίσθησης



Εικόνα 22β: Έδρανο κύλισης

Τα πλεονεκτήματα των εδράνων κύλισης έναντι των εδράνων ολίσθησης είναι τα εξής:

- Χαμηλότερος συντελεστής τριβής κατά την εκκίνηση, κατά μέσο όρο $\mu=0,02$ έναντι 0,14 των εδράνων ολίσθησης.
- Εκκίνηση και στάση χωρίς φθορά.
- Δεν έχουν ανάγκη συντήρησης και η απαραίτητη ποσότητα λιπαντικού είναι ελάχιστη.
- Για την ίδια διάμετρο του στροφέα και το ίδιο πλάτος εδράνου έχουν μεγαλύτερο επιτρεπτό φορτίο.
- Δεν έχουν ανάγκη λειτουργίας προσαρμογής.
- Το υλικό, η σκληρότητα επιφάνειας και η τραχύτητα επιφάνειας του στροφέα δεν επηρεάζουν την αντοχή τους.
- Χαμηλότερο κόστος κατασκευής σε μικρές διαμέτρους στροφέων.

Τα μειονεκτήματα των εδράνων κύλισης έναντι των εδράνων ολίσθησης είναι τα εξής:

- Ευαισθησία σε κρουστικά φορτία και κραδασμούς .
- Δημιουργία σχετικά υψηλού θορύβου κατά τη λειτουργία.
- Περιορισμένη ταχύτητα περιστροφής κυρίως σε μεγάλες διαμέτρους λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων που αναπτύσσονται στα σώματα κύλισης και τα φορτίζουν επιπροσθέτως.
- Υψηλότερο κόστος κατασκευής σε μεγάλες διαμέτρους.
- Οποσδήποτε περιορισμένη διάρκεια ζωής.
- Ευαισθησία σε ακαθαρσίες (σκόνη, ρινίσματα μετάλλων κ.τ.λ.)

4.2 Τύποι ρουλεμάν.

Ανάλογα με τη διεύθυνση της δύναμης την οποία δέχεται ένα έδρανο κύλισης κατά τη λειτουργία του διακρίνουμε τρεις βασικές κατηγορίες ρουλεμάν:

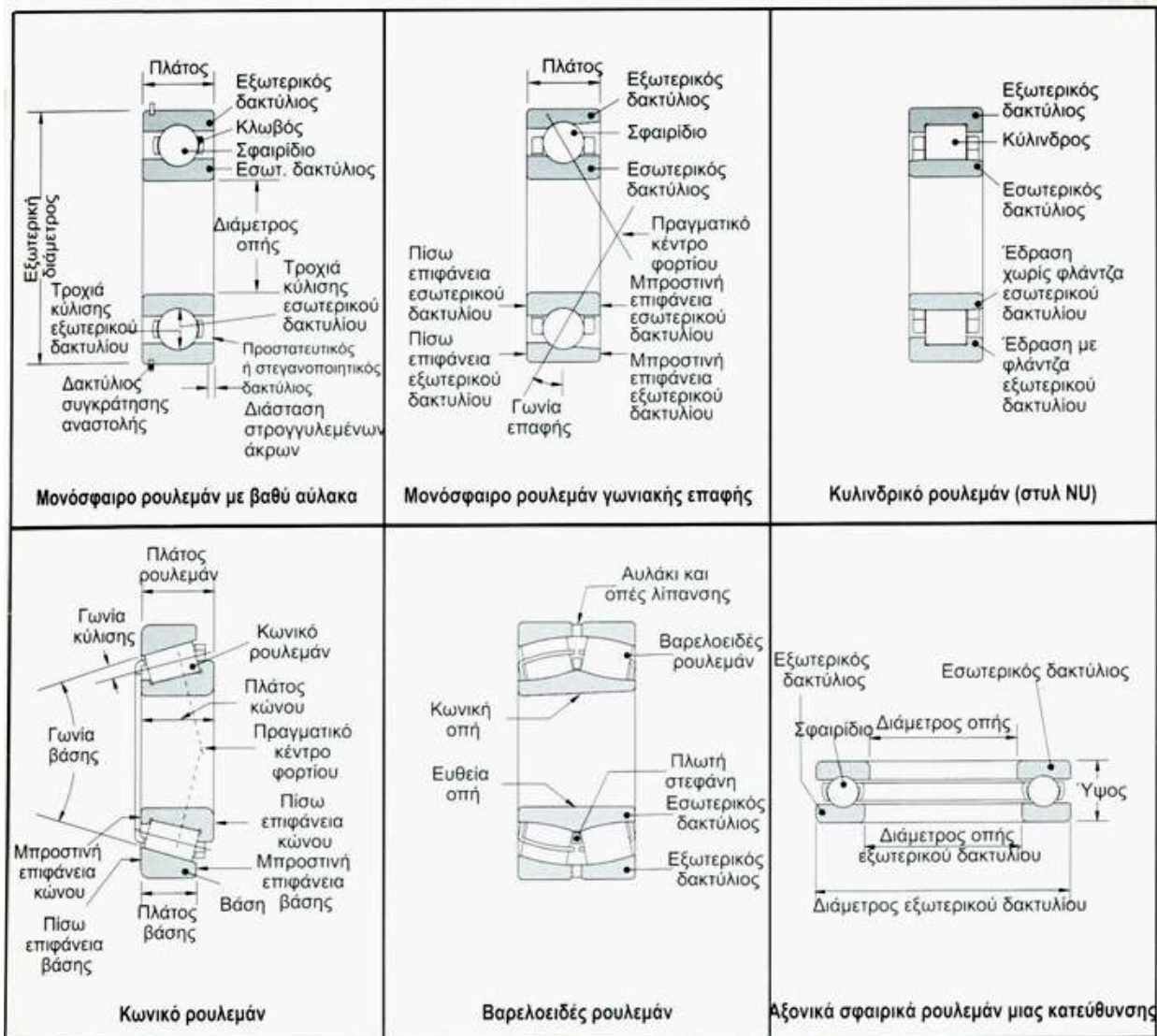
- Τα εγκάρσια ρουλεμάν (ακτινικά έδρανα)
- Τα κατά μήκος ρουλεμάν (αξονικά έδρανα).
- Τα ακτινικά αυλακωτά ρουλεμάν που δέχονται δυνάμεις και προς τις δύο διευθύνσεις.

Τα εγκάρσια έδρανα είναι κατάλληλα να περιλαμβάνουν κυρίως εγκάρσια φορτία και έχουν πάντοτε δακτυλιοειδή μορφή, ενώ τα αξονικά παραλαμβάνουν μόνο αξονικά φορτία και έχουν δισκοειδή μορφή. Τα έδρανα συνδυασμένης φόρτισης μπορούν να παραλαμβάνουν και αξονικά και εγκάρσια φορτία και έχουν δακτυλιοειδή ή δισκοειδή μορφή.

Ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της κάθε εφαρμογής προκύπτει η ανάγκη για σχεδιασμό διαφόρων μορφών ρουλεμάν. Έτσι λοιπόν υπάρχουν:

- Σφαιρικά.
- Κυλινδρικά.
- Κωνικά
- Βαρελοειδή
- Βελονοειδή

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται λεπτομερώς η κατασκευή έξι από τους συνηθέστερους τύπους ρουλεμάν με στοιχεία κύλισης .



Πίνακας 8: Περιγραφή της κατασκευής έξι τύπων ρουλεμάν(Εγχειρίδιο Ρουλεμάν NSK).



Τύπος ρουλεμάν	Σειρά	Γράφημα	Ακτινικά φορτία	Αξονική φορτία	Συνδυασμένα φορτία	Υψηλές ταχύτητες	Γωνιακή κακή ευθυγράμμιση	
			Καλή	Αρκετά καλή 2 κατευθύνσεις	Καλή	Καλή	Αριστη	Καλή
Σφαιρικό ρουλεμάν με βαθύ αύλακα	600-6000-6200-6300-16000-16100-6800-6900-BL		Καλή	Αρκετά καλή 2 κατευθύνσεις	Καλή	Καλή	Αριστη	Καλή
Δίσφαιρο ρουλεμάν με βαθύ αύλακα	4200-4300		Καλή	Αρκετά καλή 2 κατευθύνσεις	Αρκετά καλή	Αρκετά καλή	Αρκετά καλή	Κακή
Σφαιρικό ρουλεμάν γωνιακής επαφής	7200-7300		Καλή	Καλή 1 κατεύθυνση μόνο	Καλή	Καλή	Αριστη	Κακή
Δίσφαιρο ρουλεμάν γωνιακής επαφής	3200-3300-5200-5300		Καλή	Καλή 2 κατευθύνσεις	Καλή	Καλή	Αρκετά καλή	Κακή
Σφαιρικό ρουλεμάν επαφής 4 σημείων	QJ200-QJ300		Καλή	Καλή 2 κατευθύνσεις	Αρκετά καλή	Καλή	Καλή	Κακή
Αυτορυθμιζόμενο σφαιρικό ρουλεμάν	1200-1300-2200-2300		Αρκετά καλή	Αρκετά καλή 2 κατευθύνσεις	Κακή	Καλή	Καλή	Αριστη
Κυλινδρικό ρουλεμάν	NU-N200-300-400-1000-2200-2300		Καλή	Καμία	Καμία	Καμία	Αριστη	Αρκετά καλή
Κυλινδρικό ρουλεμάν	NJ-NF200-300-400-1000-2200-2300		Καλή	Αρκετά καλή 1 κατεύθυνση μόνο	Αρκετά καλή	Καλή	Καλή	Αρκετά καλή
Κυλινδρικό ρουλεμάν	NUP200-300-400-1000-2200-2301		Καλή	Αρκετά καλή 2 κατευθύνσεις	Αρκετά καλή	Καλή	Καλή	Αρκετά καλή
Κωνικό ρουλεμάν	HR30200-30300-30300DJ-32000-32200-32300-33000-33100-33200		Καλή	Καλή 1 κατεύθυνση μόνο	Καλή	Καλή	Αρκετά καλή	Αρκετά καλή
Βαρελοειδές ρουλεμάν	21300-22200-22300-23000-23100-23200-23900-24000-24100		Αριστη	Αρκετά καλή 2 κατευθύνσεις	Καλή	Καλή	Αρκετά καλή	Αριστη
Αξονικό σφαιρικό ρουλεμάν	51100-51200-51300-51400-52200-52300-52400		Καμία	Καλή 1 κατεύθυνση μόνο	Καμία	Κακή	Κακή	Καμία

Πίνακας 9: Οι διάφοροι τύποι ρουλεμάν και οι επιδόσεις τους(Εγχειρίδιο Ρουλεμάν NSK).

4.3 Τα υλικά κατασκευής των ρουλεμάν.

Για την κατασκευή των ρουλεμάν χρησιμοποιούνται ειδικοί χάλυβες αρίστης ποιότητας και υψηλής αντοχής. Η υψηλή φόρτιση των εδράνων κύλισης απαιτεί την πλήρη βαφή των δακτυλίων ή των δίσκων και των σωμάτων κύλισης. Για αυτό το λόγο όλοι οι χάλυβες εδράνων έχουν περιεκτικότητα σε C > 0,3 % ώστε ακόμα και ο πυρήνας των σωμάτων κύλισης να μπορεί να σκληρυνθεί. Οι κλωβοί κατασκευάζονται συνήθως από φύλλα χάλυβα. Για υψηλό αριθμό στροφών και χαμηλό συντελεστή τριβής κατασκευάζονται από ορείχαλκο ή και από συνθετικά υλικά.

4.4 Η φροντίδα και η συντήρηση των ρουλεμάν.

4.4.1 Λίπανση.

Η λίπανση είναι απαραίτητη για να μειωθεί η τριβή και η φθορά στο εσωτερικό του ρουλεμάν. Με σωστή λίπανση και πρακτικές, το ρουλεμάν θα μπορέσει να φθάσει την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του.

4.4.1α Πλεονεκτήματα λίπανσης.

Με τη λίπανση επιτυγχάνονται τα εξής:

- **Μείωση τριβής και φθοράς:** Αποφεύγεται η απευθείας επαφή μεταλλικών μερών μεταξύ των δακτυλίων, των στοιχείων κύλισης και του κλωβού του ρουλεμάν χάρη σε ένα λεπτό στρώμα ελαίου που ελαττώνει την τριβή και την παραγόμενη θερμότητα στα σημεία επαφής.
- **Παράταση διάρκειας ζωής ρουλεμάν:** Η αντοχή των ρουλεμάν σε κόπωση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ιξώδες και το πάχος του στρώματος του λιπαντικού. Τα χονδρά στρώματα λιπαντικού βελτιώνουν την αντοχή των ρουλεμάν σε κόπωση.
- **Ψύξη:** Ψύξη των κινούμενων εξαρτημάτων και απαγωγή της θερμότητας που παράγεται λόγω τριβών και λόγω διαδικασίας. Η θερμότητα αποβάλλεται από την επιφάνεια του ίδιου μηχανήματος με ή χωρίς την βοήθεια ρεύματος αέρα ή από την ανακυκλοφορία του λιπαντικού και την αποβολή θερμότητας σε ψυγείο λαδιού.
- **Καθαρισμός των ρουλεμάν:** Με τη σωστή λίπανση αποφεύγεται η διείσδυση ξένων υλικών στο ρουλεμάν και παρέχεται προστασία από διάβρωση ή σκουριά. Τα σωματίδια συνήθως είναι βαρύτερα του λιπαντικού και συγκεντρώνονται στον πυθμένα του μηχανήματος ή της δεξαμενής του λιπαντικού. Εάν υπάρχουν μεταλλικά σωματίδια, αυτά συγκεντρώνονται σε ειδικές μαγνητικές τάπες.

- **Μείωση των δονήσεων:** Απορρόφηση κρούσεων και χτυπημάτων που δημιουργούνται κατά την περιστροφή των οδοντωτών τροχών λόγω λιπαντικού στρώματος που έχει παγιδευτεί ανάμεσα στους οδόντες εμπλεκόμενων οδοντωτών τροχών. Απορρόφηση κρούσεων και χτυπημάτων που δημιουργούνται κατά την περιστροφή των οδοντωτών τροχών λόγω λιπαντικού στρώματος που έχει παγιδευτεί ανάμεσα στους οδόντες εμπλεκόμενων οδοντωτών τροχών.

4.4.1β Κύριοι μέθοδοι λίπανσης.

Η λίπανση επιτυγχάνεται με χρήση ελαίου ή γράσου. Η πλέον ικανοποιητική απόδοση του ρουλεμάν επιτυγχάνεται όταν επιλεγθεί η καταλληλότερη μέθοδος λίπανσης για τη συγκεκριμένη κάθε φορά εφαρμογή. Φυσικά, η επιλογή αυτή εξαρτάται και από τις συνθήκες στις οποίες θα λειτουργεί το ρουλεμάν.

Η λίπανση με έλαιο υπερέχει ως προς την απόδοση της λίπανσης, ωστόσο η λίπανση με γράσο επιτρέπει απλούστερες κατασκευές γύρω από τα ρουλεμάν. Στον παρακάτω πίνακα γίνεται μια σύγκριση μεταξύ λίπανσης με έλαιο και γράσο.

Παράγοντας λειτουργίας	Λίπανση με γράσο	Λίπανση με έλαιο
Κατασκευή εδράνου και μέθοδος στεγανοποίησης	Απλή	Ενδεχομένως πολύπλοκη. Απαιτείται προσυντήρηση.
Ταχύτητα	Η οριακή ταχύτητα ισούται με το 65% έως 80% της αντίστοιχης για τη λίπανση με έλαιο	Υψηλή οριακή ταχύτητα
Αποτέλεσμα ψύξης	Κακό	Η μεταφορά θερμότητας είναι δυνατή με χρήση συστήματος λίπανσης με εξαναγκασμένη κυκλοφορία ελαίου
Ρευστότητα	Κακή	Καλή
Πλήρης αντικατάσταση λιπαντικού	Μερικές φορές δύσκολη	Εύκολη
Απομάκρυνση ξένης ύλης	Η απομάκρυνση σωματιδίων από το γράσο δεν είναι δυνατή	Εύκολη
Ρύπανση εξωτερικών επιφανειών λόγω διαρροής	Ο περιβάλλον χώρος σπάνια ρυπαίνεται λόγω διαρροής	Συχνές διαρροές αν δεν ληφθούν κατάλληλα μέτρα προστασίας. Δεν είναι κατάλληλη αν πρέπει να αποφευχθεί η ρύπανση της εξωτερικής επιφάνειας

Πίνακας 10: Κύριοι μέθοδοι λίπανσης(Εγχειρίδιο Ρουλεμάν NSK).

4.4.2. Τοποθέτηση των ρουλεμάν.

Τα ρουλεμάν είναι εξαρτήματα μηχανημάτων υψηλής ακρίβειας και απαιτούν προσεκτικό χειρισμό. Τυχόν μη προσεκτικοί χειρισμοί κατά την τοποθέτηση ή την αφαίρεση μπορεί να προκαλέσουν σοβαρό ατύχημα, τραυματισμό ή υλική ζημία. Κατά την τοποθέτηση ή αφαίρεση των ρουλεμάν, πρέπει να εφαρμόζονται οι παρακάτω πρακτικές:

- Καθαρισμός σχετικών εξαρτημάτων
- Διαστάσεις και τελείωμα σχετικών εξαρτημάτων
- Διαδικασίες τοποθέτησης
- Έλεγχος μετά την τοποθέτηση
- Παροχή λιπαντικών

Οι μέθοδοι τοποθέτησης των ρουλεμάν εξαρτώνται από τον τύπο του ρουλεμάν και τον τύπο της συναρμογής. Καθώς τα ρουλεμάν χρησιμοποιούνται συνήθως με περιστρεφόμενους άξονες, οι εσωτερικοί δακτύλιοι απαιτούν σφικτή συναρμογή. Τα ρουλεμάν με κυλινδρικές οπές τοποθετούνται συνήθως με πίεση μέσω του εσωτερικού δακτυλίου πάνω στους άξονες (συναρμογή με πίεση) ή με θέρμανση ώστε να διασταλεί η διάμετρος τους (συναρμογή με σύσφιγξη). Τα ρουλεμάν με κωνικές οπές μπορούν να τοποθετηθούν απευθείας πάνω σε κωνικούς άξονες ή πάνω σε κυλινδρικούς άξονες με χρήση κωνικών χιτωνίων.

Τα ρουλεμάν τοποθετούνται συνήθως μέσα σε έδρανα με ελεύθερη συναρμογή. Ωστόσο, αν ο εξωτερικός δακτύλιος έχει σφικτή συναρμογή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρέσα. Αφού ολοκληρωθεί η τοποθέτηση, πρέπει να εκτελεστεί δοκιμή λειτουργίας για να προσδιοριστεί αν έχει τοποθετηθεί σωστά το ρουλεμάν.

4.5 Η φθορά των ρουλεμάν.

Η διάρκεια ζωής ενός εδράνου διατυπώνεται και ως «δυναμική ικανότητα έδρασης» και είναι ο αριθμός των περιστροφών ή οι ώρες λειτουργίας που αντέχει το έδρανο χωρίς ένδειξη μιας καταπόνησης του υλικού κατασκευής είτε στους δακτυλίους, είτε στους δίσκους, είτε στα σώματα κύλισης. Η καταπόνηση του υλικού μπορεί να φανεί στην αρχή με μικρές σχισμές οι οποίες αργότερα μπορούν να φτάσουν σε θρυμματισμούς(www.metadosi-ischios.gr).

Για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής ενός εδράνου καθορίζεται ένας δυναμικός συντελεστής έδρασης. Ο συντελεστής αυτός ορίζεται σαν η ισοδύναμη δύναμη φόρτισης κατά την οποία το 90% όλων των εδράνων φτάνουν σε μια ονομαστική διάρκεια ζωής του ενός εκατομμυρίου περιστροφών.

Αν τώρα η εμφανιζόμενη κατά την εκάστοτε λειτουργία ισοδύναμη δύναμη φόρτισης είναι μικρότερη από το δυναμικό συντελεστή έδρασης, τότε αυτό σημαίνει πως η διάρκεια ζωής του εδράνου θα ξεπεράσει το ένα εκατομμύριο περιστροφές.

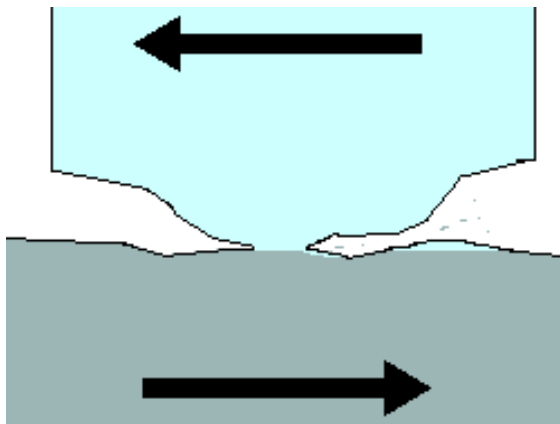
Πάντως ο συντελεστής έδρασης μπορεί να έχει διαφορετικές τιμές για περιπτώσεις λειτουργίας που έχουν όμοιες φορτίσεις αλλά συνθήκες λειτουργίας που δημιουργούν διαφοροποιήσεις στη συνολική λειτουργική καταπόνηση τους.

Ένα άλλο πρόβλημα συντήρησης των ρουλεμάν προκύπτει από την καταπόνησή τους σε διάβρωση. Για αυτό οι κατασκευαστές των ρουλεμάν έχουν εξοπλίσει τα σύγχρονα ρουλεμάν με μηχανισμούς στεγανοποίησής.

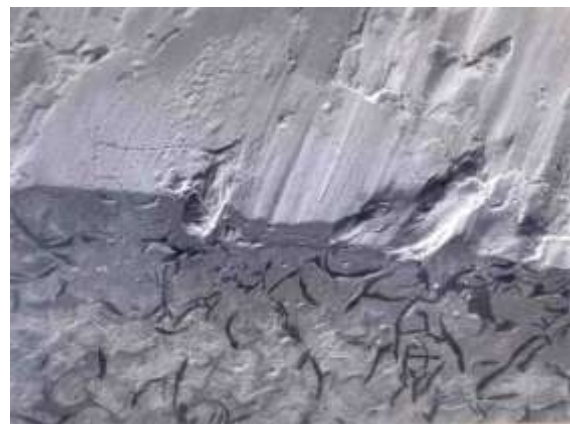
Οι βασικότεροι τύποι φθοράς που εμφανίζονται στα ρουλεμάν είναι:

- Φθορά πρόσφυσης (Adhesive wear)

Η φθορά πρόσφυσης εμφανίζεται όταν γλιστρούν δύο επιφάνειες, η μια ενάντια στην άλλη. Με την προοριζόμενη κίνηση όμως αποσπώνται ψήγματα από τη μία επιφάνεια και προσκολλώνται στην άλλη. Προκύπτει από την ισχυρή συγκολλητική οργάνωση δυνάμεων όταν έρχονται δύο υλικά σε επαφή. Εμφανίζεται συνήθως όταν η λίπανση είναι ανεπαρκής. Οδηγεί στην αποκαλούμενη σημείωση μεταφοράς μετάλλων συνήθως. Η επαφή των μετάλλων πρέπει να αποτραπεί για να αντιμετωπιστεί η φθορά πρόσφυσης. Αυτό μπορεί να γίνει με την εφαρμογή ενός λεπτού στρώματος λιπαντικού ή με την εφαρμογή ενός προστατευτικού στρώματος μετάλλων όπως: τα νιτρώδη, τα οξειδία, τα καρβίδια.



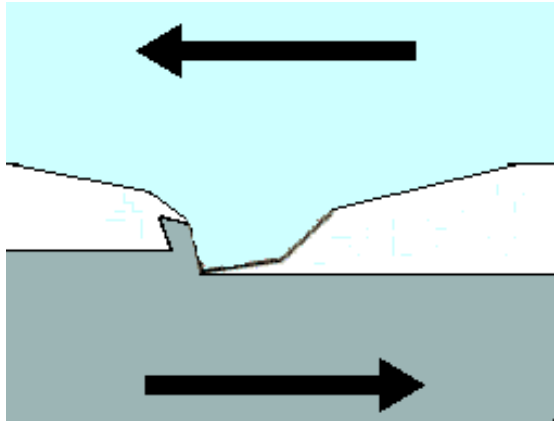
Εικόνα 23α: Φθορά πρόσφυσης



Εικόνα 23β: Φθορά πρόσφυσης

- Λειαντική φθορά (Abrasive wear)

Αυτή η φθορά εμφανίζεται όταν σκληρά και ξένα μόρια όπως τα μεταλλικά ρινίσματα ή μεταλλικά οξειδία και σκόνη από το περιβάλλον είναι παρόντα μεταξύ των δύο επιφανειών. Η λειαντική φθορά μπορεί να προκληθεί από μια τραχιά και σκληρή επιφάνεια που κινείται σε μια μαλακότερη επιφάνεια. Αυτή η φθορά προκαλεί αυλάκια στην μαλακότερη επιφάνεια. Το υλικό που απομακρύνεται έχει μορφή ελεύθερων ψηγμάτων φθοράς. Αυτά τα μόρια αφαιρούν υλικό και από τις δύο επιφάνειες.

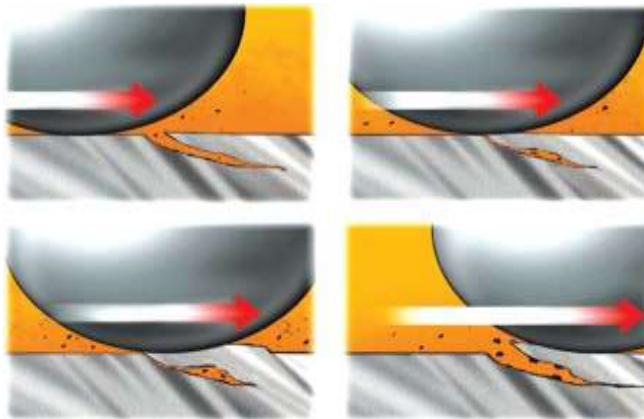


Εικόνα 24α: Λειαντική φθορά

Εικόνα 24β: Λειαντική φθορά

- Φθορά λόγω επιφανειακής κόπωσης (fatigue wear)

Οι επιφάνειες των ρουλεμάν υποβάλλονται συχνά σε επιφανειακή κόπωση λόγω της επαναληπτικής φόρτισης και αποφόρτισης. Αρχικά, λόγω των ξένων μορίων που παγιδεύονται ανάμεσα στις δύο κινούμενες επιφάνειες εμφανίζονται βαθουλώματα στις επιφάνειες των ρουλεμάν. Αργότερα, οι επιφάνειες παρουσιάζουν ρωγμές με αποτέλεσμα να μειώνεται η διάρκεια ζωής των ρουλεμάν.



Εικόνα 25: Φθορά λόγω επιφανειακής κόπωσης

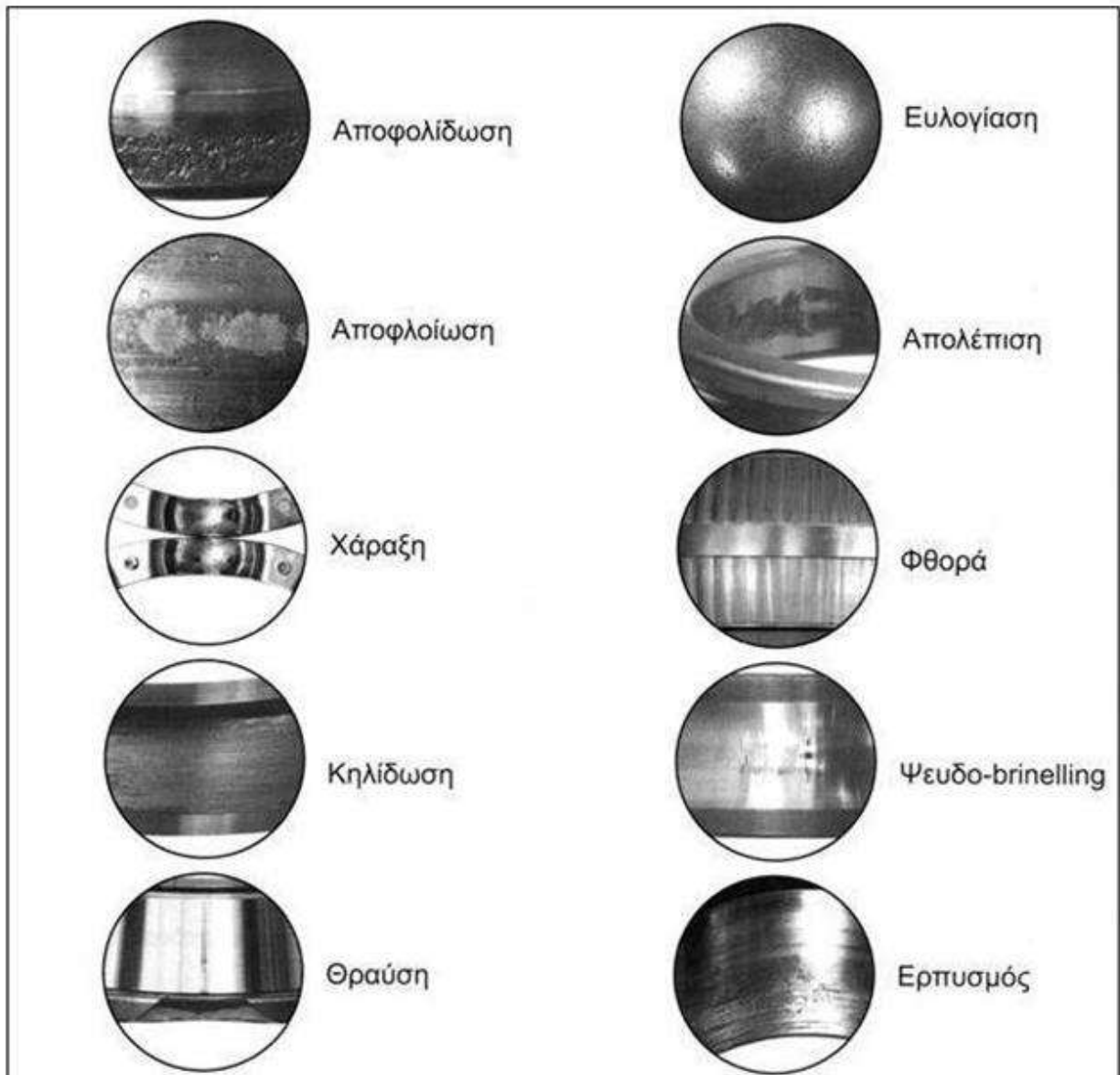
- Παλμική διάβρωση (Fretting wear)

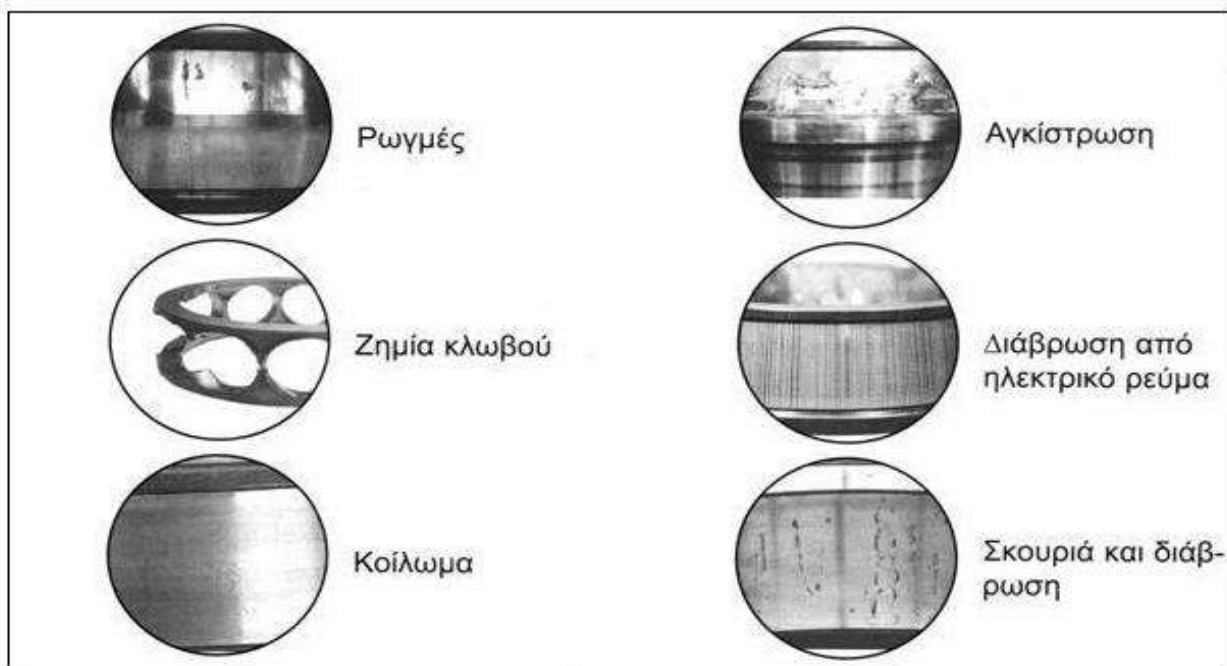
Εμφανίζεται όταν στο ζεύγος τριβής υπάρχει παλινδρομική, εφαιπόμενη μετατόπιση μικρού πλάτους. Άλλη μία επικίνδυνη κατάσταση προκύπτει όταν δημιουργούνται και στις δύο επιφάνειες ρήγματα. Αυτό ονομάζεται παλμική

διάβρωση και το συναντάμε στα ρουλεμάν που μπορεί να τα οδηγήσει σε μόνιμη βλάβη και επομένως σε αστοχία.



Εικόνα 26: Παλμική διάβρωση





Εικόνα 27: Χαρακτηριστικές φθορές των ρουλεμάν.

Ανωμαλίες		Πιθανές αιτίες	Μέτρα αντιμετώπισης
Θόρυβος	Δυνατός μεταλλικός ήχος	Μη φυσιολογικό φορτίο	Διόρθωση συναρμολόγησης, εσωτερικού διακένου, προφόρτισης, θέσης έδρασης εδράνου κλπ.
		Εσφαλμένη τοποθέτηση	Διόρθωση ευθυγράμμισης άξονα και εδράνου, ακρίβειας μεθόδου τοποθέτησης.
		Ανεπαρκής ποσότητα ή ακατάλληλο λιπαντικό	Αναπλήρωση λιπαντικού ή επιλογή κατάλληλου λιπαντικού
		Θόρυβος τριξίματος	Αντικατάσταση με ρουλεμάν χαμηλού θορύβου, επιλογή ρουλεμάν μικρού διακένου.
		Ολίσθηση σφαιριδίων	Ρύθμιση προφόρτισης, επιλογή ρουλεμάν μικρού διακένου ή χρήση πιο μαλακού γράσου.
	Δυνατός κανονικός ήχος	Έπαφή περιστρεφόμενων μερών	Διόρθωση στεγανοποιητικού λαβυρινθού κλπ
		Ελαττώματα, διάβρωση ή γρατσουνιές πάνω στις τροχιές κύλισης	Αντικατάσταση ρουλεμάν, καθαρισμός, βελτίωση στεγανοποιητικών και χρήση καθαρού λιπαντικού.
		Φθορά	Αντικατάσταση ρουλεμάν και προσεκτικός χειρισμός.
	Μη φυσιολογικός ήχος	Αποφολίδωση στις τροχιές κύλισης	Αντικατάσταση ρουλεμάν
		Υπερβολικό διάκενο	Διόρθωση συναρμολόγησης και διακένου και διόρθωση προφόρτισης.
Διεσίδωση ξένων σωματιδίων		Αντικατάσταση ρουλεμάν, καθαρισμός, βελτίωση στεγανοποιητικών και επαναλίπανση με χρήση καθαρού λιπαντικού.	
Ελαττώματα ή αποφολίδωση στις επιφάνειες των σφαιριδίων		Αντικατάσταση ρουλεμάν	
	Υπερβολική ποσότητα λιπαντικού	Μειώστε την ποσότητα του λιπαντικού, επιλέξτε πιο σκληρό γράσο.	
Μη φυσιολογική αύξηση της θερμοκρασίας	Ανεπαρκής ποσότητα ή ακατάλληλο λιπαντικό	Αναπλήρωση λιπαντικού ή επιλογή κατάλληλου λιπαντικού	
	Μη φυσιολογικό φορτίο	Διόρθωση συναρμολόγησης, εσωτερικού διακένου, προφόρτισης, θέσης έδρασης εδράνου.	
	Εσφαλμένη τοποθέτηση	Διόρθωση ευθυγράμμισης άξονα και εδράνου, ακρίβειας τοποθέτησης ή μεθόδου τοποθέτησης.	
	Ερπυσμός επιφανειών που έχουν συναρμοσθεί	Διόρθωση στεγανοποιητικών, αντικατάσταση ρουλεμάν, διόρθωση συναρμολόγησης ή τοποθέτησης υπερβολική τριβή στεγανοποιητικών.	
Κραδασμοί	Φθορά	Αντικατάσταση ρουλεμάν και προσεκτικός χειρισμός.	
	Αποφολίδωση	Αντικατάσταση ρουλεμάν	
	Εσφαλμένη τοποθέτηση	Διόρθωση ευθυγράμμισης μεταξύ άξονα και έδρασης εδράνου ή της πλευράς του αποστάτη.	
	Διεσίδωση ξένων σωματιδίων	Αντικατάσταση ρουλεμάν, καθαρισμός, διόρθωση στεγανοποιητικών.	
Διαρροή ή αποχρωματισμός λιπαντικού	Υπερβολική ποσότητα λιπαντικού, Διεσίδωση ξένων σωματιδίων ή αποξείνων ψηγμάτων.	Μειώστε την ποσότητα του λιπαντικού, επιλέξτε πιο σκληρό γράσο. Αντικατάσταση ρουλεμάν ή λιπαντικού. Καθαρισμός εδράνου και παρακείμενων εξαρτημάτων.	

Πίνακας 11: Αιτίες και μέτρα αντιμετώπισης για ανωμαλίες κατά τη λειτουργία(Εγχειρίδιο Ρουλεμάν NSK).

4.6. Αστοχίες των ρουλεμάν.

Γενικά, αν τα ρουλεμάν χρησιμοποιούνται σωστά, θα αντέξουν μέχρι το αναμενόμενο όριο της διάρκειας ζωής τους. Η πρόωγη αστοχία οφείλεται συνήθως σε λάθος τοποθέτηση, λάθος λίπανση, διείδυση ξένων υλικών ή ανεπαρκή έλεγχο και συντήρηση.

	Τύπος αστοχίας	Πιθανή αιτία	Μέτρα αντιμετώπισης
Αποφολίωση	Αποφολίωση μιας πλευράς της τροχιάς κύλισης ακτινικών ρουλεμάν Αποφολίωση των τροχών κύλισης διάφορων ρουλεμάν	Μη φυσιολογικό αξονικό φορτίο	Η ελεύθερη συναρμολόγηση πρέπει να χρησιμοποιείται κατά την τοποθέτηση του εξωτερικού δακτύλιου ρουλεμάν ελεύθερου άκρου ώστε να επιτρέπεται η αξονική διαστολή του άξονα.
	Αποφολίωση τροχιάς κύλισης με συμμετρικό τρόπο	Κυκλική παραμόρφωση της σπής του εδράνου	Διορθώστε το ελαττωματικό έδρανο
	Αποφολίωση με κλίση σε σχέση με την τροχιά κύλισης των ακτινικών ρουλεμάν Αποφολίωση κοντά στα άκρα της τροχιάς κύλισης και των επιφανειών κύλισης στα κυλινδρικά ρουλεμάν	Λάθος τοποθέτηση, παραμόρφωση του άξονα, μη ικανοποιητικό κεντράρισμα, ανεπαρκείς ανσχές για τον άξονα και το έδρανο	Να είστε προσεκτικοί κατά την τοποθέτηση και το κεντράρισμα, να επιλέξετε ρουλεμάν με μεγαλύτερο διάκενο και να διορθώσετε την ευθυγράμμιση του άξονα και της έδρασης του εδράνου.
	Αποφολίωση της τροχιάς κύλισης με ίδιες αποστάσεις όπως τα στοιχεία κύλισης	Ισχυρός κραδασμός κατά την τοποθέτηση, σκουριά ενώ το ρουλεμάν είναι εκτός λειτουργίας για παρατεταμένο χρονικό διάστημα	Να είστε προσεκτικοί κατά την τοποθέτηση και να χρησιμοποιείτε αντισκουριακό όταν το μηχανήμα δεν πρόκειται να λειτουργήσει για μεγάλο χρονικό διάστημα
	Πρόωγη αποφολίωση των τροχών κύλισης και των στοιχείων κύλισης	Ανεπαρκές διάκενο, υπερβολικό φορτίο, ακατάλληλο λιπαντικό, σκουριά κλπ	Επιλέξτε κατάλληλη συναρμολόγηση, διάκενο ρουλεμάν και λιπαντικό
Πρόωγη αποφολίωση ζεύγους σφαιρικών ρουλεμάν	Υπερβολική προφόρτιση	Ρυθμίστε την προφόρτιση	
Χάραξη και κηλίωση	Χάραξη ή κηλίωση μεταξύ της τροχιάς κύλισης και των επιφανειών κύλισης	Ανεπαρκής αρχική λίπανση, υπερβολικά σκληρό γράσο και γρήγορη επιτάχυνση κατά την εκκίνηση	Χρησιμοποιήστε πιο μαλακό γράσο και αποφύγετε την ταχεία επιτάχυνση.
	Ελλοειδής χάραξη ή κηλίωση της επιφάνειας της τροχιάς κύλισης των αξονικών σφαιρικών ρουλεμάν	Οι δακτύλιοι της τροχιάς κύλισης δεν είναι παράλληλοι και υπερβολική ταχύτητα	Διορθώστε την τοποθέτηση, εφαρμόστε προφόρτιση ή επιλέξτε άλλα τύπο ρουλεμάν
	Χάραξη ή κηλίωση μεταξύ της ακραίας επιφάνειας των κυλινδρών και της νευρωσης οδήγησης.	Ανεπαρκής λίπανση, λάθος τοποθέτηση και μεγάλο αξονικό φορτίο	Επιλέξτε κατάλληλα λιπαντικά και διορθώστε την τοποθέτηση
Ρωγμές	Ρωγμή στον εξωτερικό ή στον εσωτερικό δακτύλιο	Υπερβολικά ισχυρός κραδασμός, υπερβολικά σφικτή συναρμολόγηση, εσφαλμένη κυλινδρικότητα άξονα, ακατάλληλη κωνικότητα χιτωνίου, μεγάλη ακτίνα καλού συνδέσμου, εμφάνιση ρωγμών λόγω θερμότητας και προώθηση αποφολίωσης	Εξετάστε τις συνθήκες φόρτισης, τροποποιήστε τη συναρμολόγηση του χιτωνίου του ρουλεμάν. Η ακτίνα του καλού συνδέσμου πρέπει να είναι μικρότερη από τα στραγγυλεμένα άκρα του ρουλεμάν.
	Ρωγμή σε στοιχείο κύλισης Σπάσιμο σε νευρωση	Πρόωθηση αποφολίωσης, κραδασμός στη νευρωση κατά την τοποθέτηση ή πτώση κατά το χειρισμό	Να είστε προσεκτικοί κατά το χειρισμό και την τοποθέτηση
	Θραύση κλωβού	Μη φυσιολογική φόρτιση του κλωβού λόγω εσφαλμένης τοποθέτησης και ακατάλληλης λίπανσης	Ελαττώστε τα σφάλμα τοποθέτησης και επανεξετάστε τη μέθοδο λίπανσης και το χρησιμοποιούμενο λιπαντικό.
Οδοντώσεις	Οδοντώσεις σε τροχιά κύλισης με την ίδια μορφή όπως στα στοιχεία κύλισης	Κραδασμός κατά την τοποθέτηση ή υπερβολικά φορτίο όταν δεν περιστρέφεται	Να είστε προσεκτικοί κατά το χειρισμό.
	Οδοντώσεις στην τροχιά κύλισης και στα στοιχεία κύλισης	Ξένη ύλη όπως μεταλλικά ψήγματα ή άμμος	Καθαρίστε το έδρανο, βελτιώστε τα στεγανοποιητικά και χρησιμοποιήστε καθαρό λιπαντικό
Μη φυσιολογική φθορά	Ψευδο-brinelling (φαινόμενο παρόμοιο με τη φθορά)	Κραδασμός του ρουλεμάν χωρίς περιστροφή κατά τη μεταφορά ή παλινδρομική κίνηση μικρού πλάτους	Ασφαλίστε τον άξονα και το έδρανο, χρησιμοποιήστε λαδί ως λιπαντικό και ελαττώστε τους κραδασμούς εφαρμόζοντας προφόρτιση.
	Απολέπιση	Μικρή φθορά της επιφάνειας συναρμολόγησης	Αυξήστε τη σύσφιξη και τοποθετήστε λαδί.
	Φθορά τροχιάς κύλισης, στοιχείων κύλισης, νευρωσης και κλωβού	Διείδυση ξένης ύλης, εσφαλμένη λίπανση και σκουριά	Χρησιμοποιήστε στεγανοποιητικό διαφορετικού τύπου, καθαρίστε το έδρανο και χρησιμοποιήστε καθαρό λιπαντικό
	Ερπυσμός	Ανεπαρκής σφικτή συναρμολόγηση ή ανεπαρκής σύσφιξη του χιτωνίου	Τροποποιήστε τη συναρμολόγηση ή σφίξτε το χιτώνιο.
Ανισοτροπία	Αποχρωματισμός ή συγκόλληση τροχιάς κύλισης, στοιχείων κύλισης και νευρωσης	Ανεπαρκές διάκενο, εσφαλμένη λίπανση ή ακατάλληλη τοποθέτηση	Επανεξετάστε το εσωτερικό διάκενο και τη συναρμολόγηση του ρουλεμάν, φροντίστε για επαρκή ποσότητα κατάλληλου λιπαντικού και βελτιώστε τη μέθοδο τοποθέτησης και τα σχετικά εξαρτήματα.
Ηλεκτρικά σφάλματα	Ραβδώσεις ή αυλακώσεις	Τήξη λόγω ηλεκτρικού τόξου	Τοποθετήστε καλώδια γείωσης για να σταματήσετε τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος ή μονώστε το ρουλεμάν.
Διάβρωση και σκουριά	Σκουριά και διάβρωση επιφανειών που συναρμολογούνται και του εσωτερικού του ρουλεμάν	Συμπύκνωση υγρασίας από τον αέρα, απολέπιση ή διείδυση διαβρωτικών ουσιών	Να είστε προσεκτικοί κατά την αποθήκευση και αποφύγετε τις υψηλές θερμοκρασίες και την υψηλή υγρασία. Απαιτείται επεξεργασία για προστασία από σκουριά όταν ανασταλεί η λειτουργία για μεγάλο χρονικό διάστημα

Πίνακας 12: Αιτία και διόρθωση(Εγχειρίδιο Ρουλεμάν NSK).

4.7 Διάρκεια ζωής εδράνων κύλισης

Ο παράγοντας εκείνος που έχει καθοριστική επίδραση στη διάρκεια ζωής του ρουλεμάν είναι ο τρόπος στερέωσής του. Ο τεχνικός θα πρέπει να δίνει ιδιαίτερη προσοχή στην ασφάλιση του ρουλεμάν από τυχόν αξονική μετατόπιση, στην ευθυγράμμισή του, στην πρόσδωση ικανής αξονικής ανοχής για θερμικές διαστολές και στην όχι δυνατή προέντασή του από υπερβολικό σφίξιμο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η λίπανση των εδράνων κύλισης παρουσιάζει πολύ λιγότερα προβλήματα από ότι στα έδρανα ολίσθησης, ενώ στις πιο πολλές εφαρμογές αρκεί η λίπανση με γράσο. Μερικοί κατασκευαστές προσφέρουν έδρανα που δεν χρειάζονται λίπανση για όλη τη διάρκεια της ζωής τους.

Ο συνολικός αριθμός στροφών ή ωρών λειτουργίας ενός εδράνου κυλίσεως, κατά τον οποίο ένα έδρανο μπορεί να λειτουργήσει κανονικά μέχρι να εμφανιστούν τα πρώτα σημεία κοπώσεως, ονομάζεται διάρκεια ζωής του εδράνου. Σχετικά πειράματα και πάρα πολλά παραδείγματα πρακτικών εφαρμογών έχουν αποδείξει ότι τα έδρανα κυλίσεως του ίδιου είδους, των ίδιων διαστάσεων, του ίδιου υλικού και των ίδιων ανοχών παρουσιάζουν για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας πολύ μεγάλες διαφορές στη διάρκεια ζωής τους.

Για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής των εδράνων έχει καθοριστεί ένα συγκεκριμένο όριο, η ονομαστική διάρκεια ζωής L , που είναι ο αριθμός εκατομμυρίων στροφών, για τον οποίο το 10% ενός μεγάλου πλήθους εδράνων του ίδιου είδους και των ίδιων διαστάσεων εμφανίζουν σημεία κοπώσεως όταν αυτά λειτουργούν με τις ίδιες συνθήκες φορτίσεως. Το υπόλοιπο 90% των εδράνων δεν εμφανίζει σημεία κοπώσεως.

Η μέση διάρκεια ζωής L_m είναι ο αριθμός των εκατομμυρίων στροφών, για τον οποίο το 50% ενός μεγάλου πλήθους εδράνων του ίδιου είδους και των ίδιων διαστάσεων εμφανίζουν σημεία κόπωσης, όταν λειτουργούν με τις ίδιες συνθήκες φορτίσεως. Η μέση διάρκεια ζωής των εδράνων κυλίσεως είναι περίπου πενταπλάσια της ονομαστικής διάρκειας ζωής. Από το γεγονός αυτό φαίνεται ότι η διασπορά των πειραματικών αποτελεσμάτων για τη διάρκεια ζωής των εδράνων είναι πολύ μεγάλη. Η πραγματική διάρκεια ζωής ενός εδράνου μπορεί επομένως να είναι πολλαπλάσια της ονομαστικής.

4.8 Τρόποι ελέγχου της κατάστασης των εδράνων κύλισης (ρουλεμάν).

Υπάρχουν τέσσερις μέθοδοι που εφαρμόζονται για τον έλεγχο της κατάστασης των ρουλεμάν :

- Μέτρηση των κρουστικών παλμών.
- Μέτρηση του επιπέδου των δονήσεων-κραδασμών (τιμές overall).
- Διάγνωση με την χρήση της ανάλυσης κατά συχνότητα (ανάλυση FFT).
- Διάγνωση με την χρήση της ανάλυσης κατά συχνότητα στο πεδίου του χρόνου (ανάλυση Cepstrum).

4.8.1 Μέτρηση των κρουστικών παλμών.

4.8.1.α. Ελάχιστη τιμή dBc και μέγιστη τιμή dBm.

Στα ρουλεμάν όταν υπάρχουν φθορές στα στοιχεία κύλισης, κρουστικοί παλμοί εμφανίζονται λόγω προσκρούσεων μεταξύ των περιστρεφόμενων σφαιρών και των δακτυλίων των ρουλεμάν. Στο σημείο της πρόσκρουσης, ένα κύμα συμπίεσης προάγεται αμέσως σε κάθε σώμα. Ο παράγων αιχμής **Peak** του κρουστικού παλμού καθορίζεται από την ταχύτητα πρόσκρουσης και δεν επηρεάζεται από την μάζα ή από την μορφή των προσκρουόμενων σωμάτων. Οι κρουστικοί παλμοί διαχέονται στο υλικό του ρουλεμάν στην έδραση και στο κέλυφος του και στην συνέχεια περνάνε στα υπόλοιπα μέρη της μηχανής. Μια εκτεταμένη εμπειρία αποδεικνύει την ύπαρξη μιας σχέσης που συνδέει την κατάσταση του ρουλεμάν με την τιμή της μέτρησης των κρουστικών παλμών του. Οι κρουστικοί παλμοί είναι παλμοί μικρής διάρκειας και δημιουργούνται από μηχανικές προσκρούσεις. Λόγω ανωμαλίας των κυλιόμενων σωμάτων και της επιφάνειας διαδρομής τους, δημιουργούνται μηχανικές προσκρούσεις στα περιστρεφόμενα σώματα κύλισης. Η τιμή του κρουστικού παλμού μετράται στην κλίμακα ήχου **Decibel** και εξαρτάται από την ταχύτητα πρόσκρουσης.

Ένας μετατροπέας ανιχνεύει τους κρουστικούς παλμούς στο ρουλεμάν. Τα σήματα υποβάλλονται σε επεξεργασία στον μικροεπεξεργαστή του οργάνου μέτρησης και οι τιμές των παλμών εμφανίζονται στην οθόνη. Ένα μικρόφωνο μπορεί να συνδεθεί με το όργανο για το άκουσμα του κρουστικού παλμού.

- Ελάχιστη τιμή dBc

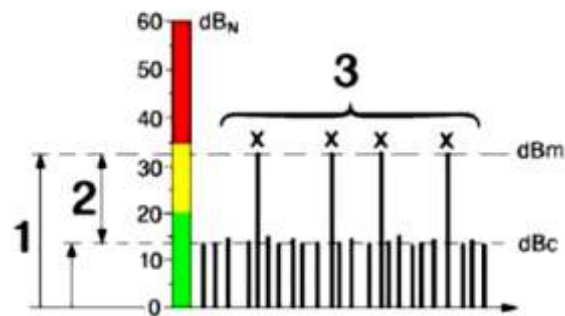
Η τραχύτητα της επιφάνειας από μικρές φθορές θα προκαλέσει μια γρήγορη ακολουθία μικρών κρουστικών παλμών που μαζί θα αποτελέσουν τον παλμό βάσης dBc του ρουλεμάν. Η ελάχιστη τιμή dBc επηρεάζεται από την ταινία λιπαντικού μεταξύ των δακτυλίων και των σφαιρών του ρουλεμάν. Όταν το πάχος του λιπαντικού είναι κανονικό, η ελάχιστη τιμή dBc είναι χαμηλή. Η λάθος τοποθέτηση και η λάθος ευθυγράμμιση του καθώς επίσης και η ανεπαρκής λίπανση θα μειώσουν το πάχος της ταινίας του λιπαντικού στο ρουλεμάν. Αυτό αναγκάζει την τιμή dBc να αυξηθεί επάνω από το κανονικό.

- Μέγιστη τιμή dBm

Οι σχετικά μεγάλες φθορές στις επιφάνειες των ρουλεμάν θα προκαλέσουν ενιαίους κρουστικούς παλμούς με υψηλά μεγέθη σε τυχαία διαστήματα. Η υψηλότερη τιμή που μετρείται σε ένα ρουλεμάν καλείται μέγιστη αξία dBm. Η μέγιστη αξία χρησιμοποιείται για να καθοριστεί η λειτουργικότητα των ρουλεμάν. Η τιμή dBc βοηθά στην ανάλυση της αιτίας της μειωμένης λειτουργικότητας του ρουλεμάν. Εάν η μέγιστη τιμή dBm είναι υψηλή και ταυτόχρονα η διαφορά μεταξύ

dBm και dBc είναι μεγάλη, τότε αυτό προκαλείται από τις βλάβες που υπάρχουν στο ρουλεμάν ή από την ύπαρξη ξένων σωματιδίων στο λιπαντικό (bearing checker manual).

4.8.1.β. Κωδικοί ένδειξης κατάστασης ρουλεμάν.



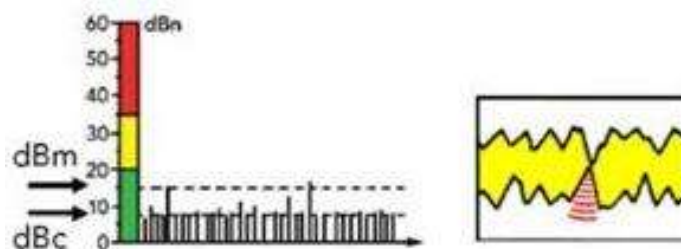
Εικόνα 28: Ένδειξη των κρουστικών παλμών

- 1) Μέγιστη τιμή dBm
- 2) Διαφορά μεταξύ dBm και dBc
- 3) Ρυθμός μέγιστων αιχμών

Τα ακουστικά χρησιμοποιούνται για να καθορίσουμε και να ανιχνεύσουμε τις πηγές των κρουστικών παλμών. Το σήμα του ρουλεμάν πρέπει να είναι υψηλότερο στην φωλιά του. Αν λαμβάνουμε υψηλότερο σήμα έξω από την φωλιά του ρουλεμάν, τότε είναι πιθανόν να μετράμε τους κρουστικούς παλμούς ενός άλλου ρουλεμάν ή μιας άλλης πηγής. Τυπικό για τα σήματα των ρουλεμάν είναι ότι οι πιο δυνατοί κρουστικοί παλμοί ακούγονται καλύτερα μερικά ντεσιμπέλ κάτω από το μέγιστο επίπεδο παλμών οι οποίοι εμφανίζονται σε τυχαία διαστήματα (bearing checker manual).

- Ένδειξη από καλό ρουλεμάν.

Για ένα καλό ρουλεμάν οι δυνατοί παλμοί (dBm) είναι μέσα στην πράσινη ζώνη και σε απόσταση από τους χαμηλούς παλμούς (dBc). Πρέπει να προσέχουμε πως όταν η τιμή της μέτρησης είναι πολύ χαμηλή, θα πρέπει να ελέγξουμε μήπως έχουμε διαλέξει λάθος σημείο μέτρησης ή μήπως ο αισθητήρας με τον οποίο μετράμε έχει κάποια βλάβη.

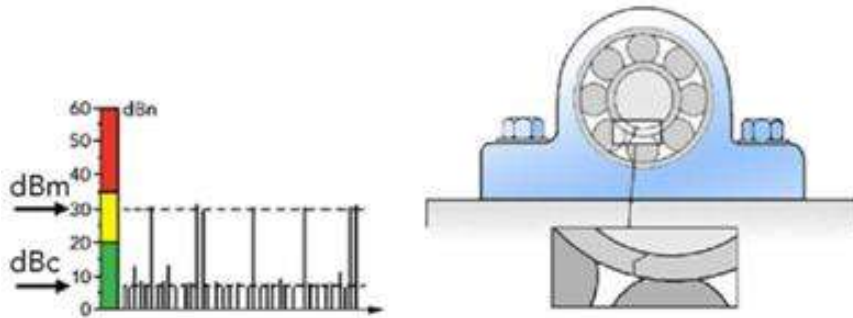


Εικόνα 29: Ένδειξη από καλό ρουλεμάν

- Πρώτο σημάδι της βλάβης.

Η τιμή του dBm είναι ανάμεσα σε 20-35 dB (κίτρινη ζώνη) και μία αύξηση σε αυτή την τιμή είναι σημάδι κόπωσης στις επιφάνειες του ρουλεμάν.

Η ίδια περίπτωση εμφανίζεται όταν υπάρχουν ακαθαρσίες στο λιπαντικό του ρουλεμάν. Γι' αυτό σε αυτή την περίπτωση ελέγχουμε την κατάσταση του λιπαντικού πριν προβούμε στην αντικατάσταση του ρουλεμάν.



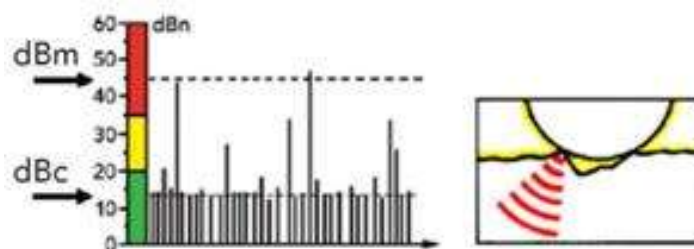
Εικόνα 30: Ένδειξη από ρουλεμάν με μικρή ζημία.

- Ένδειξη από χαλασμένο ρουλεμάν.

Το διάγραμμα κρουστικών παλμών ενός χαλασμένου ρουλεμάν περιέχει δυνατούς παλμούς με τυχαία συχνότητα στην κόκκινη ζώνη και με μεγάλη διαφορά από τους χαμηλούς παλμούς. Μία τιμή dBm μεγαλύτερη από 35 dB, το μεγάλο κενό μεταξύ τιμής dBm και dBc και μία τυχαία αλληλουχία υψηλών αιχμών είναι γεγονότα που φανερώνουν την ύπαρξη μίας βλάβης. Όταν λιπαίνουμε το ρουλεμάν, οι τιμές πέφτουν αλλά σύντομα ανεβαίνουν ξανά.

Η μέγιστη τιμή του dBm δείχνει το επίπεδο της βλάβης:

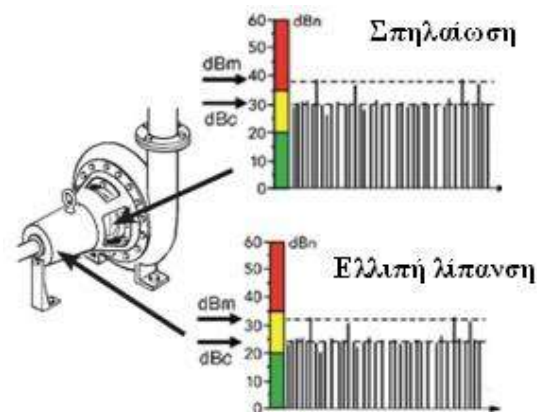
- 35-40 dB_N Ελαφριά βλάβη
- 40-45 dB_N Σοβαρή βλάβη
- > 45 dB_N Πολύ επικίνδυνη βλάβη



Εικόνα 31: Ένδειξη από χαλασμένο ρουλεμάν.

- Ένδειξη από ρουλεμάν με ελλiptή λίπανση.

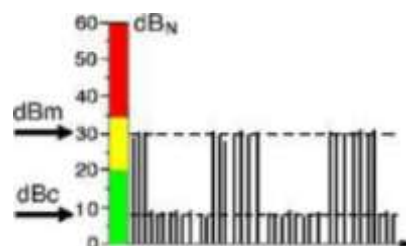
Ένα ρουλεμάν με ελλiptή λίπανση έχει υψηλό επίπεδο χαμηλών κρουστικών παλμών κοντά στο επίπεδο των δυνατών κρουστικών παλμών. Το ανεπαρκές επίπεδο λίπανσης φαίνεται από την μικρή διαφορά μεταξύ dBm και dBc. Όταν λιπαίνουμε ξανά το ρουλεμάν, οι τιμές πέφτουν και παραμένουν χαμηλές. Παρόμοιο διάγραμμα μπορεί να προκληθεί και από σπηλαιώση στις αντλίες. Σε αυτή τη περίπτωση οι παλμοί στην φωλιά της αντλίας είναι ισχυρότεροι από αυτούς που λαμβάνουμε στην φωλιά του ρουλεμάν και δεν επηρεάζονται καθόλου ακόμα και μετά τη λίπανση του.



Εικόνα 32: Ένδειξη από ρουλεμάν με ελλiptή λίπανση ή σπηλαιώση αντλίας

- Περιοδικές αιχμές

Οι περιοδικές αιχμές εμφανίζονται λόγω τριβής ανάμεσα σε διάφορα εξαρτήματα της μηχανής. Αυτές οι αιχμές θα προκύψουν σε συχνότητα σχετική με το επίπεδο RPM λειτουργίας τους. Ένα διάγραμμα με πλειάδα ισχυρών παλμών σε ρυθμική ακολουθία προέρχεται, για παράδειγμα, από χαλασμένα μέρη.

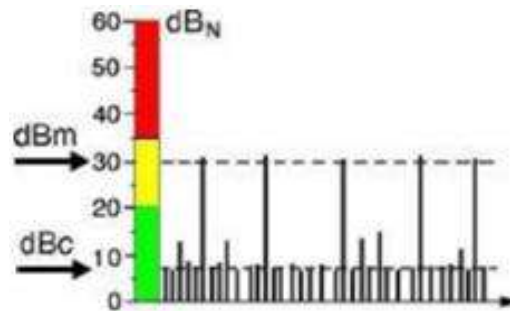


Εικόνα 33: Περιοδικές αιχμές

- Ρυθμικές αιχμές

Μία συνεχόμενη αλληλουχία ρυθμικών αιχμών δημιουργείται λόγω φόρτισης ή πίεσης κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής. Άλλος λόγος μπορεί να είναι βαλβίδες που ανοιγοκλείνουν, χαλαρά μέρη ή περιοδικά

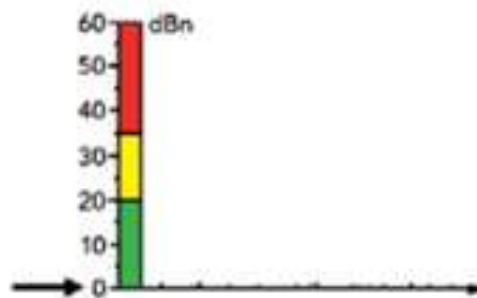
κρουστικά φορτία. Αν το σήμα είναι πολύ υψηλό στην έδραση του ρουλεμάν, μπορεί να είναι λόγω θραύσης του εσωτερικού δακτυλίου του ρουλεμάν.



Εικόνα 34: Ρυθμικές αιχμές

- Ξαφνική πτώση στο επίπεδο των κρουστικών παλμών.

Μία ξαφνική πτώση στο επίπεδο των κρουστικών παλμών είναι ύποπτη. Ελέγξτε τον εξοπλισμό μέτρησης. Εάν οι μετρήσεις είναι σωστές, το δακτυλίδι πιθανότατα ολισθαίνει στον άξονα .

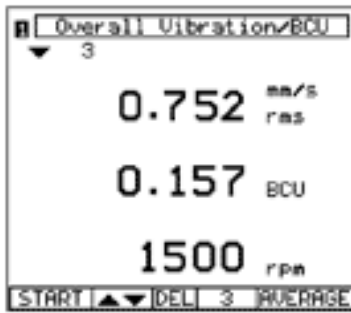


Εικόνα 35: Ξαφνική πτώση στο επίπεδο των κρουστικών παλμών.

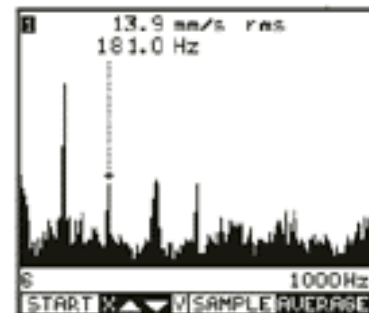
4.8.2 Μέτρηση του επιπέδου των δονήσεων-κραδασμών

4.8.2.α Εισαγωγή.

Η προληπτική διάγνωση με την μέθοδο της ανάλυσης των δονήσεων μπορεί να εφαρμοστεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος ονομάζεται μέθοδος OVERALL και γίνεται με την μελέτη όλου του πλάτους του συνόλου των συχνοτήτων της δόνησης χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη τις συχνότητες του φάσματός της και τις γωνίες φάσης αυτών. Το πλάτος μετράται σε συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων π.χ. 10-1000Ηζ. Όλες οι συχνότητες της σύνθετης ταλάντωσης αντιμετωπίζονται συνολικά για να δώσουν μία συγκεκριμένη τιμή μετρουμένου πλάτους. Στην δεύτερη μέθοδο γίνεται ανάλυση του φάσματος συχνοτήτων των δονήσεων ή μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των μηχανών με συνάρτηση αυτοδιέγερσης που παράγεται από τις ταλαντώσεις ορισμένων μηχανών ή με εξωτερική διέγερση.



Εικόνα 36α. Μέτρηση με την μέθοδο <<Overall>>



Εικόνα 36β. Ανάλυση του φάσματος συχνοτήτων της δόνησης

4.8.2.β. Μέτρηση του επιπέδου των δονήσεων-κραδασμών (τιμές overall).

Οι δονήσεις αποτελούν την καλύτερη μέθοδο για τον έλεγχο της κατάστασης ενός εξαρτήματος ή ολόκληρης της μηχανής.

Έτσι, με την μέθοδο overall μετράται η ολική ενέργεια των δονήσεων εντός ενός πεδίου συχνοτήτων. Δηλαδή, γίνεται μελέτη όλου του πλάτους του συνόλου των συχνοτήτων της δόνησης χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη τις συχνότητες του φάσματός της και τις γωνίες φάσης αυτών. Όλες οι συχνότητες της σύνθετης ταλάντωσης αντιμετωπίζονται συνολικά για να δώσουν μία συγκεκριμένη τιμή μετρομένου πλάτους.

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της τιμής του πλάτους θα προσδιορίσουν τα εξής :

- Ότι η μηχανή μπορεί να συνεχίσει την λειτουργία της.
- Ότι πρέπει να γίνει κάποια συντήρηση και τότε, χωρίς να ξέρουμε σε ποιο εξάρτημα οφείλεται.
- Ότι πρέπει να γίνει ανάλυση των ταλαντώσεων με άλλες τεχνικές για προσδιορισμό της φύσης βλάβης και σε ποιο εξάρτημα οφείλεται. Εάν δεν έχουμε την δυνατότητα αυτή, τότε θα πρέπει να θέσουμε την μηχανή εκτός λειτουργίας για να αποφύγουμε απρόβλεπτες καταστροφές.

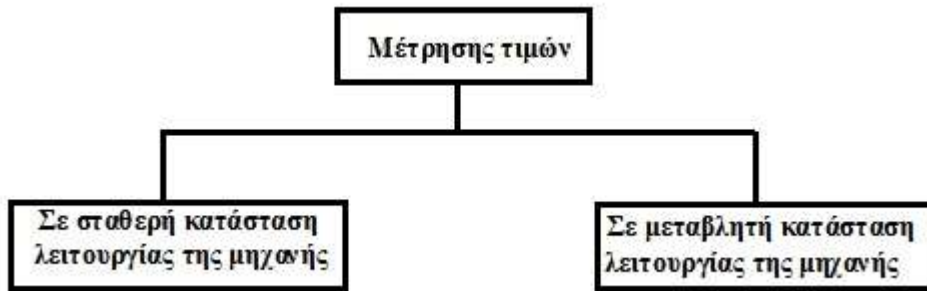
Βασικά, οι μετρήσεις των μεταβλητών μπορούν να γίνουν όταν η λειτουργική κατάσταση της μηχανής είναι σταθερή ή μεταβλητή. Παράμετροι όπως ταχύτητα, απόδοση, φορτίο, κλπ μπορούν να αξιολογηθούν. Με την μέθοδο αυτή η αξιολόγηση των μηχανών βασίζεται σε σύγκριση των μετρομένων τιμών από καιρό σε καιρό, κάτω από τις ίδιες λειτουργικές συνθήκες της μηχανής και της εξέλιξης του πλάτους των τιμών συναρτήσει του χρόνου. Οι μετρήσεις των τιμών είναι απλές. Γίνονται τοποθετώντας το αισθητήριο ενός μετρητικού οργάνου σε μία ή περισσότερες μετρητικές θέσεις στην μηχανή ή χρησιμοποιώντας αισθητήρια που ήδη υπάρχουν εγκατεστημένα στην μηχανή.

Αρχικά, πρέπει να γίνουν μετρήσεις μετά από επισκευή ή όταν η μηχανή είναι καινούργια. Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν την «καλή» λειτουργική κατάσταση της μηχανής και θα αποτελέσουν τη γραμμή αναφοράς για την κατάστασή της. Αργότερα, ο μηχανικός διεξάγει μετρήσεις, οι οποίες όμως να έχουν το ίδιο σημείο αναφοράς σχετικά με την θέση και τις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής ανά τακτά χρονικά διαστήματα, για παράδειγμα μία φορά την εβδομάδα. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται με τη γραμμή αναφοράς ώστε να πάρουμε την τάση μεταβολής αυτών των μετρήσεων με την πάροδο του χρόνου. Όταν η τιμή ανέβει 10 φορές πάνω από την αρχική τιμή τότε κάποιο εξάρτημα της μηχανής εμφανίζει κάποιο σφάλμα, το οποίο προκαλεί κραδασμούς πέραν του φυσιολογικού.

Η μέθοδος αυτή, της σύγκρισης των τωρινών ενδείξεων της μηχανής με παλαιότερες είναι η προτιμότερη μέθοδος για τον εντοπισμό τυχόν βλαβών και αυτό γιατί κάθε μηχανή λειτουργεί με το δικό της μοναδικό τρόπο. Για παράδειγμα, κάποιες ενδείξεις δονήσεων μπορεί σε κάποια μηχανή να υποδηλώνουν την ύπαρξη κάποιου προβλήματος ενώ σε κάποιες άλλες μηχανές να θεωρούνται εντός των φυσιολογικών ορίων τους. Η παρατήρηση μόνο των τωρινών μετρήσεων χωρίς να τις συγκρίνουμε με τις αρχικές, φυσιολογικές για τη συγκεκριμένη μηχανή μπορεί να μας οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα, διότι ένα εξάρτημα μπορεί να εμφανίζει αυξημένο επίπεδο κραδασμών και να υποθέσουμε ότι υπάρχει πρόβλημα, ενώ στην πραγματικότητα αυτή η ένδειξη είναι εντός των φυσιολογικών ορίων για τη συγκεκριμένη μηχανή (Κανδύλης, 2007 β).



Πίνακας 13: Ενέργειες αξιολόγησης των μηχανών

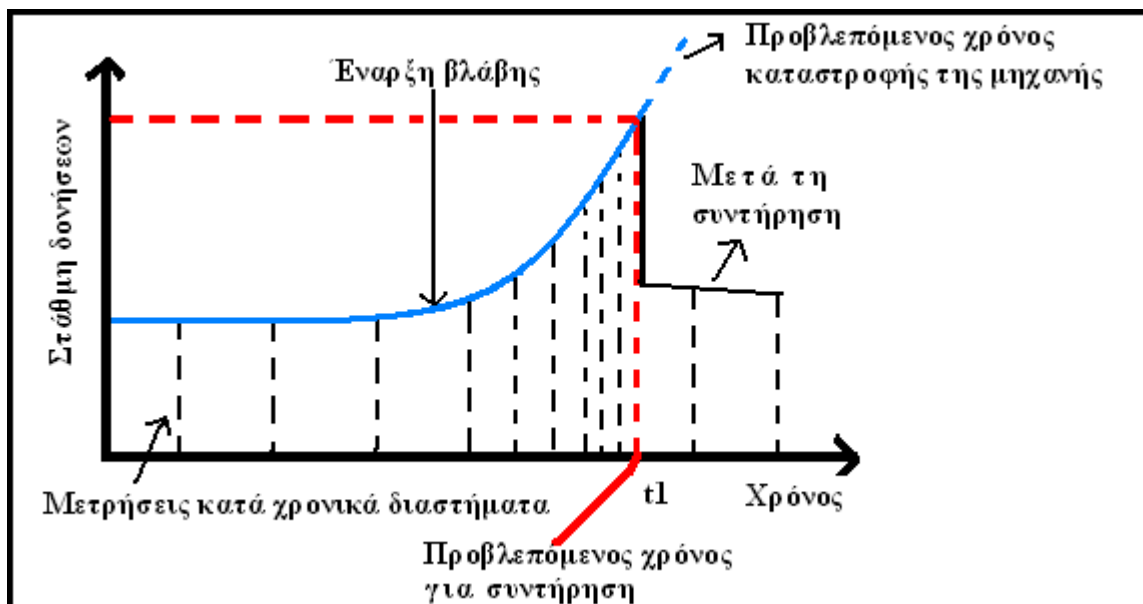


Πίνακας 14: Μέτρηση μεταβλητών ανάλογα με την κατάσταση της μηχανής

4.8.2.γ. Αξιολόγηση εξέλιξης τιμών (trend).

Για την αποφυγή της καταστροφής της μηχανής, οι μετρούμενες μεταβλητές που καθορίζουν την κατάσταση της μηχανής δεν πρέπει να υπερβούν τις επιτρεπτές τιμές ορίων. Επίσης, μεταβολές μετρομένων τιμών που είναι κάτω των ορίων δείχνουν μια τάση φθοράς ή ανωμαλίας της μηχανής.

Εκτός από την σύγκριση με τα όρια τιμών, η εξέλιξη του πλάτους της μετρούμενης τιμής πρέπει να ληφθεί υπόψη για την αξιολόγηση της μηχανής. Οι μεταβολές της μετρούμενης τιμής σε σχέση με την κανονική τιμή δεν πρέπει να υπερβεί προκαθορισμένα όρια. Στην περίπτωση αυτή, κανονική τιμή σημαίνει γνωστή τυπική τιμή.



Εικόνα 37: Καμπύλη εξέλιξης του πλάτους μίας συχνότητας που αντιστοιχεί σε ένα εξάρτημα, και επέκταση της καμπύλης μέχρις ότου συναντήσει την γραμμή του ορίου συντήρησης. Ο προβλεπόμενος χρόνος t_1 είναι ο χρόνος που πρέπει να αντικατασταθεί το εξάρτημα.

Βλέποντας την παράσταση παρατηρούμε ότι το πλάτος της δόνησης παραμένει σταθερό μέχρι την έναρξη της βλάβης. Αργότερα ακολουθεί μία αύξηση. Όταν η τιμή του πλάτους αυξηθεί κατά δέκα φορές περίπου, τότε το εξάρτημα πρέπει να αλλάξει.

Μετά την συντήρηση η στάθμη της δόνησης πέφτει σε φυσιολογικά επίπεδα. Γι' αυτό τον λόγο όταν παρατηρήσουμε αύξηση του πλάτους, κάνουμε πιο συχνούς ελέγχους ώστε να προσδιορίσουμε ακριβώς τον χρόνο αντικατάστασης.

4.8.3 Διάγνωση με την χρήση της ανάλυσης κατά συχνότητα.

4.8.3.α. Εισαγωγή.

Όπως έχει αναφερθεί πιο πριν, η ανάλυση των μηχανικών δονήσεων είναι η πιο αξιόπιστη μέθοδος για τον έλεγχο της κατάστασης της μηχανής.

Η ανάλυση των δονήσεων κατά συχνότητα είναι μια σύγχρονη αναλυτική μέθοδος που χρησιμοποιείται:

- Όταν πρέπει να εντοπισθούν βλάβες ή η αιτία που τις προξενεί.
- Όταν πρέπει να εντοπισθούν χαλασμένα εξαρτήματα.
- Όταν πρέπει να καθορισθεί το μέγεθος της βλάβης.
- Όταν κάνουμε εξέλιξη της φθοράς συναρτήσει του χρόνου.
- Όταν πρέπει να παρακολουθήσουμε την εξέλιξη της φθοράς.
- Όταν θέλουμε να αξιολογήσουμε την κατάσταση της μηχανής μετά την αλλαγή εξαρτημάτων.

4.8.3.β. Επεξεργασία χρονικού σήματος.

Η δόνηση μίας μηχανής είναι μία φυσική κίνηση. Το αισθητήριο του μετρητικού οργάνου μετατρέπει αυτή την κίνηση σε ηλεκτρικό ρεύμα και παράγει ένα αναλογικό σήμα των ταλαντώσεων. Αυτό το αναλογικό σήμα πρέπει να μετατραπεί σε ψηφιακό σήμα.

Για να γίνει αυτό, το αναλογικό σήμα ταλαντώσεων που λαμβάνεται από τον αισθητήρα ενισχύεται από τον ενισχυτή εισόδου, περνάει από ένα διορθωτικό φίλτρο (anti-alias filter) και ένα κύκλωμα sample hold και οδηγείται στον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (A/D Converter). Η διαδικασία αυτή εκτελεί δειγματοληψία στο πλάτος του σήματος και το μετατρέπει σε μια σειρά μεμονωμένων πλατών. Με τον τρόπο αυτό, κάθε μεμονωμένο πλάτος εκφράζεται ποσοτικός και μετατρέπεται σε τιμή δεδομένων binary. Η εργασία αυτή λέγεται και κωδικοποίηση (coding) (Κανδύλης, 2007 β).

4.8.4. Διάγνωση με την χρήση της ανάλυσης κατά συχνότητα FFT (ανάλυση Spectrum).

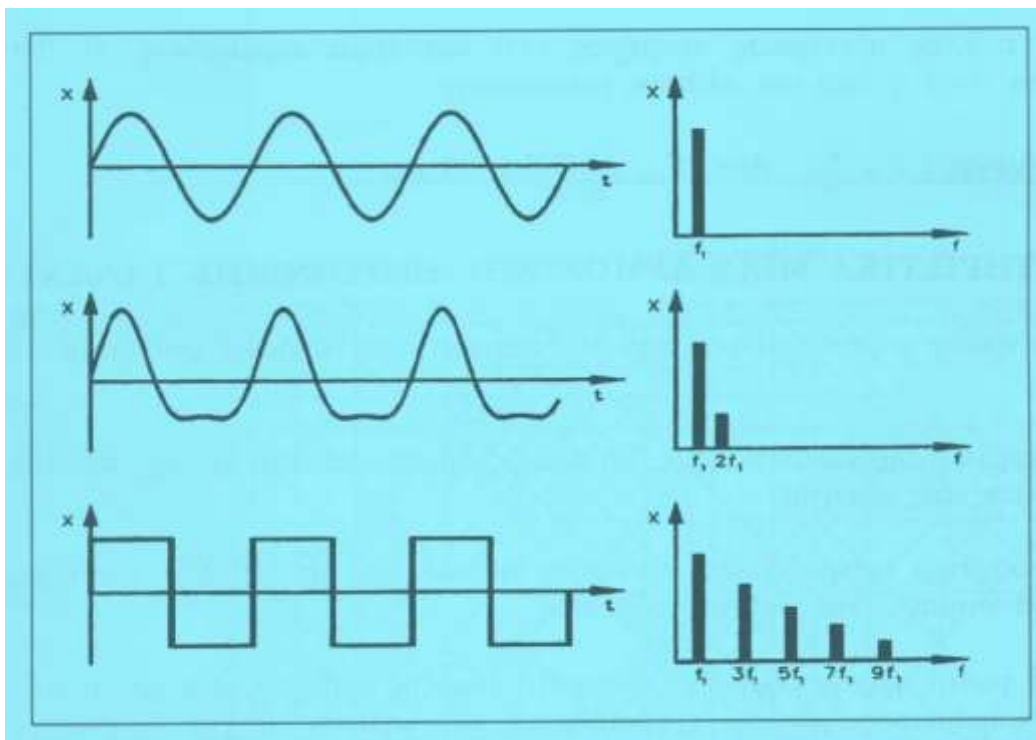
4.8.4.α. Εισαγωγή.

Οι σύγχρονοι μέθοδοι διάγνωσης στηρίζονται στις μετρήσεις ταλαντώσεων στο πεδίο του χρόνου **time domain** και στο πεδίο συχνότητας **frequency domain**.

Το πεδίο του χρόνου αποτελείται από πλάτος που μεταβάλλεται με το χρόνο. Το πεδίο των συχνοτήτων είναι το πεδίο όπου τα πλάτη προβάλλονται σαν σειρά ημιτονοειδών και συνημιτονοειδών κυμάτων. Αυτά τα κύματα έχουν πλάτος και φάση, η οποία μεταβάλλεται με τη συχνότητα.

Οι μετρημένες συχνότητες είναι πάντοτε μετρημένες στο πεδίο του χρόνου και χρειάζεται να μετασχηματισθούν στο πεδίο των συχνοτήτων. Αυτός είναι ο σκοπός του μετασχηματισμού Fourier (FFT).

Οι μέθοδοι που βασίζονται στην ανάλυση των ταλαντώσεων στο πεδίο συχνότητας παρέχουν περισσότερες πληροφορίες για την λειτουργική κατάσταση της μηχανής και των εξαρτημάτων αυτής, και είναι οι πιο σημαντικές, αξιόπιστες, αποδοτικές μέθοδοι για την πρόβλεψη βλαβών σε περιστρεφόμενες μηχανές, πρόβλεψη χρόνου αντικατάστασης φθαρμένων εξαρτημάτων, πρόβλεψη χρόνου ζυγοσταθμίσεων και διάγνωση των αιτιών που προκαλούν τις βλάβες (Κανδύλης, 2007 β).



Εικόνα 38: Ανάλυση περιοδικής ταλάντωσης στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο συχνότητας.

4.8.4.β. Τυπικές συχνότητες βλαβών σε ρουλεμάν.

Όταν το ρουλεμάν βρίσκεται σε καλή κατάσταση εμφανίζεται κορυφή στην θεμελιώδη συχνότητα. Βλάβες στις σφαίρες ή στον εξωτερικό δακτύλιο ή τον εσωτερικό δακτύλιο εμφανίζουν κορυφές σε συγκεκριμένες συχνότητες. Για παράδειγμα, όταν υπάρχει μία ρωγμή ή ένα σκάψιμο σε ένα τμήμα της εσωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού δακτυλίου, κατά την λειτουργία του εδράνου, κάθε φορά που μια σφαίρα περνά από το σημείο ρωγμής ή της φθοράς δημιουργεί ένα χτύπο βραχείας διάρκειας. Αυτός ο χτύπος δημιουργεί σήμα ταλάντωσης που διαδίδεται στην εξωτερική φωλιά του ρουλεμάν και στο περίβλημα της μηχανής και μπορεί να μετρηθεί με ένα αισθητήρα.

Η συχνότητα επανάληψης των χτύπων αυτών είναι γνωστή ως συχνότητα βλάβης του εξωτερικού δακτυλίου. Το πλάτος των χτύπων ή παλμών είναι ένδειξη του μεγέθους των χτύπων και επηρεάζεται από την ταχύτητα του άξονος του ρουλεμάν, τον συντελεστή διάδοσης της ταλάντωσης στην φωλιά του ρουλεμάν, το φορτίο του ρουλεμάν και την κατάσταση του λιπαντικού του. Έτσι η συχνότητα βλάβης ορίζεται από τις γεωμετρικές παραμέτρους του εδράνου, τα χαρακτηριστικά κατασκευής της μηχανής και την ταχύτητα του άξονος (Κανδύλης, 2007 β).

Οι συχνότητες αυτές μπορούν να βρεθούν σε βιβλιοθήκες δεδομένων που έχουν φτιάξει οι εταιρίες συστημάτων πρόγνωσης ή μπορούν να υπολογισθούν με αρκετά καλή προσέγγιση από τους τύπους :

Ελάττωμα στο εξωτερικό περίβλημα	$f_{BPO} = N_B * f_s * (1 - \frac{d}{D} \cos \theta)$
Ελάττωμα στο εσωτερικό περίβλημα	$f_{BPI} = N_B * f_s * (1 + \frac{d}{D} \cos \theta)$
Ελάττωμα στις σφαίρες	$f_B = \frac{d}{D} * f_s * (1 - \frac{d^2 * \cos^2 \theta}{D^2})$

Πίνακας 15: Τυπικές συχνότητες βλαβών σε ρουλεμάν.

Όπου:

d: Η εσωτερική διάμετρος του εδράνου κύλισης.

D: Η εξωτερική διάμετρος του εδράνου κύλισης.

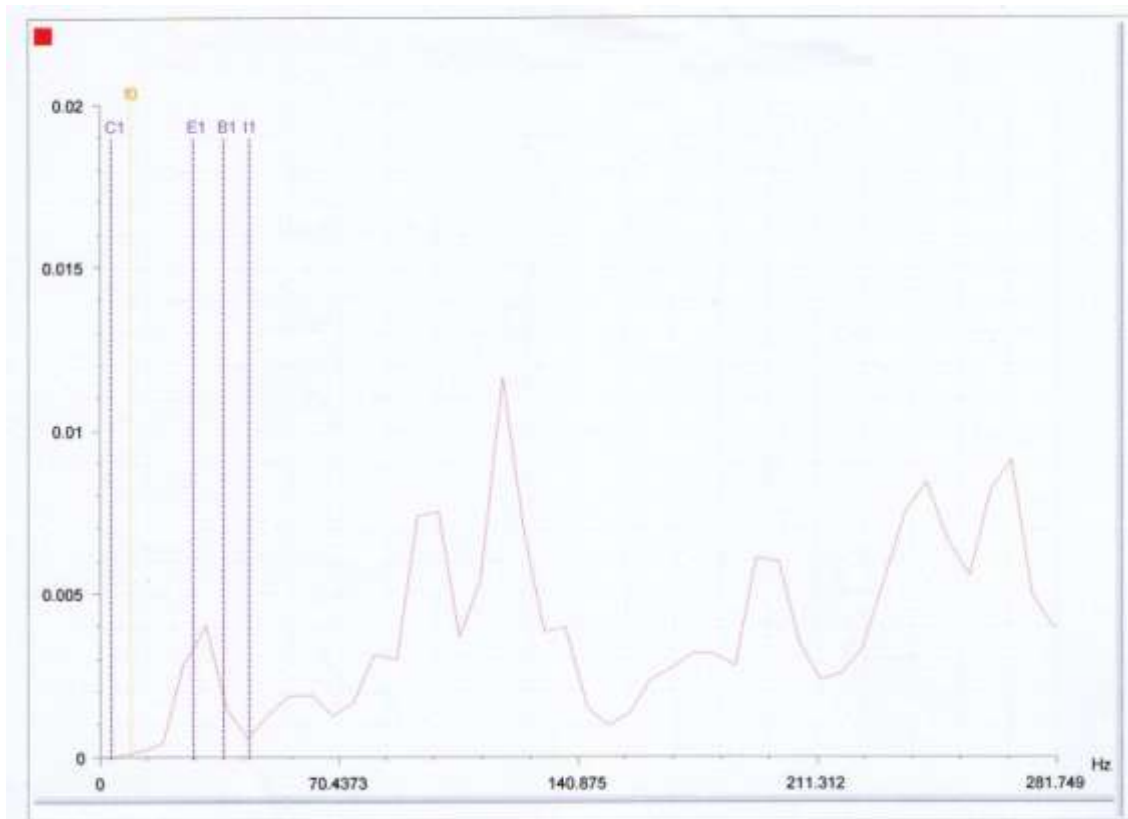
f_s: Η συχνότητα περιστροφής του άξονα και δίνεται από $f_s = 2 * \pi * f$.

f : Η συχνότητα περιστροφής της μηχανής σε Hz.

N_B: Ο αριθμός των σφαιρών του εδράνου κύλισης.

θ: Η γωνία επαφής.

4.8.4.γ. Προσδιορισμός των τυπικών συχνοτήτων βλαβών των ρουλεμάν.



Εικόνα 39: Τυπικές συχνότητες βλαβών ενός ρουλεμάν.

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε μία ανάλυση FFT ενός ρουλεμάν με κωδικό 6308N. Σε αυτό το διάγραμμα παρατηρούμε ότι υπάρχουν τέσσερα σημεία C1, E1, B1 και I1 όπου:

- C1: τυπική συχνότητα κλωβού.
- E1: τυπική συχνότητα εξωτερικού δακτυλίου.
- B1: τυπική συχνότητα σφαιρών.
- I1 : τυπική συχνότητα εσωτερικού δακτυλίου.

Οι παραπάνω συχνότητες προσδιορίστηκαν από ειδική βιβλιοθήκη που περιέχει τυπικές συχνότητες διαφόρων κωδικών ρουλεμάν.

Παρατηρώντας το διάγραμμα βλέπουμε ότι καμία κορυφή της ανάλυσης FFT δεν συμπίπτει με τις τυπικές συχνότητες. Αυτό σημαίνει ότι το ρουλεμάν δεν έχει καμία φθορά σε αυτά τα σημεία. Αν υπήρχε κάποια φθορά, για παράδειγμα στον εσωτερικό δακτύλιο, τότε στην συχνότητα I1, στην ανάλυση FFT θα εμφανιζόταν μία κορυφή.

Μετά την εμφάνιση κορυφών σε τυπικές συχνότητες βλαβών, η παρακολούθηση του ρουλεμάν γίνεται πιο εντατική για να προσδιορίσουμε την

τάση της μεταβολής (trending). Όταν οι τιμή των κορυφών αυξηθεί κατά δέκα με είκοσι φορές περίπου, τότε το ρουλεμάν πρέπει να αλλάχτεί.

Εκτός από συχνότητες βλάβης C1, E1, B1 και I1 του ρουλεμάν, με την αύξηση της φθοράς του μπορούν να εμφανιστούν πολλαπλές υψηλότερες συχνότητες που οφείλονται σε άλλα μικρά ελαττώματα του εδράνου και σε εσωτερικές συχνότητες ιδιοσυντονισμού.

Για τη διευκόλυνση της μελέτης της ανάλυσης του FFT τα όργανα μέτρησης διαθέτουν ειδικά φίλτρα που μπορούν να απομονώσουν τις συχνότητες που δεν μας χρησιμεύουν. Καθώς επίσης διαθέτουν και λειτουργία ζουμ που μας βοηθάει να εστιάσουμε στην συχνότητα που θέλουμε.

4.8.4.δ. Μεταβολή της συχνότητας των δονήσεων των ρουλεμάν συναρτήσει της εξέλιξης της φθοράς.

Ένα έδρανο σε καλή κατάσταση δημιουργεί ταλαντώσεις σε πολύ μεγάλο αριθμό συχνοτήτων άνω από 30kHz, που έχουν το ίδιο πλάτος στο φάσμα FFT. Αυτό ονομάζεται λευκός θόρυβος.

Το μέγιστο φορτίο σε ένα ρουλεμάν συγκεντρώνεται λίγα χιλιοστά κάτω από την επιφάνεια επαφής του εξωτερικού δακτυλίου. Μακροχρόνια λειτουργία του εδράνου θα δημιουργήσει ρωγμές ή κακώσεις στο εσωτερικό του εξωτερικού δακτυλίου. Αυτή η βλάβη δημιουργεί χτύπους μικρού εύρους όταν οι σφαίρες του εδράνου περνούν πάνω από την ρωγμή. Οι μικρού εύρους παλμοί δημιουργούν υψηλές συχνότητες στο φάσμα FFT. Στις χαμηλές συχνότητες του φάσματος τα πλάτη των συχνοτήτων είναι μικρά. Στις υψηλές όμως συχνότητες οι μικρού εύρους χτύποι των σφαιρών του ρουλεμάν διεγείρουν τις ιδιοσυχνότητες συντονισμού του επιταχυνσιομέτρου και έτσι ενισχύουν τα πλάτη τους.

Καθώς η φθορά του εξωτερικού δακτυλίου του ρουλεμάν αυξάνει, οι ρωγμές του δακτυλίου θα λειανθούν και θα γίνουν ευρύτερες και έτσι οι κρουστικοί παλμοί που δημιουργούν οι σφαίρες, θα γίνουν πιο ευρείς με αποτέλεσμα η περιοχή συχνοτήτων στο φάσμα να περιορισθεί σε χαμηλότερες συχνότητες κάτω των 20 kHz. Η αύξηση της περιοχής της ρωγμής θα κάνει τις σφαίρες να χοροπηδούν περισσότερο καθώς διέρχονται από την ρωγμή με αποτέλεσμα να δημιουργήσουν περισσότερη φθορά στην περιοχή.

Το ρουλεμάν με την βλάβη αυτή μπορεί να συνεχίσει την λειτουργία του για πολύ χρόνο αλλά θα προχωρήσει και στον εσωτερικό δακτύλιο λόγω του χοροπηδήματος των σφαιρών. Συνήθως οι βλάβες του εσωτερικού δακτυλίου αυξάνουν πιο γρήγορα από τις βλάβες του εξωτερικού δακτυλίου. Έτσι, αναμένεται ότι η φθορά του ρουλεμάν θα επιταχυνθεί.

Με την πάροδο του χρόνου, η βλάβη δεν θα περιορισθεί μόνον μεταξύ των σφαιρών και του εσωτερικού δακτυλίου. Η βλάβη αυτή κάνει τον εσωτερικό δακτύλιο να περιστρέφεται μέσα και έξω της ζώνης φορτίου και η συχνότητα της βλάβης θα διαμορφωθεί με την σχετική ταχύτητα περιστροφής και θα

δημιουργηθούν πλευρικές συχνότητες με διαφορά συχνότητας της ταχύτητας περιστροφής.

Στο τελευταίο στάδιο της βλάβης, βλάβες των σφαιρών και ενδοδιαμορφωμένες συχνότητες μεταξύ των συχνοτήτων βλαβών θα εμφανισθούν στο φάσμα(Κανδύλης, 2007 β).

4.8.5 Διάγνωση με την χρήση της ανάλυσης κατά συχνότητα στο πεδίο του χρόνου (ανάλυση Cepstrum)

Το όνομα Cepstrum δόθηκε για την τεχνική υπολογισμού μιας συνάρτησης που είναι φάσμα ενός λογαριθμικού φάσματος. Το 1963 η ανάλυση Cepstrum προτάθηκε σαν εναλλακτική λύση ανίχνευσης ήχων σεισμικών σημάτων. Λόγω του ότι το Cepstrum είναι το φάσμα ενός φάσματος, η λέξη Cepstrum προέκυψε από την λέξη Spectrum.

- Αρχικός ορισμός

Αρχικά το Cepstrum είχε ορισθεί ως το φάσμα ισχύος του λογάριθμου του φάσματος ισχύος. Μαθηματικά ορίζεται από τη σχέση:

$$C(\tau)=[F(\log F_{xx}(f))]^2$$

Όπου:

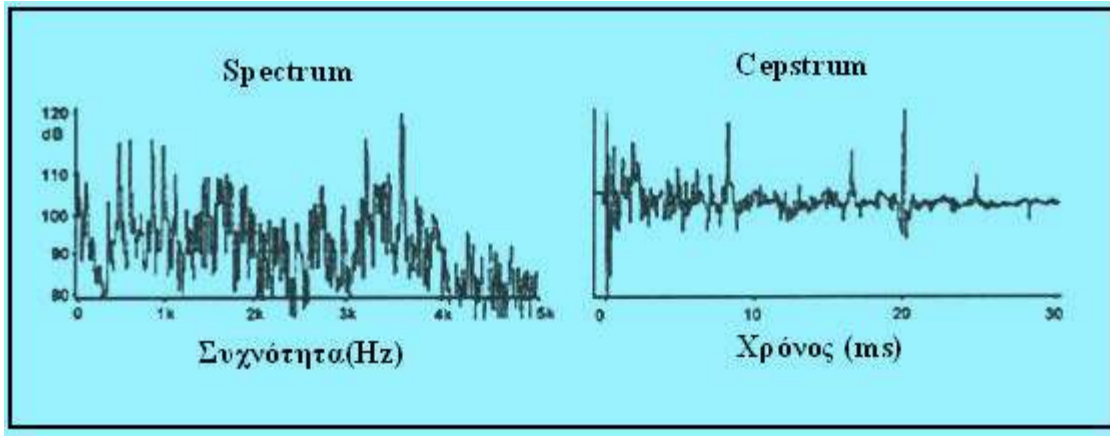
$$F_{xx}(f)=[F(f_x(f))]^2$$

- Νέος ορισμός

Σύμφωνα με νεώτερο ορισμό το Cepstrum ορίσθηκε ως ο αντίστροφος MF του λογαρίθμου του φάσματος ισχύος :

$$C(\tau)=F^{-1}[\log F_{xx}(f)]$$

Αξιοσημείωτο είναι ότι το φάσμα συχνοτήτων Spectrum στον οριζόντιο άξονα έχει κλίμακα συχνοτήτων και είναι στο πεδίο της συχνότητας, ενώ το Cepstrum στον οριζόντιο άξονα έχει κλίμακα χρόνου και είναι στο πεδίο του χρόνου. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι το Cepstrum μας φέρνει από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου.



Εικόνα 40: Spectrum και Cepstrum ανάλυση του ίδιου σήματος.

Όπως έχει ειπωθεί παραπάνω, οι βλάβες στα ρουλεμάν παράγουν περιοδικά χτυπήματα. Το φάσμα μιας τέτοιας δόνησης λοιπόν περιέχει μια χαρακτηριστική συχνότητα βλάβης και τις αρμονικές της, με το μεγαλύτερο πλάτος να βρίσκεται γύρω από την ενεργοποιημένη ιδιοσυχνότητα (excited resonance frequency). Επειδή όμως η ενέργεια αυτού του σήματος απλώνεται σε μια μεγάλη περιοχή συχνοτήτων μπορεί εύκολα να καλυφθεί από θόρυβο. Συνεπώς η απλή ανάλυση φάσματος δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική. Η ανάλυση Cepstrum είναι χρήσιμη στην εύρεση περιοδικοτήτων στο φάσμα, π.χ. τον εντοπισμό οικογενειών των αρμονικών των χαρακτηριστικών συχνοτήτων βλάβης, περιορίζοντας μια ολόκληρη οικογένεια αρμονικών σε μια απλή Cepstrum γραμμή.

Η ανάλυση Cepstrum είναι πολύ αποτελεσματική στην διάγνωση της κατάστασης των εδράνων κύλισης. Δεν έχει όμως λάβει μεγάλης αποδοχής, εξαιτίας της πολυπλοκότητας των υπολογισμών αλλά και της δυσκολίας ερμηνείας των αποτελεσμάτων της σε σχέση με παρόμοιες μεθόδους. (Κανδύλης, 2007 β) (Νάτσης, 2005).

5. Η χρήση της ακουστικής στην διάγνωση βλαβών.

5.1 Εισαγωγή.

Ακουστική είναι η επιστήμη που εξετάζει την παραγωγή της διάδοσης και τις εφαρμογές του ήχου. Η Ακουστική είναι επιστήμη με μεγάλο ενδιαφέρον διότι ο ήχος συνοδεύει όλες σχεδόν τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Εκτός από τη μετάδοση πληροφοριών, την ψυχολογική επίδραση στον άνθρωπο (ευεργετική ή ενοχλητική), ο ήχος έχει πολύ μεγάλες εφαρμογές στην έρευνα και την τεχνολογία. Για παράδειγμα, η ανάλυση του εκπεμπόμενου θορύβου από μία μηχανή μπορεί να προβλέψει την επερχόμενη βλάβη.

Οι ηχητικοί θόρυβοι προέρχονται από τις μηχανικές ταλαντώσεις που παράγονται στο εσωτερικό μιας μηχανής από μεταλλικά εξαρτήματα, λιπαντικά, άλλα κινούμενα ή ακίνητα υλικά. Οι θόρυβοι αυτοί της μηχανής εκπέμπονται στον εξωτερικό χώρο, στον αέρα, όπου μπορούμε να τους μετρήσουμε. Ο θόρυβος αυτός στον αέρα γύρω από αυτήν λέγεται και Air borne sound.

Σφάλματα σε μηχανές και σε εργοστασιακές εγκαταστάσεις μπορούν συχνά να ανιχνευθούν από μία αλλαγή στο θόρυβο που εκπέμπουν. Ένας έμπειρος μηχανικός, που εργάζεται χρόνια στην ίδια ντιζελομηχανή με πιστόνια, κυλίνδρους, στροφαλοφόρο άξονα, ακούγοντας το θόρυβο της μηχανής μπορεί να διαγνώσει περίπου ορισμένες βλάβες όπως μία κολλημένη βαλβίδα, το σπάσιμο ενός εξαρτήματος, τζόγο σε κουζινέτα, κακή ζυγοστάθμιση κλπ. Υπάρχουν κατασκευαστές που βασίζονται στις τέλει ακουστικές ικανότητες αυτών των έμπειρων μηχανικών, για τον εντοπισμό εσφαλμένων προϊόντων στον τελικό έλεγχο ποιότητας. Βασικός στόχος λοιπόν, είναι να αυτοματοποιηθούν έλεγχοι σαν και αυτοί, προκειμένου να γίνουν και ποιο αντικειμενικοί.

5.2 Τι είναι Ήχος.

Ήχος ορίζεται ως η μηχανική διαταραχή που διαδίδεται με ορισμένη ταχύτητα μέσα σε ένα μέσο που μπορεί να αναπτύξει εσωτερικές δυνάμεις (πχ ελαστικότητα, εσωτερικής τριβής) και έχει τέτοιο χαρακτήρα ώστε μπορεί να διεγείρει το αισθητήριο ακοής και να προκαλέσει ακουστικό αίσθημα.

Σε όλες τις πρακτικές περιπτώσεις όπου ένα αντικείμενο κινείται ή δονείται, ένα μικρό ποσοστό της ενέργειάς του μεταφέρεται στα γειτονικά σωματίδια του ελαστικού μέσου που το περιβάλλει υπό μορφή ταλάντωσης, η οποία με τη σειρά της επενεργεί ως νέα πηγή, που μεταφέρει και διαδίδει το ηχητικό κύμα. Δηλαδή ο ήχος μπορεί να περιγραφεί σαν μια μεταδιδόμενη μέσω του αέρα ηχητική πίεση που παράγεται από μια ηχητική πηγή (Σκαρλάτος, 2001).

5.4 Ηχητική πίεση.

Όπως έχει αναφερθεί ο ήχος μεταφέρεται μέσω του αέρα δημιουργώντας μία ηχητική πίεση στην ατμόσφαιρα. Με τον όρο ηχητική πίεση στην ακουστική εννοούμε τη δημιουργούμενη υπερπίεση ή υποπίεση (σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση) από το ηχητικό κύμα κατά τη διάδοση του. Μερικές φορές οι προσθαφαιρέσεις της ηχητικής πίεσης του θορύβου στην ατμοσφαιρική πίεση είναι πολύ μικρές και κάτω των 30 dB. Παρ' όλα αυτά μπορούν να γίνουν αντιληπτές από το ανθρώπινο αυτί. Επίσης ηχητική πίεση είναι το μέγεθος που μετρούν τα όργανα(Σκαρλάτος, 2001).

5.5 Μονάδα μέτρησης της ηχητικής πίεσης.

Το ανθρώπινο αυτί έχει την ικανότητα να ακούσει ηχητικές πιέσεις από περίπου 20μPa-200Pa, όπου Pa= Pascal. Όμως η μέτρηση του ήχου σε Pascal δίνει πολύ μεγάλη περιοχή που δεν είναι χρήσιμη στην πράξη.

Για να αποφευχθεί αυτό χρησιμοποιείται η λογαριθμική μονάδα dB=decibel. Η κλίμακα των dB είναι λογαριθμική και χρησιμοποιεί ως στάθμη αναφοράς το ελάχιστο της ακοής τα 20μPa. Τα db προέρχονται από την σχέση(Κανδύλης, 2007 β):

$$L_p = 20 \log \frac{P}{P_0}$$

όπου

- L_p = η ηχητική πίεση σε Db.
- P_0 = 20μPa και το.
- P = η μετρούμενη ηχητική πίεση.

5.6 Τύποι μικροφώνων.

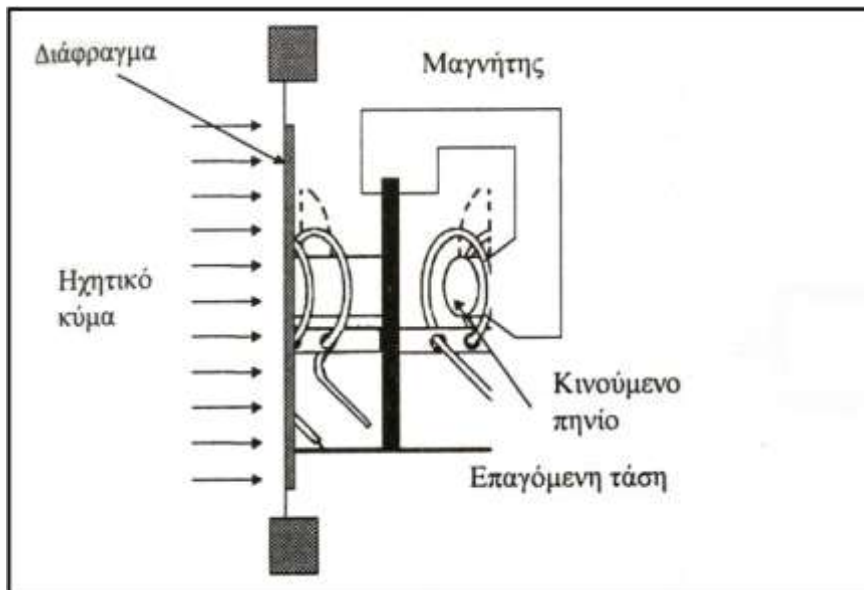
Το μικρόφωνο είναι ένα αισθητήριο που μετατρέπει την ηχητική πίεση σε ηλεκτρικό σήμα. Υπάρχουν 4 τύποι μικροφώνων.

Ηλεκτροδυναμική αρχή	Πιεζοηλεκτρική αρχή	Ηλεκτροστατική αρχή	
Δυναμικό ή κινητού πηνίου μικρόφωνο	Κεραμικό μικρόφωνο	Μικρόφωνο πυκνωτή	Μικρόφωνο Electret

Πίνακας 16: Τύποι μικροφώνου βάσει αρχής λειτουργίας

- Δυναμικά μικρόφωνα.

Τα δυναμικά μικρόφωνα χρησιμοποιούν την ηλεκτροδυναμική αρχή, όπως και τα αισθητήρια ταχύτητας. Ένα πηνίο είναι στερεωμένο σε πολύ λεπτή μεμβράνη η οποία όταν δέχεται κάποια ηχητική πίεση ταλαντώνεται μαζί με το πηνίο στον ρυθμό και στις συχνότητες της ηχητικής πίεσης. Το πηνίο κινείται σε πεδίο σταθερού μαγνήτη και αναπτύσσει ηλεκτρική τάση καθώς ταλαντεύεται στον ρυθμό της ηχητικής πίεσης. Τα μειονεκτήματα των μικροφώνων αυτών είναι μέγεθος και η μη γραμμική καμπύλη απόκρισης(Κανδύλης, 2007 β).



Εικόνα 41: Αρχή λειτουργίας δυναμικού μικροφώνου.

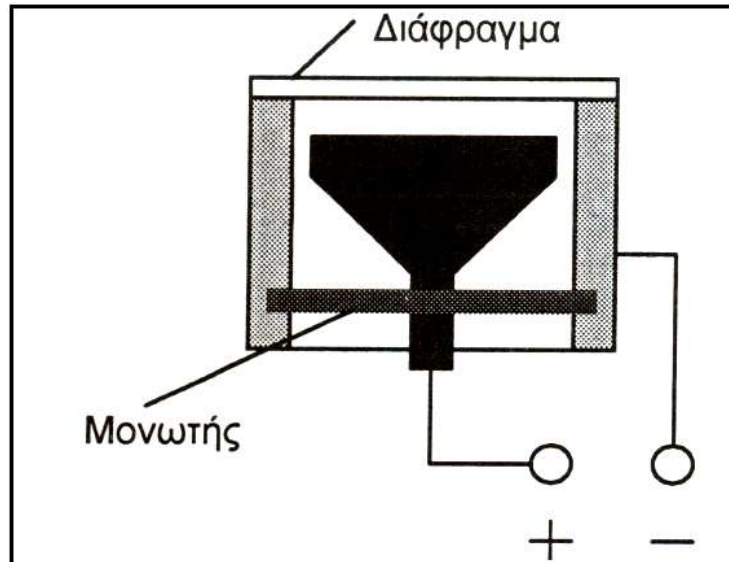
- Κεραμικά μικρόφωνα.

Τα κεραμικά μικρόφωνα χρησιμοποιούν την αρχή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Η μεμβράνη είναι στερεωμένη σε πιεζοηλεκτρικό κεραμικό κρύσταλλο και καθώς ταλαντεύεται στο ρυθμό της πίεσης αναπτύσσει ηλεκτρικό φορτίο που μετατρέπεται σε ηλεκτρική τάση από ένα ενισχυτή. Το μικρόφωνο αυτό έχει μεγαλύτερη και γραμμικότερη καμπύλη απόκρισης από το ηλεκτροδυναμικό μικρόφωνο, αλλά το μειονέκτημα του είναι ότι είναι ευαίσθητο σε κτυπήματα και κραδασμούς(Κανδύλης, 2007 β).

- Ηλεκτροστατικά μικρόφωνα.

Τα ηλεκτροστατικά μικρόφωνα βασίζονται στην αρχή του πυκνωτή. Ο πυκνωτής κατασκευάζεται από μια λεπτή μεμβράνη που βρίσκεται σε απόσταση από μια σταθερή μεταλλική επιφάνεια και μεταξύ τους υπάρχει κενό αέρος. Όταν η μεμβράνη δέχεται κάποια ηχητική πίεση, η χωρητικότητα του πυκνωτή μεταβάλλεται και αναπτύσσει ηλεκτρικό φορτίο, το οποίο με έναν ενισχυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρική τάση(Κανδύλης, 2007 β).

Στα ηλεκτροστατικά μικρόφωνα ανήκει το μικρόφωνο πυκνωτή και το μικρόφωνο Electret. Η μόνη διαφορά που έχουν είναι ότι στο μικρόφωνο πυκνωτή η μεταλλική πλάκα έχει τάση 50-200V ενώ στο μικρόφωνο Electret η μεταλλική πλάκα φέρει προφορτισμένο υλικό συγκεκριμένες ηλεκτρικής τάσης. Η αρχή λειτουργίας είναι η ίδια και στα δύο μικρόφωνα(Κανδύλης, 2007 β)



Εικόνα 42: Αρχή λειτουργίας μικροφώνου πυκνωτή.

5.7 Χαρακτηριστικά μέτρησης ήχων και θορύβων από μηχανές(overall).

Η μέτρηση της τιμής θορύβου μιας μηχανής είναι απαραίτητος για τις εξής συγκρίσεις :

- Τιμές ορίων που προδιαγράφονται από οδηγίες για την μηχανή.
- Τιμές που έχει δηλώσει ο κατασκευαστής της μηχανής στον αγοραστή.
- Μετρήσεις τιμών θορύβου κατά χρονικά διαστήματα για αξιολόγηση μεταβολών στην κατάσταση της μηχανής.

Οι μετρήσεις γίνονται με μικρόφωνο το οποίο πρέπει να είναι σε τρίποδο και να έχει κατεύθυνση προς την μηχανή. Το όργανο πρέπει να μετρά σε dB. Η ύπαρξη άλλων θορύβων γύρω από την μηχανή επηρεάζει τις μετρήσεις. Γι' αυτό πρέπει να εκτελείται ο εξής έλεγχος.

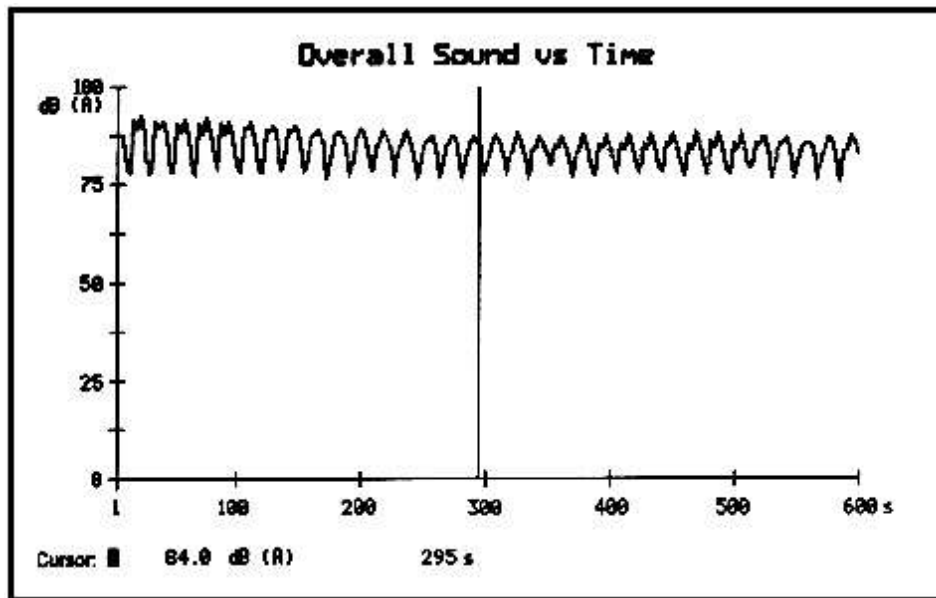
- Μέτρηση του θορύβου με την μηχανή εκτός λειτουργίας.
- Μέτρηση του θορύβου με την μηχανή σε λειτουργία.

Εάν η διαφορά της στάθμης θορύβου είναι μικρότερη από 3 dB, η μέτρηση του θορύβου της μηχανής δεν μπορεί να γίνει σωστά. Εάν η διαφορά είναι μεγαλύτερη από 10 dB, η μέτρηση του θορύβου της μηχανής είναι σωστή.

Εάν το μικρόφωνο τοποθετείται σε απόσταση διπλάσια του μήκους της μηχανής, η περιοχή θεωρείται **near field**. Εάν το μικρόφωνο τοποθετηθεί πολύ

μακριά από την μηχανή, άλλοι θόρυβοι και ανακλάσεις θορύβων εισέρχονται στην μέτρηση. Η περιοχή αυτή θεωρείται **reverberant field**.

Μετρήσεις θορύβου στις περιοχές **near field** και **reverberant field** πρέπει να αποφευχθούν. Η ιδανική θέση τοποθέτησης του μικροφώνου είναι μεταξύ των δύο περιοχών και ονομάζεται **free field**(Κανδύλης, 2007 β).



Εικόνα 43: Θόρυβος βιομηχανικού εξοπλισμού σε συνάρτηση του χρόνου.

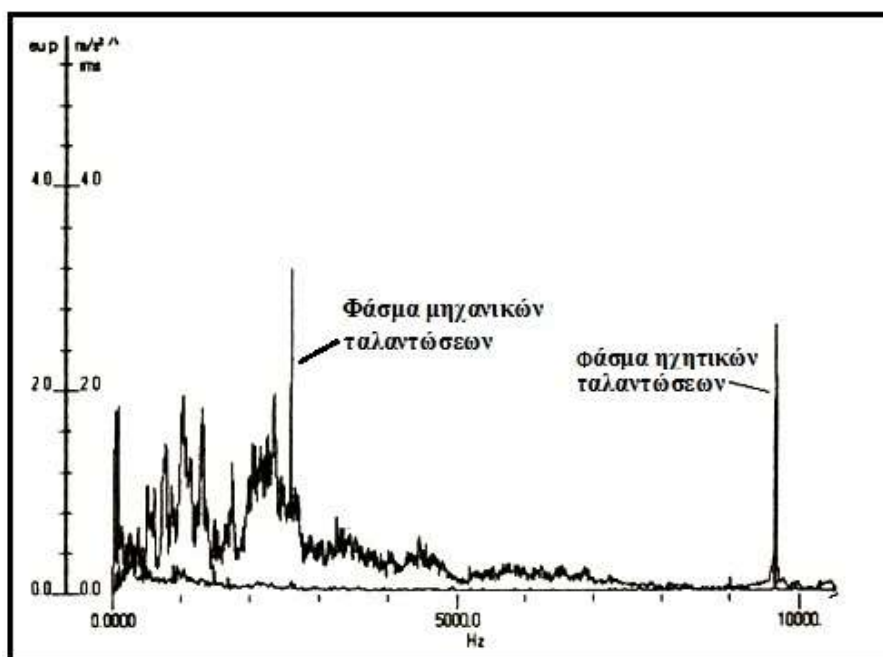
5.8 Χαρακτηριστικά της ανάλυσης της συχνότητας ήχων που προέρχονται από ταλαντώσεις(ανάλυση FFT).

Όπως είναι γνωστό από τα παραπάνω, η ανάλυση των συχνοτήτων των μηχανικών ταλαντώσεων επιτυγχάνεται με την χρήση αισθητήρων, όπως επιταχυνσιόμετρα, αισθητήρια μετατόπισης και αισθητήρια ταχύτητας.

Η ανάλυση συχνοτήτων από μηχανικές ταλαντώσεις όμως μπορεί να επιτευχθεί με την καταγραφή, με την χρήση μικροφώνων, ηχητικών σημάτων που προέρχονται από μηχανικές ταλαντώσεις και εκπέμπονται από τις μηχανές.

Η ηχητική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μηχανές όταν θέλουμε να αξιολογήσουμε ενοχλητικούς ηχητικούς θορύβους ή να ανιχνεύσουμε από που προέρχονται και τί τους προκαλεί. Επίσης, η ηχητική ανάλυση χρησιμοποιείται κατά την παραλαβή μηχανών μετά από επισκευή ή κατά την λειτουργία νέων μηχανών για να διαπιστώσουμε ότι δεν εκπέμπουν περισσότερο ηχητικό θόρυβο από αυτόν που προβλέπουν οι προδιαγραφές των κατασκευαστών

Όμως η ανάλυση συχνοτήτων μηχανικών ταλαντώσεων με την καταγραφή ηχητικών σημάτων εμφανίζει χαμηλότερη αξιοπιστία αποτελεσμάτων σε σχέση με την ανάλυση συχνοτήτων με την χρήση αισθητήρων γιατί επηρεάζεται από τον εξωτερικό θόρυβο(Κανδύλης, 2007 β).



Εικόνα 44: Το φάσμα των μηχανικών ταλαντώσεων και το φάσμα των ηχητικών ταλαντώσεων.

5.9 Μετρήσεις σε μηχανές με στηθοσκόπιο.

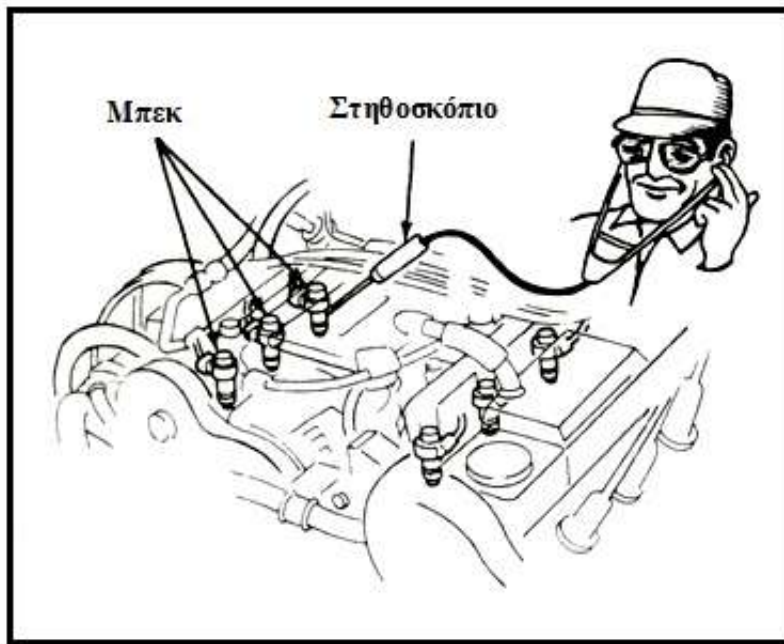
Οι δύο προηγούμενες τεχνικές χρησιμοποιούνται κυρίως στην βιομηχανία όχι στην γεωργική μηχανολογία. Βεβαίως θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και στην γεωργία με σκοπό την μείωση των εξόδων συντήρησης αλλά και για την αύξηση της αξιοπιστίας των γεωργικών μηχανημάτων.

Αντίθετα στην γεωργική μηχανολογία εδώ και πολλά χρόνια είναι διαδεδομένη η χρήση του στηθοσκοπίου. Το στηθοσκόπιο είναι ένα είδος κεραμικού μικροφώνου που στηρίζεται στο φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού.



Εικόνα 45: Ηλεκτρονικό στηθοσκόπιο

Με την χρήση ενός στηθοσκοπίου ένας έμπειρος τεχνικός μπορεί να καταλάβει αν υπάρχει κάποια βλάβη στον κινητήρα. Για παράδειγμα, μπορούν να εντοπιστούν προβλήματα όπως προβλήματα στο σύστημα τροφοδοσίας, κάποια κολλημένη βαλβίδα, φθορά στους κυλίνδρους, προβλήματα στους πύρους και σε άλλα στοιχεία του κινητήρα. Είναι μία πολύ διαδεδομένη μέθοδος που έχει ως μειονέκτημα ότι εξαρτάται από τον ανθρώπινο παράγοντα καθώς επηρεάζεται και από την ακοή του τεχνίτη αλλά και από την εμπειρία του. Γι' αυτό το λόγο γίνονται προσπάθειες για την οπτικοποίηση του ήχου ώστε τα αποτελέσματα των μετρήσεων να είναι αντικειμενικά.



Εικόνα 46: Έλεγχος των μπεκ με στηθοσκόπιο

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο της Γεωργικής Μηχανολογίας του <<Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών>> την περίοδο 2009-2010.

Ο σκοπός του ήταν η πρόγνωση και η διάγνωση βλαβών σε γεωργικά μηχανήματα με την μέθοδο της ανάλυσης των δονήσεων. Επειδή όμως σε έναν γεωργικό ελκυστήρα υπάρχουν πολλά σημεία που μπορεί να εμφανίσουν βλάβες εμείς επικεντρωθήκαμε στα ρουλεμάν του άξονα μετάδοσης της κίνησης (PTO) και τα ακροφύσια εκτόξευσης πετρελαίου (μπεκ) στο σύστημα τροφοδοσίας του πετρελαιοκινητήρα. Τα σημεία αυτά επιλέχθηκαν γιατί εμφανίζουν πιο συχνά προβλήματα.

Για τον έλεγχο των ρουλεμάν του PTO χρησιμοποιήθηκαν τρία όργανα για μετρήσεις overall, για ανάλυση συχνοτήτων FFT άλλα και για την μέτρηση των κρουστικών παλμών. Ενώ για τον έλεγχο των μπεκ του συστήματος τροφοδοσίας έγινε χρήση ηλεκτρονικού στηθοσκοπίου. Ο ήχος από το στηθοσκόπιο μεταφέρθηκε σε φορητό υπολογιστή για περαιτέρω ανάλυση.

Έγιναν μετρήσεις σε καινούργιους αλλά και παλιούς γεωργικούς ελκυστήρες σε διάφορες περιοχές της Αττικής. Όλες οι λεπτομέρειες για την διεξαγωγή του πειράματος αναφέρονται παρακάτω.

1. Τα όργανα μετρήσεων.

Για τις μετρήσεις του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν 3 διαφορετικά όργανα μέτρησης. Αυτά ήταν τα εξής:

- 1) Bearing Checker.
- 2) Vibrotest 60.
- 3) OneproD MV2.

1.1. Bearing Checker.

Το Bearing Checker της εταιρίας SPM είναι το απλούστερο όργανο που χρησιμοποιήθηκε κατά της διάρκεια των μετρήσεων. Χρησιμοποιείται για την μέτρηση του επιπέδου των κρουστικών παλμών κατά την διάρκεια λειτουργίας της μηχανής μέσω ενσωματωμένου μικροεπεξεργαστή που αναλύει δείγματα κρουστικών παλμών από διαφορετικά ρουλεμάν και καταγράφει πληροφορίες για την λειτουργική τους κατάσταση. Χρησιμοποιείται επίσης και για την μέτρηση της θερμοκρασίας των διαφόρων επιφανειών της μηχανής με την βοήθεια ενός υπέρυθρου αισθητήρα.

Διαθέτει μία οθόνη που καταγράφει τις διαφορετικές πληροφορίες των μετρήσεων και τρία μικρά λαμπάκια LED (Πράσινο- Κίτρινο- Κόκκινο) που

δίνουν άμεσα την κατάσταση του ρουλεμάν. Ο αισθητήρας του οργάνου διαθέτει έναν μετατροπέα που μετατρέπει τους κρουστικούς παλμούς σε ηλεκτρικό σήμα για να διαβάζονται από το όργανο. Διαθέτει και ειδικά ακουστικά τα οποία απομονώνουν τον ήχο για καλύτερη παρακολούθηση των ρουλεμάν λειτουργώντας ως ηλεκτρονικό στηθοσκόπιο, εντοπίζοντας μ' αυτόν τον τρόπο ηχητικές ανωμαλίες κατά την λειτουργία της μηχανής.



Εικόνα 47: Η συσκευή Bearing Checker

Το Bearing Checker μετράει την ταχύτητα πρόσκρουσης εντός μίας μεγάλης δυναμικής ακτίνας. Προκειμένου να απλοποιηθεί η ένδειξη και επομένως η εκτίμηση της κατάστασης χρησιμοποιείται μία λογαριθμική μετρητική μονάδα decibel shock value (dBsv).

Το dBsv είναι η γενική μετρητική μονάδα των κρουστικών παλμών και μετρώντας μ' αυτήν μας δίνεται ένα μέρος της πληροφορίας που χρειάζεται για να κρίνουμε σωστά την λειτουργική κατάσταση του ρουλεμάν.

Το άλλο μέρος της πληροφορίας που χρειάζεται είναι ένα πρότυπο σύγκρισης που αποκτάται μετρώντας επίπεδα κρουστικών παλμών πολλών καινούργιων ρουλεμάν και μετράται σε μονάδα dBi (decibel initial) η οποία συσχετίζεται με την ταχύτητα περιστροφής του ρουλεμάν και με την διάμετρο της ατράκτου. Η τιμή σε dBi μπορεί να μετράται από το όργανο ή να εισάγεται χειροκίνητα με τιμή +60 έως -9. Αν επιχειρήσουμε να εισάγουμε μία τιμή εκτός του προηγούμενου ορίου θα προκύψει μη αναγνωρίσιμη ένδειξη οργάνου dBi"- -".

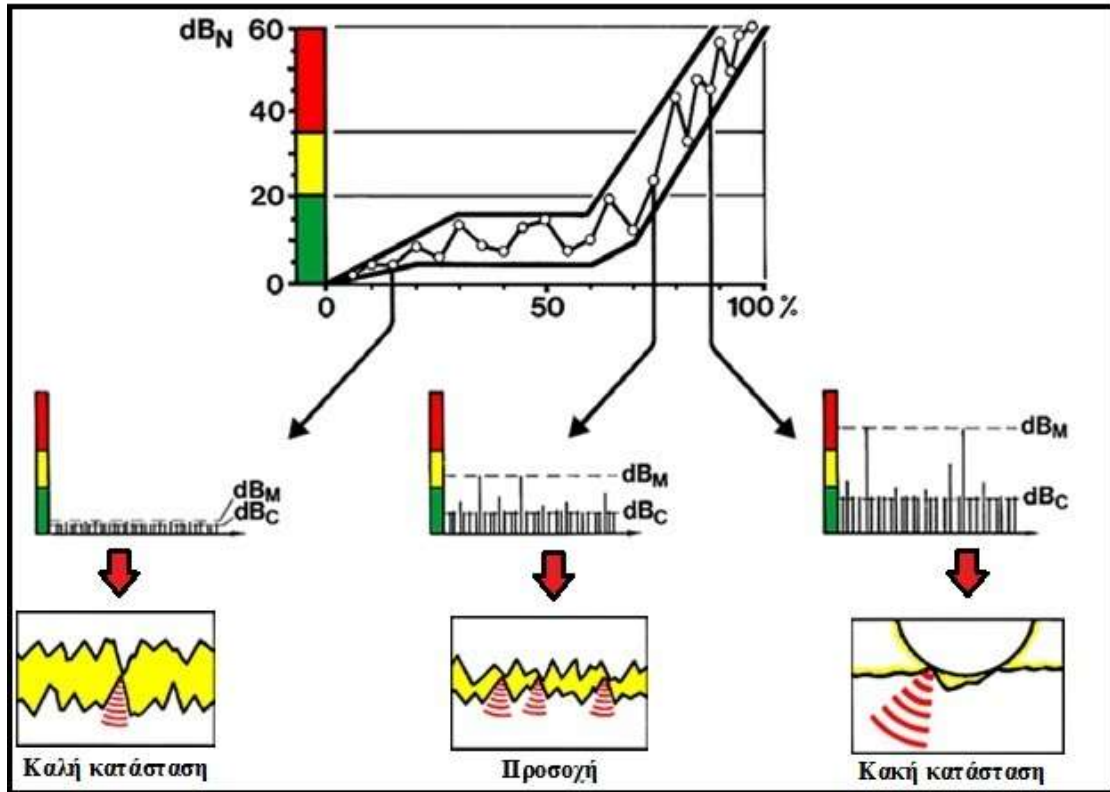
Για να αποκτήσουμε την κανονική τιμή κρουστικού παλμού dBN (decibel normalized), αφαιρούμε την τιμή dBi από την dBsv. Η μονάδα dBN είναι η μονάδα μέτρησης για την κατάσταση λειτουργίας των ρουλεμάν.

Το Bearing Checker παίρνει ένα δείγμα μέτρησης κρουστικών παλμών που προέκυψε σε μία περίοδο και δείχνει:

- Τιμή dBm για το μικρό αριθμό των ισχυρών κρουστικών παλμών.
- Τιμή dBc για το μεγάλο αριθμό των ασθενών κρουστικών παλμών

- Λαμπάκια ένδειξης LED (για αναγνωρίσιμη τιμή dBi μόνο): Πράσινο μέχρι 20 dBN = Καλή κατάσταση - Κίτρινο 21-34 dBN = Προσοχή - Κόκκινο μέχρι 35 dBN και πάνω = Κακή.

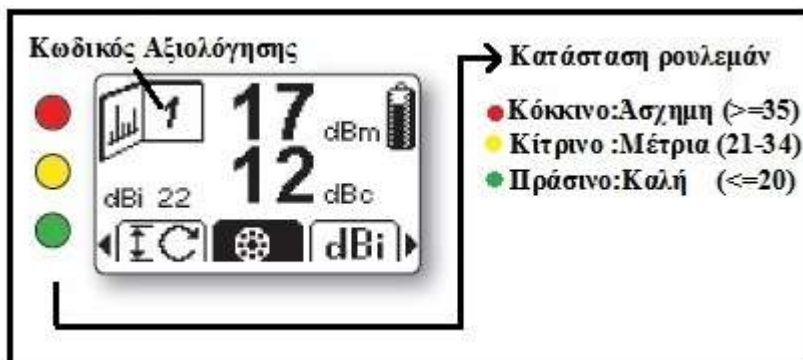
Για μη κανονική ένδειξη, ρυθμίζουμε το όργανο για μέτρηση σε dBi αλλά μετράμε σε dBsn χωρίς ένδειξη λειτουργικής κατάστασης. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για συγκριτικές ενδείξεις σε διαφορετικά ρουλεμάν ή/και σε κρουστικούς παλμούς άλλης προέλευσης.



Εικόνα 48: Η μέθοδος dBm/ dBc

Μετά την εισαγωγή στο όργανο του αριθμού των στροφών και την διάμετρο του άξονα για τον προσδιορισμό του dBi προχωράμε στην μέτρηση.

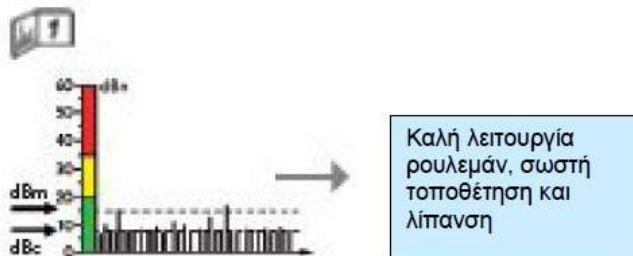
Αφού ολοκληρωθεί η μέτρηση εκτός από την φωτεινή ένδειξη (πράσινο, κίτρινο, κόκκινο) που εμφανίζεται δίπλα στην οθόνη, στην οθόνη του οργάνου αναγράφονται ο κωδικός αξιολόγησης καθώς και οι τιμές dBm και dBc.



Εικόνα 49: Η οθόνη του οργάνου Bearing Checker.

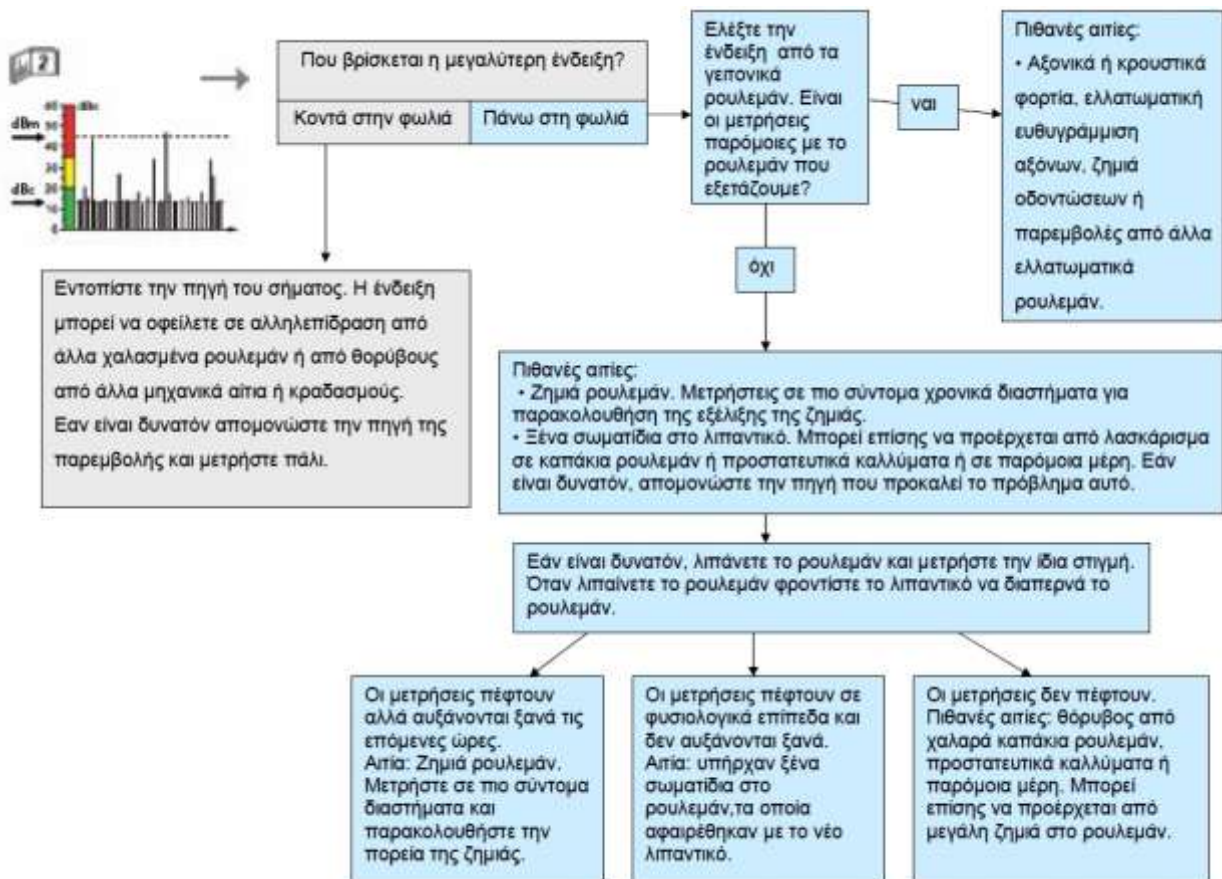
Για την διευκόλυνση των μετρήσεων έχει δημιουργηθεί ένας οδηγός διάγνωσης των ενδείξεων ώστε ανάλογα με τον κωδικό αξιολόγησης που λαμβάνουμε να ξέρουμε και ποιες είναι οι πιθανές αιτίες αυτής της ένδειξης (bearing checker manual).

• Για Κωδικό αξιολόγησης (1)

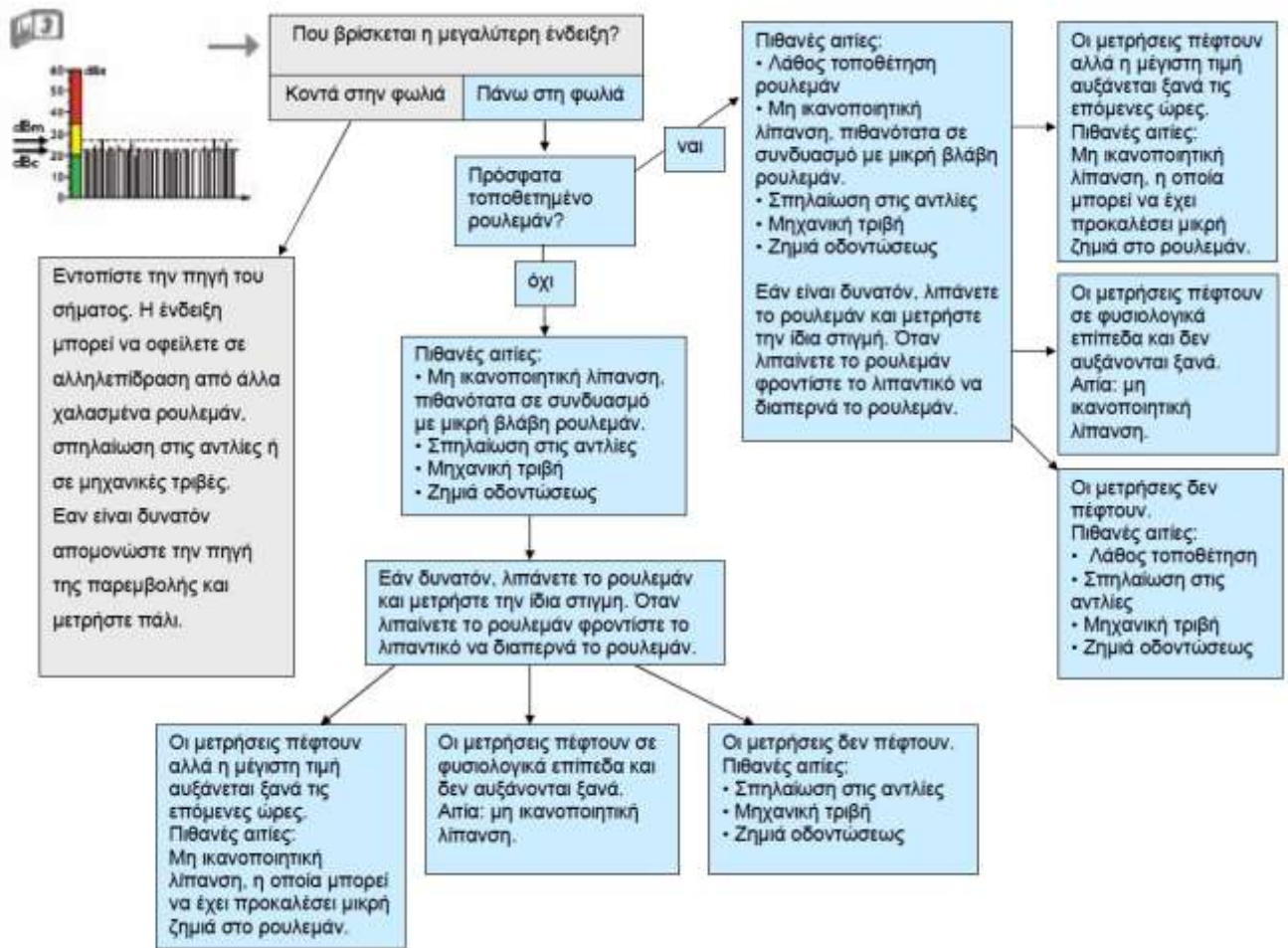


Η μορφή του διαγράμματος κρουστικών παλμών 1 δείχνει ένα ρουλεμάν σε καλή κατάσταση: με ελάχιστη τιμή κάτω από 10 dBN και μέγιστη τιμή κάτω από 20 dBN. Ένα διάγραμμα αυτής της μορφής δεν χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση γιατί δεν επηρεάζεται η εικόνα κατάστασης του ρουλεμάν από μικροδιακυμάνσεις.

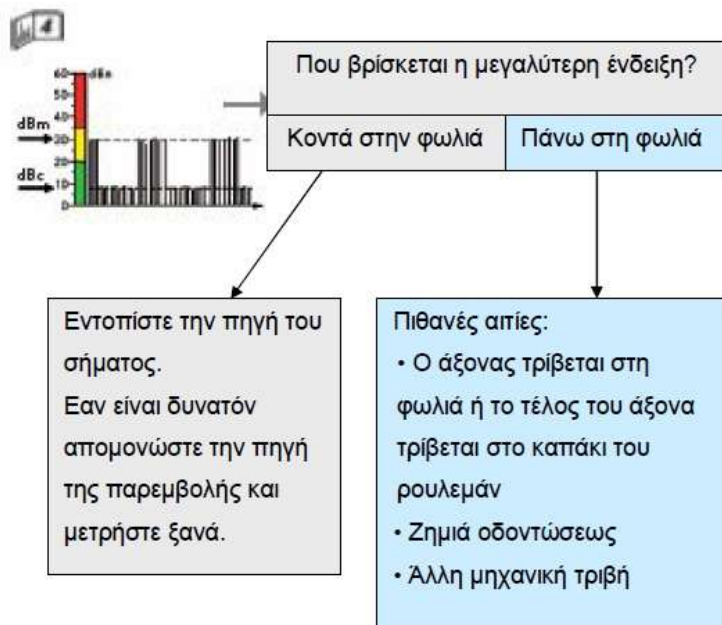
• Για Κωδικό αξιολόγησης (2)



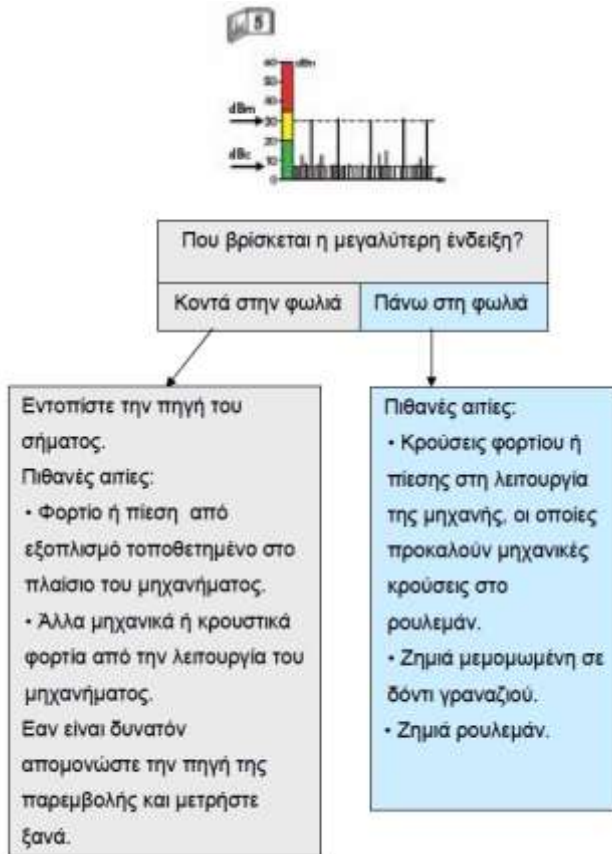
• Για Κωδικό αξιολόγησης (3)



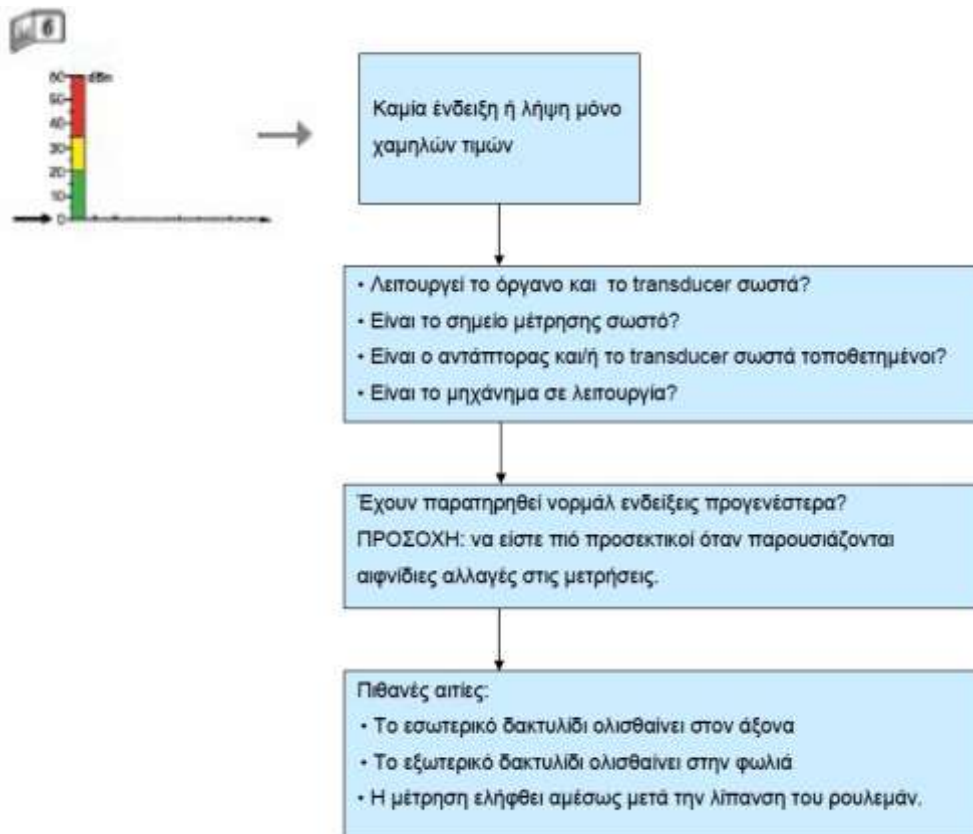
• Για Κωδικό αξιολόγησης (4)



• Για Κωδικό αξιολόγησης (5)



• Για Κωδικό αξιολόγησης (6)



Το Bearing Checker χρησιμεύει και ως ηλεκτρονικό στηθοσκόπιο. Αυτή η λειτουργία μας δίνει την δυνατότητα να παρακολουθούμε και να ακούσουμε το επίπεδο των κρουστικών παλμών και να προσδιορίσουμε την πηγή του παλμού καθώς επίσης και να εντοπίσουμε βλάβες που δημιουργούν μεταβολές στον ήχο του γεωργικού μηχανήματος.

1.2 Vibrotest 60.

Το Vibrotest 60 της εταιρίας Brüel & Kjær είναι ένα φορητό όργανο μέτρησης δονήσεων. Έχει την δυνατότητα μετρήσεων overall και ανάλυση συχνότητας FFT με την μέθοδο Spectrum και Cepstrum καθώς επίσης δυνατότητα για ευθυγράμμιση και ζυγοστάθμιση.

Στις τιμές overall μας δίνει την δυνατότητα να μετρήσουμε μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση σε τιμές RMS, PICK to PICK και PICK. Μπορεί να μετρήσει συχνότητες από 1Hz έως 20 kHz. Επιπλέον, διαθέτει φίλτρα για να απομονώνουμε τις συχνότητες που δεν χρειαζόμαστε καθώς και λειτουργία ζουμ που βοηθάει στην ανάλυση FFT.



Εικόνα 50: Η συσκευή Vibrotest 60

Με το vibrotest 60 εκτός από μετρήσεις **overall** , έγιναν και μετρήσεις της μονάδας **BCU**. Η μονάδα **BCU** μετράται μόνο από τα φορητά όργανα μέτρησης και ανάλυσης ταλαντώσεων του εργοστασίου Brüel & Kjær που είναι βαθμονομημένα σε μονάδες **BCU** και στηρίζεται στην μέθοδο **BEARGON=Bearing Condition**.

Η μέθοδος **BEARCON**, που σημαίνει κατάσταση των εδράνων, βασίζεται στην μέτρηση του πλάτους των παλμών κρούσης και του πλάτους ταλαντώσεων στην επιφάνεια των μηχανών. Στην μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται πάντοτε ο αισθητήρας επιταχυνσιόμετρο με συχνότητα ιδιοσυntonισμού 32kHz περίπου. Το επιταχυνσιόμετρο μετατρέπει το πλάτος των ταλαντώσεων σε ηλεκτρικό σήμα. Οι παλμοί κρούσης που προστίθενται στις ταλαντώσεις, κάνουν το επιταχυνσιόμετρο να δονείται στην ιδιοσυχνότητα του 32 kHz και το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται

προστίθεται στο ηλεκτρικό σήμα του επιταχυνσιόμετρου. Το επιταχυνσιόμετρο στην περίπτωση αυτή μπορεί να συγκριθεί με ένα κώδωνα που δονείται στην ιδιοσυχνότητα συντονισμού του όταν κτυπηθεί με ένα σφυρί.

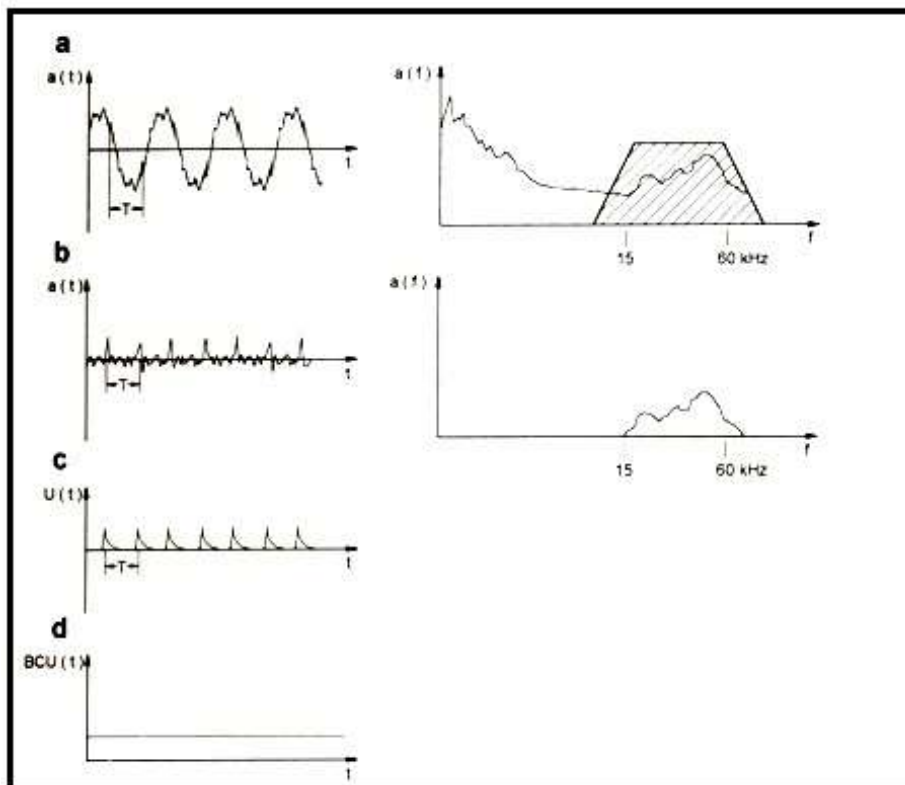
Το σήμα εξόδου του επιταχυνσιόμετρου δίδει το συνδυασμένο πλάτος των ταλαντώσεων και παλμών κρούσης στο σημείο μέτρησης.

Με το φίλτρο στενής ζώνης 15-60ΚΗζ επιλέγουμε μόνο τους παλμούς κρούσης και απορρίπτουμε τις ταλαντώσεις υψηλής ενέργειας, χαμηλής συχνότητας και τον ηλεκτρονικό θόρυβο που υπάρχει στην υψηλή περιοχή συχνοτήτων των ταλαντώσεων. Στην συνέχεια με ένα ειδικά επιλεγμένο φωρατή κορυφής, ανορθώνουμε τους παλμούς και τους μετατρέπουμε σε ένα συνεχές σήμα που περιέχει το πλάτος τους, το εύρος συχνοτήτων τους και την περιοδικότητα τους.

Η μετρούμενη ποσότητα **BCU** είναι αναλόγως του πλάτους και των χαρακτηριστικών των παλμών κρούσης, αλλά επηρεάζεται και από άλλους συντελεστές όπως πώς εγκαταστάθηκαν τα έδρανα, η ταχύτητα της μηχανής, οι συνθήκες φορτίου, οι ανοχές τοποθέτησης, τα χρησιμοποιούμενα λιπαντικά, η μετρητική θέση και η μέθοδος χρήσης του επιταχυνσιόμετρου.

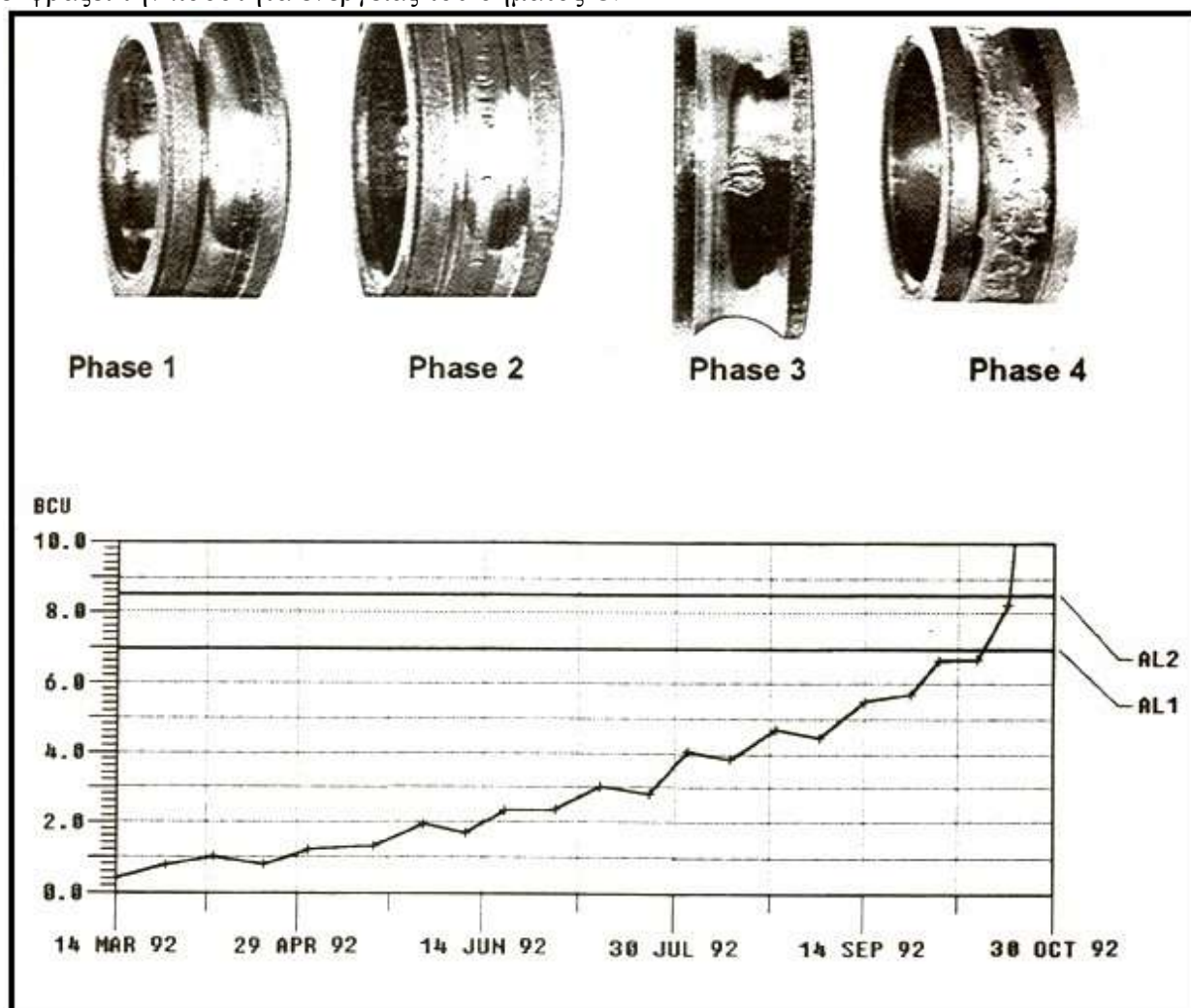
Πρέπει η μέτρηση της ποσότητας **BCU** να γίνεται κατά συχνά χρονικά διαστήματα π.χ. μια φορά τον μήνα και να αξιολογείται η εξέλιξη της αύξησης της τιμής της ποσότητας **BCU** συναρτήσει του χρόνου <<trend>>.

Το καλύτερο είναι η μέτρηση **BCU** να αρχίσει όταν εγκαθιστούμε ένα καινούργιο έδρανο στην μηχανή. Το έδρανο φθάνει σε κατάσταση βλάβης όταν η μονάδα **BCU** ανεβεί δέκα με είκοσι φορές από την αρχική της τιμή όταν το έδρανο ήταν καινούργιο(Κανδύλης, 2007 β).



Εικόνα 51: Διαδικασία για τον καθορισμό της κατάστασης του εδράνου BEARCON

- a) Παλμοί, κρούσεις και ταλαντώσεις αριστερά, και δεξιά το φάσμα συχνοτήτων.
- b) Οι παλμοί κρούσης που έχουν διαχωριστεί με ένα φίλτρο στενής ζώνης 15-60ΚΗζ
- c) Οι παλμοί κρούσης που έχουν αναδειχθεί με την χρήση ενός φωρατή κορυφής (peak detector)
- d) Η ποσότητα BEARCON που ορίζεται από την μονάδα BCU= Bearing Condition Unit και εκφράζει την ποσότητα ενεργείας του σήματος C.



Εικόνα 52: Εξέλιξης της βλάβης στον εσωτερικό δακτύλιο ενός εδράνου συναρτήσει της τιμής BCU(Κανδύλης, 2007 β)

1.3 OneproD MV-2C.

Το OneproD MV-2C της εταιρίας Areva είναι και αυτό ένα όργανο καταγραφής και ανάλυσης δονήσεων με δυνατότητα ευθυγράμμισης και ζυγοστάθμισης. Τα χαρακτηριστικά του σε γενικές γραμμές είναι ίδια με το Vibrotest 60. Με το OneproD MV-2C κάναμε μετρήσεις overall μετατόπισης επιτάχυνσης ταχύτητας καθώς και ανάλυση FFT με την μέθοδο spectrum. Τα αποτελέσματα επεξεργάστηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή στο πρόγραμμα OneproD XPR της ίδιας εταιρίας.



Εικόνα 53: Η συσκευή OneproD MV-2C.

2 Τα τμήματα στα οποία έγινε έλεγχος.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έγινε έλεγχος στα ρουλεμάν του άξονα μετάδοσης της κίνησης και στα ακροφύσια εκτόξευσης πετρελαίου (μπεκ) στο σύστημα τροφοδοσίας του πετρελαιοκινητήρα. Παρακάτω γίνεται μία περιγραφή της λειτουργίας του καθενός από αυτά τα εξαρτήματα.

2.1 Άξονας μετάδοσης της κίνησης (PTO).

Όλοι οι σύγχρονοι γεωργικοί ελκυστήρες είναι εφοδιασμένοι με ένα άξονα με τον οποίο μεταβιβάζουν ισχύ σε γεωργικά μηχανήματα. Ο άξονας αυτός ονομάζεται άξονας μετάδοσης της κίνησης ή άξονας μετάδοσης ισχύος ή δυναμοδότης άξονας ή και δυναμολήπτης άξονας (power-take-off, PTO). Ο άξονας μπορεί να μεταδίδει την κίνηση στα παρελκόμενα μηχανήματα είτε ο ελκυστήρας μετακινείται είτε εργάζεται εν στάση. Στην πρώτη περίπτωση ο ελκυστήρας πρέπει να διαθέτει ισχύ τόσο για την έλξη όσο και για τη λειτουργία του μηχανήματος.

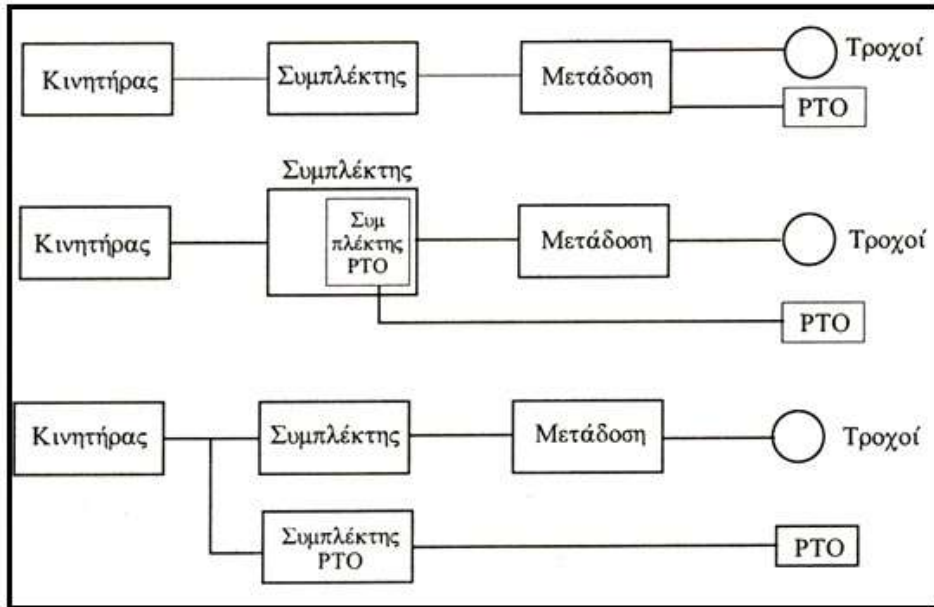
Η θέση του άξονα μετάδοσης της κίνησης είναι τυποποιημένη. Βρίσκεται στο πίσω μέρος του ελκυστήρα, πάνω από τη δοκό έλξης και στο κέντρο της απόστασης μεταξύ των οπισθίων τροχών. Η ταχύτητα περιστροφής του κυμαίνεται



ανάλογα με τον αριθμό στροφών της μηχανής. Για καλύτερη πάντως ποιότητα εργασίας των μηχανημάτων και αποδοτικότερη λειτουργία ο άξονας θα πρέπει να εργάζεται με τυποποιημένο αριθμό στροφών που είναι είτε 540 είτε 1000 στρ/λεπτό. Για να επιτευχθεί αυτό, ο κινητήρας θα πρέπει να περιστραφεί με ορισμένη ταχύτητα που συνήθως είναι σημειωμένη στο στροφόμετρο του ελκυστήρα. Στους μεγάλους ελκυστήρες με ισχύ πάνω από 65 Ps συνήθως υπάρχουν δύο άξονες μετάδοσης της κίνησης από τους οποίους ο ένας περιστρέφεται με 540 στρ/λεπτό και ο άλλος με 1000 στρ/λεπτό. Στους μικρούς υπάρχει μόνο ένας που περιστρέφεται με 540 στρ/λεπτό (Τσατσαρέλης, 1997).

Εικόνα 54: Άξονας μετάδοσης της κίνησης (PTO).

Η μετάδοση της κίνησης στον άξονα μετάδοσης της κίνησης γίνεται με τρεις τρόπους.



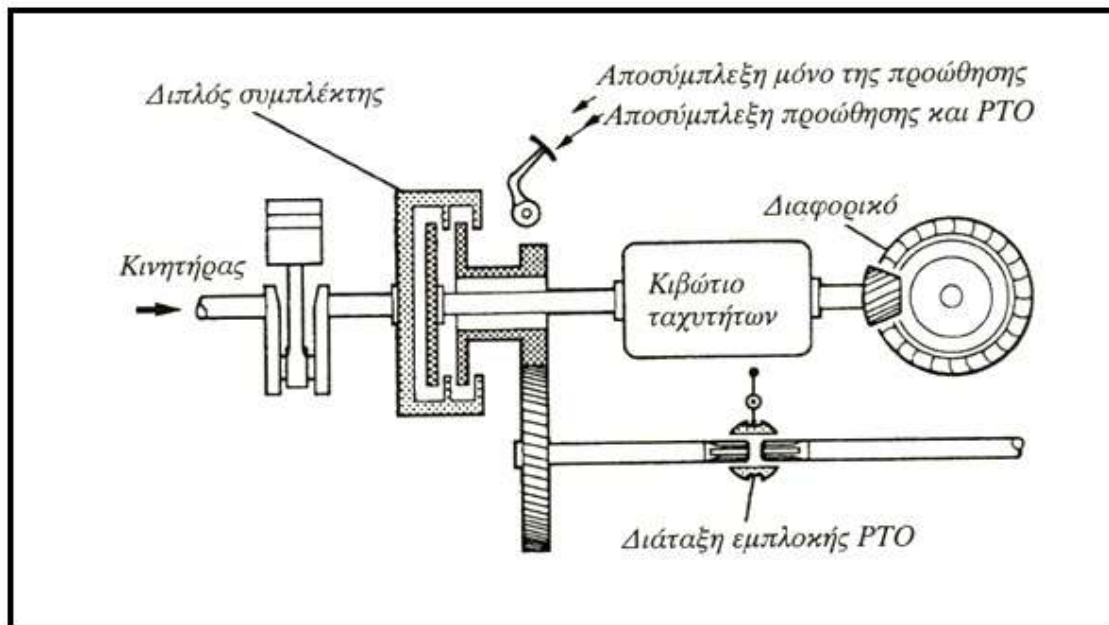
Εικόνα 55: Σχηματική παράσταση της μετάδοσης της κίνησης στο PTO

- Εξαρτημένος άξονας PTO.

Ο άξονας μετάδοσης της κίνησης της πρώτης κατηγορίας παίρνει κίνηση κατευθείαν από το κιβώτιο ταχυτήτων με έναν κύριο συμπλέκτη. Περιστρέφεται μόνον εφόσον μετακινείται ο ελκυστήρας και μάλιστα με ταχύτητα περιστροφής ανάλογη με την ταχύτητα προώθησης του ελκυστήρα. Με τη διακοπή της μετακίνησης σταματά και η λειτουργία του. Με αναστροφή της πορείας του ελκυστήρα (όπισθεν) αντιστρέφεται και η φορά περιστροφής του. Ο άξονας αυτός ονομάζεται εξαρτημένος ή ανάλογος της προώθησης και, όπως γίνεται φανερό, δεν μπορεί να δώσει κίνηση σε μηχάνημα όταν ο ελκυστήρας βρίσκεται σταματημένος. Ο άξονας αυτός είναι ο παλαιότερος τύπος και λόγω των μειονεκτημάτων του δεν χρησιμοποιείται σήμερα.

- Ημιανεξάρτητος άξονας PTO.

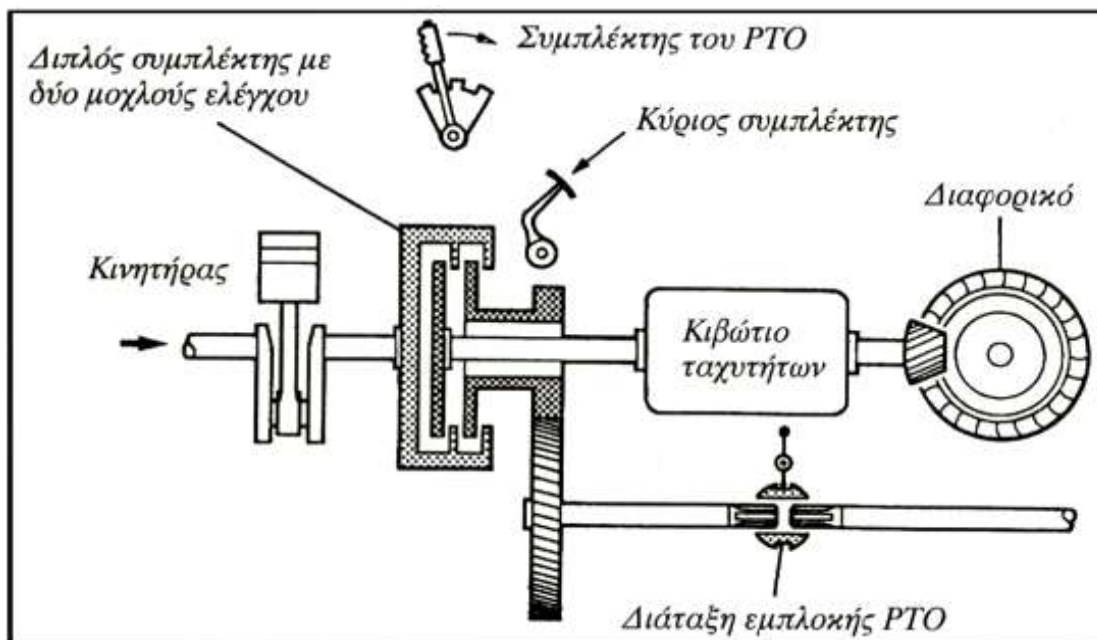
Ο άξονας της δεύτερης κατηγορίας παίρνει κίνηση από διπλό συμπλέκτη ο οποίος ενεργοποιείται σε δύο βαθμίδες. Στην πρώτη βαθμίδα (περίπου μισό της διαδρομής) ο συμπλέκτης αποσυμπλέκει τη μετάδοση στο κιβώτιο ενώ με τη δεύτερη βαθμίδα αποσυμπλέκεται και το PTO. Ο άξονας αυτός ονομάζεται ημιανεξάρτητος. Μπορεί να μεταδίδεται κίνηση στο PTO χωρίς να μετακινείται ο ελκυστήρας αλλά δεν μπορεί να σταματήσει η μετάδοση χωρίς να σταματήσει ο ελκυστήρας.



Εικόνα 56: Ημιανεξάρτητος άξονας PTO.

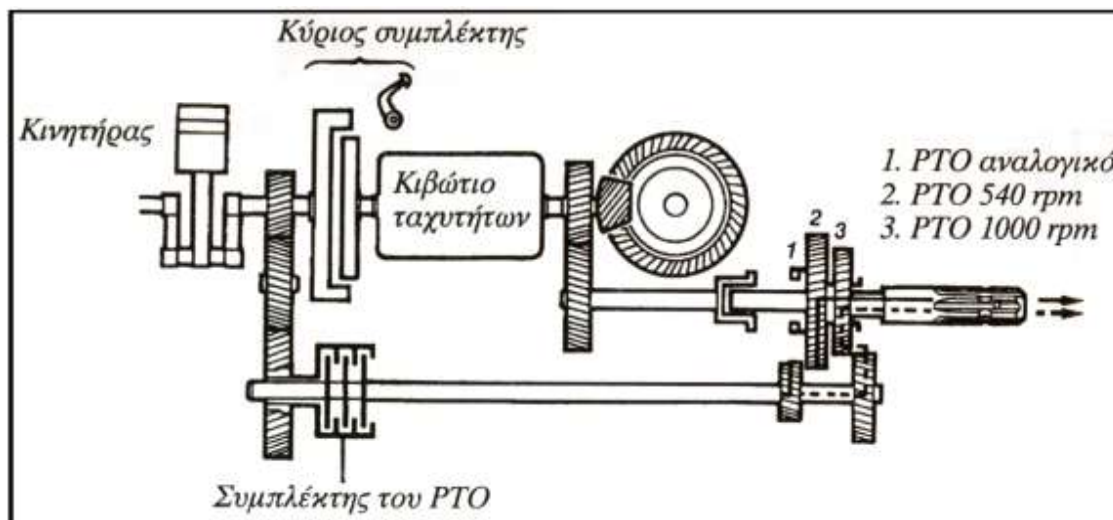
- Ανεξάρτητος άξονας PTO.

Ο ανεξάρτητος άξονας παίρνει κίνηση από ανεξάρτητο συμπλέκτη. Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν δύο τρόποι ενεργοποίησης. Στον πρώτο υπάρχει διπλός συμπλέκτης με δύο χωριστούς μοχλούς. Ο ποδομοχλός ενεργοποιεί τη μετάδοση στο κιβώτιο ταχυτήτων ενώ ένας χειρομοχλός ενεργοποιεί το PTO. Είναι ο άξονας που κυρίως χρησιμοποιείται στους ελκυστήρες.



Εικόνα 57: Ανεξάρτητος άξονας PTO.

Στο δεύτερο τρόπο ενεργοποίησης υπάρχει πολύδισκος συμπλέκτης ενεργοποιούμενος με υδραυλικό σύστημα. Η μετάδοση της κίνησης στο κιβώτιο ταχυτήτων με τον τρόπο αυτό είναι παντελώς ανεξάρτητη της μετάδοσης της κίνησης στο PTO. Η κατασκευή είναι περισσότερο πολύπλοκη και απαιτείται υδραυλική μετάδοση. Ο άξονας PTO της κατηγορίας αυτής καλείται και τελείως ανεξάρτητος. Οι νεότεροι τύποι ελκυστήρων είναι εφοδιασμένοι συνήθως με τέτοιο άξονα.



Εικόνα 58: Τελείως ανεξάρτητος άξονας PTO.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ταχύτητα περιστροφής των αξόνων PTO είναι τυποποιημένη σε 540 ή 1000 στρ/min. Στους νέους τύπους ελκυστήρων για λόγους κυρίως οικονομίας καυσίμων υπάρχουν δύο ταχύτητες περιστροφής ενός μόνο PTO. Τον τυποποιημένο αριθμό στροφών του επιτυγχάνει ο ελκυστήρας με ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα κοντά στην περιοχή της ονομαστικής ταχύτητας περιστροφής 2000-2400 στρ/min. Όταν όμως απαιτείται μικρή ισχύς για τη λειτουργία των παρελκόμενων μηχανημάτων, εμπλέκεται η υψηλότερη βαθμίδα περιστροφής του PTO ή αλλιώς καλούμενη οικονομική και ο ελκυστήρας με ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα μεταξύ 1500-1700 στρ/min επιτυγχάνει περίπου 540 στρ/min του PTO με οικονομία καυσίμου.

Οι άξονες μετάδοσης της κίνησης έχουν τυποποιημένες διαστάσεις και ραβδώσεις ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούν ποικίλα παρελκόμενα μηχανήματα. Για τους άξονες PTO των 540 στρ/min ο αριθμός των ραβδώσεων του πολύσφηνου άξονα είναι 6 ενώ η διάμετρος τους για μεν ελκυστήρες ισχύος μέχρι 65 PS είναι 35 mm για δε ελκυστήρες ισχύος άνω των 65 PS είναι 45 mm. Για τους άξονες των 1000 στρ/min η διάμετρος για ελκυστήρες ισχύος 65-125 PS είναι 35 mm και φέρουν 21 ραβδώσεις για δε ελκυστήρες άνω των 125 PS είναι διαμέτρου 45 mm και φέρουν 21 ραβδώσεις (Τσατσαρέλης, 1997).



Εικόνα 59: Άξονας PTO του T4050



Εικόνα 60: Άξονας καρντάν φρέζας.

Στην **εικόνα 58** μπορούμε να δούμε τον άξονα PTO του γεωργικού ελκυστήρα New Holland T4050 που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις. Συγκεκριμένα μετρήθηκαν τα δύο ρουλεμάν τα οποία διακρίνονται.

Στο κάτω σημείο είναι ο άξονας του PTO με το ρουλεμάν του. Το ρουλεμάν αυτό δέχεται μεγάλες καταπονήσεις λόγω των συχνών μεταβολών των φορτίων τόσο από άποψη κατευθύνσεων όσο και από άποψη τιμών. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται στον άξονα καρντάν που μεταφέρει την κίνηση από τον άξονα PTO στο κάθε παρελκόμενο.

Στο πάνω σημείο μπορούμε να δούμε ένα άλλο ρουλεμάν το οποίο μετρήθηκε. Το ρουλεμάν αυτό χρησιμοποιείται για την στήριξη του άξονα που μεταφέρει την κίνηση από το συμπλέκτη στο άξονα του PTO.

2.2 Ακροφύσια εκτόξευσης πετρελαίου (μπεκ).

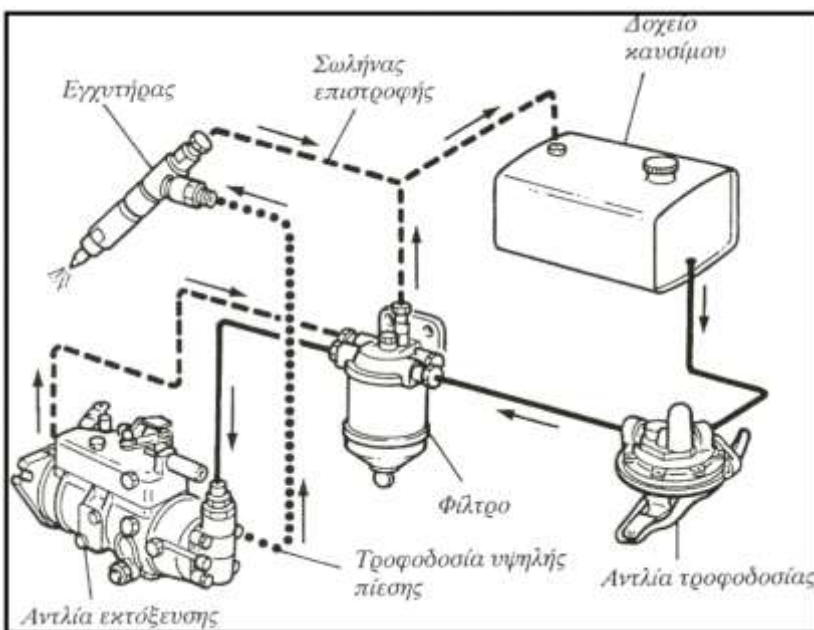
2.2.1. Ο κινητήρας ντίζελ.

Στον κινητήρα ντίζελ σε αντίθεση με τους βενζινοκινητήρες δεν εισάγεται εύφλεκτο μίγμα καυσίμου-αέρα, το οποίο πυροδοτείται, αλλά διαχέεται το καύσιμο με ισχυρό περίσσειμα αέρα, το οποίο συμπυκνώνεται με μια σχέση 25:1 και αυτοαναφλέγεται στη θερμοκρασία των 700-900 °C.

Πιο συγκεκριμένα κατά την εισαγωγή εισέρχεται αέρας στο χώρο της καύσης και λίγο πριν από το άνω νεκρό σημείο εισάγεται το καύσιμο. Για την εισαγωγή αυτή απαιτείται μία αντλία εκτόξευσης, που αποστέλλει το πετρέλαιο με υψηλή πίεση περίπου 170 με 240 bars στα ακροφύσια απ' όπου εκτοξεύεται στο χώρο καύσης. Η εισαγωγή του πετρελαίου διαρκεί περίπου 0,0025 s για κινητήρα με ταχύτητα περιστροφής 2400 rpm. Κατά τη στιγμή της εκτόξευσης η πίεση στο χώρο καύσης είναι αρκετά υψηλή, περίπου 35 bars, ενώ η θερμοκρασία φθάνει περίπου τους 600 °C που είναι και το σημείο ανάφλεξης του πετρελαίου.

Η εισαγωγή του πετρελαίου διαρκεί περίπου 0,0025 s για κινητήρα με ταχύτητα περιστροφής 2400 rpm. Κατά τη στιγμή της εκτόξευσης η πίεση στο χώρο καύσης είναι αρκετά υψηλή, περίπου 35 bars, ενώ η θερμοκρασία φθάνει περίπου τους 600 °C που είναι και το σημείο ανάφλεξης του πετρελαίου.

Τη μεταφορά του πετρελαίου από το ντεπόζιτο στην αντλία εκτόξευσης αναλαμβάνει μία αντλία τροφοδοσίας. Μία ακόμη μικρή χειροκίνητη αντλία για την εξαγωγή του αέρα, που ενδεχομένως εγκλωβίζεται στο σύστημα μεταφοράς του πετρελαίου, συμπληρώνει τον αριθμό των αντλιών που είναι απαραίτητες στο σύστημα μεταφοράς και εκτόξευσης του πετρελαίου.



Στο σύστημα μεταφοράς του πετρελαίου παρεμβάλλεται επίσης μία σειρά φίλτρων για το καθάρισμα του πετρελαίου και την προστασία των εξαρτημάτων της αντλίας και των ακροφύσιων, που είναι κατασκευασμένα με μεγάλη ακρίβεια και μικρές ανοχές. (Τσατσαρέλης, 1997).

Εικόνα 61: Σύστημα μεταφοράς και τροφοδοσίας καυσίμου κινητήρα Diesel με αντλία περιστροφική.

2.2.2 Τύποι κινητήρων ντίζελ.

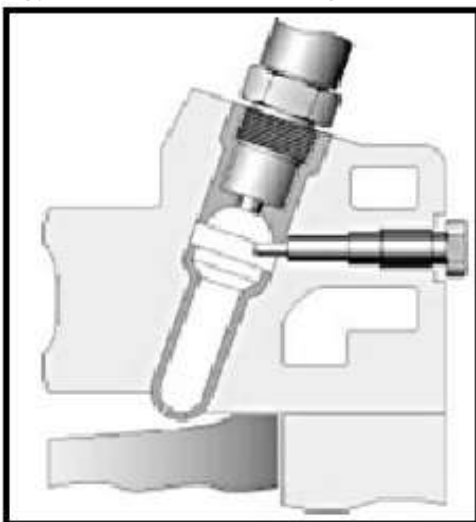
Υπάρχουν δύο τύποι πετρελαιοκινητήρων:

- Με προθάλαμο ή στροβιλοθάλαμο.

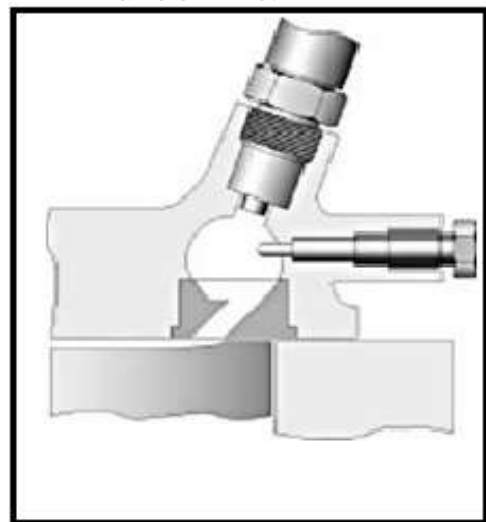
Πρόκειται για παλαιότερης τεχνολογίας κινητήρες diesel, οι οποίοι ήταν εφοδιασμένοι με προθερμαντήρες που άναβαν για να προθερμάνουν τον προθάλαμο καύσης, στον οποίο γινόταν η έγχυση του καυσίμου και η έναρξη της καύσης (η καύση συνεχιζόταν και ολοκληρωνόταν με την έξοδο του μισοκαμμένου μίγματος αέρα - καυσίμου από τον προθάλαμο στον κυρίως θάλαμο καύσης). Και στις δύο τεχνολογίες, η καύση ξεκινάει στον προθάλαμο, που αντιπροσωπεύει το 30 - 60% του συνολικού όγκου του θαλάμου καύσης και δέχεται όλο το εγγεόμενο καύσιμο ενώ ολοκληρώνεται στον κυρίως θάλαμο καύσης όπου διοχετεύονται τα αέρια της καύσης μέσα από μια στενή δίοδο.

Ο ψεκασμός του καυσίμου σ' αυτό τον μικρότερο αρχικό όγκο που κρατιέται σχετικά ζεστός, επιτρέπει την μείωση της καθυστέρησης έναυσης. Όμως εξαιτίας και της μειωμένης ποσότητας αέρα που χωράει ο προθάλαμος, μόνον μία μικρή ποσότητα καυσίμου καίγεται σε μεγάλο βαθμό μέσα σε αυτόν, ανεβάζει την πίεση στον προθάλαμο και έτσι εκτοξεύει το περιεχόμενο στον κυρίως θάλαμο, όπου συνεχίζεται και ολοκληρώνεται σε ένα βαθμό η καύση.

Οι κινητήρες αυτοί ήταν συνήθως εφοδιασμένοι με μηχανικές αντλίες πετρελαίου, ως επί το πλείστον περιστροφικού τύπου για τα επιβατικά αυτοκίνητα, και παλαιότερα αντλίες « εν σειρά» (όπως είχαν και έχουν ακόμη κάποιοι κινητήρες απ' ευθείας έγχυσης, φορτηγών και λεωφορείων). Η περιστροφικού τύπου αντλία πετρελαίου διανέμει το συμπιεσμένο καύσιμο διαδοχικά στους κυλίνδρους και οι εγχυτήρες (μπέκ) ανοίγουν με την πίεση του πετρελαίου. Η αντλία πετρελαίου «εν σειρά» έχει τόσα στοιχεία εμβολοφόρου αντλίας υψηλής πίεσης, όσα και οι κύλινδροι του κινητήρα (Ζώγου και Δημητριάδης, 2008).



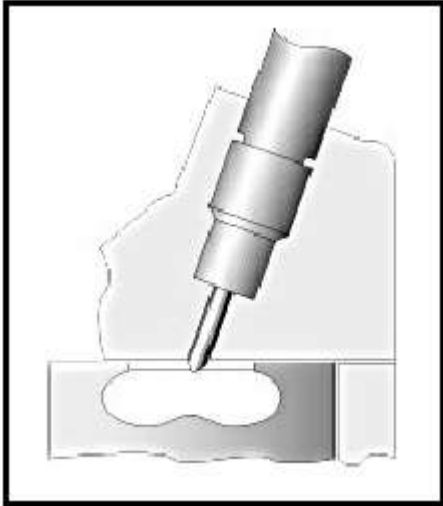
Εικόνα 62α: Προθάλαμος καύσης.



Εικόνα 62β: Θάλαμος στροβιλισμού.

- Κινητήρες απ' ευθείας έγχυσης.

Οι κινητήρες της κατηγορίας αυτής είναι εφοδιασμένοι με μία μηχανική περιστροφική αντλία έγχυσης υψηλής πίεσης, η οποία όμως έχει κάποια ηλεκτρονικά εξαρτήματα και ορισμένες φορές και εγκέφαλο. Η αντλία πετρελαίου διανέμει το καύσιμο διαδοχικά σε κάθε κύλινδρο, ανοίγοντας τα μπέκ με την πίεση του καυσίμου, αλλά βέβαια η έγχυση γίνεται πλέον απ' ευθείας μέσα στον κύλινδρο. Οι κινητήρες αυτοί συνήθως δεν χρειάζονται προθερμαντήρες και αρχικό χρόνο προθέρμανσης.



Εικόνα 63: Θάλαμος καύσης κινητήρα απ' ευθείας έγχυσης

2.2.1. Ο ρόλος των ακροφυσίων εκτόξευσης πετρελαίου (μπεκ).

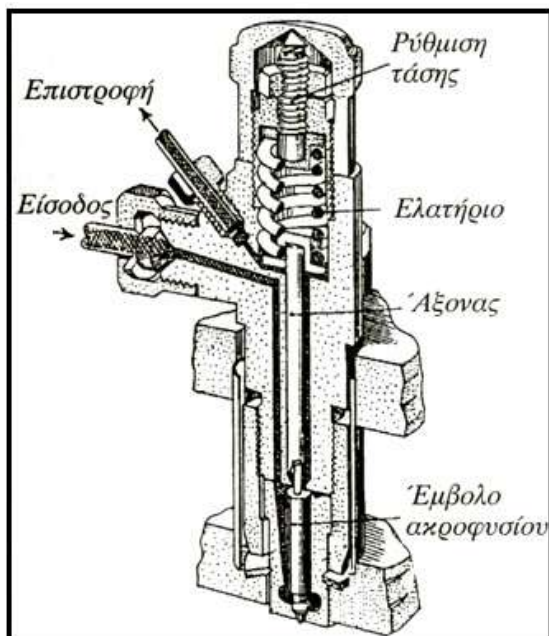
Τα ακροφύσια ή οι εγχυτήρες (μπεκ) στα συστήματα έγχυσης καυσίμου (fuel injection) είναι τα εξαρτήματα μέσω των οποίων το καύσιμο διασκορπίζεται στο θάλαμο καύσης των πετρελαιοκινητήρων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα μπέκ παραλαμβάνουν το καύσιμο με υψηλή πίεση 170-240 bars από την αντλία έγχυσης, προετοιμάζουν το καύσιμο για ψεκασμό με την βοήθεια των κατάλληλα διαμορφωμένων ακροφυσίων και το διασκορπίζουν στους θαλάμους καύσης του κινητήρα.

- Το μπέκ είναι το τελευταίο εξάρτημα του συστήματος τροφοδοσίας του κινητήρα. Ο ψεκασμός του καυσίμου πρέπει να μπορεί να δώσει στον κινητήρα τόσο την ελάχιστη ποσότητα καυσίμου (στο ρελαντί ή στην περίπτωση κίνησης χωρίς φορτίο), όσο και την μεγαλύτερη ποσότητα (στο πλήρες φορτίο). Γι' αυτό, οι διάφορες καταστάσεις λειτουργίας πρέπει να βρίσκονται στην γραμμική χαρακτηριστική ζώνη ψεκασμού του μπέκ. Ο ομοιόμορφος καταμερισμός του μίγματος αέρα-καυσίμου σε όλους τους κυλίνδρους είναι πολύ σημαντικός. Εκτός από τα χαρακτηριστικά της πολλαπλής εισαγωγής, ο καταμερισμός εξαρτάται από την θέση τοποθέτησης και από την ποιότητα διασκορπισμού του μπέκ. Η καλύτερη θέση του μπέκ στο γκρουπ ψεκασμού αποφασίζεται στη

φάση σχεδιασμού του κινητήρα. Το μπέκ στηρίζεται σε ένα υποστήριγμα στο πάνω μέρος του γκρουπ ψεκασμού που έχει κατασκευαστεί ώστε να επιτρέπει την τέλεια προετοιμασία του μίγματος και είναι τοποθετημένο, δια μέσου ενός βραχίονα, σε κεντρική θέση ως προς την ροή του εισερχόμενου αέρα. Αυτός ο τρόπος συναρμολόγησης πάνω από την πεταλούδα γκαζιού, έχει σαν αποτέλεσμα την πλήρη ανάμιξη του καυσίμου με τον εισερχόμενο αέρα. Γι' αυτό τον λόγο, το καύσιμο ψεκάζεται μέσα στη ζώνη της μέγιστης διατάραξης που βρίσκεται μεταξύ της πεταλούδας και του γκρουπ ψεκασμού (<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CF%80%CE%B5%CE%BA>).

2.2.3 Ανάλυση μηχανικών εγχυτήρων

Ανάλογα με τον τύπο του θαλάμου καύσης του κινητήρα, εάν δηλαδή υπάρχει προθάλαμος καύσης, προθάλαμος στροβιλισμού ή απευθείας έγχυσης, επιλέγεται και ο κατάλληλος τύπος εγχυτήρα. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι εγχυτήρων, οι εγχυτήρες με ακροφύσιο στραγγαλισμού βελόνας και οι εγχυτήρες με σπές.



Εικόνα 64: Μηχανικός εγχυτήρας (μπεκ)
(Τσατσαρέλης, 1997).

- Εγχυτήρες με ακροφύσιο στραγγαλισμού βελόνας.

Οι εγχυτήρες αυτοί χρησιμοποιούνται όταν ο κινητήρας έχει ξεχωριστό προθάλαμο καύσης ή θάλαμο στροβιλισμού. Το ακροφύσιο αυτού του τύπου των εγχυτήρων ψεκάζει ομοαξονική δέσμη καυσίμου και κατά το άνοιγμα του η βελόνα του ακροφυσίου μετακινείται προς το εσωτερικό του εγχυτήρα.

Ο εγχυτήρας συνοδεύεται με τον συγκρατητήρα του ο οποίος έχει εσωτερικό σπείρωμα για την συγκράτηση του εγχυτήρα και εξωτερικό σπείρωμα για την συγκράτηση του στη κυλινδροκεφαλή. Χαρακτηριστικό γνώρισμα των

εγχυτήρων τύπου βελόνας είναι ο τρόπος ελέγχου της διατομής παροχής καυσίμου. Η ποσότητα καυσίμου που ψεκάζεται είναι συνάρτηση της ανύψωσης της βελόνας του ακροφυσίου. Εάν είναι μικρή η ανύψωση της βελόνας του ακροφυσίου, τότε αυτή εξακολουθεί να παραμένει εντός της οπής του ακροφυσίου και υπάρχει μόνο μια μικρή δακτυλιοειδής διατομή μεταξύ της βελόνας και των τοιχωμάτων της οπής για τη δίοδο του καυσίμου. Αν η βελόνα ανυψωθεί περισσότερο, η βελόνα εξέρχεται της οπής και η διατομή διόδου του καυσίμου καλύπτει ολόκληρη την οπή. Έτσι η ποσότητα καυσίμου που ψεκάζεται μέσα στο θάλαμο καύσης στη μονάδα του χρόνου είναι απευθείας συνάρτηση της διαδρομής της βελόνας του ακροφυσίου.

Η διάμετρος και οι ανοχές κατεργασίας της οπής του ακροφυσίου πρέπει να εξασφαλίζουν τη σωστή λειτουργία του κινητήρα. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την διάρκεια λειτουργίας δημιουργούνται ανθρακώματα, τα οποία φράζουν μερικά ή ολικά τα ακροφύσια. Ο σχηματισμός αυτών των ανθρακωμάτων γίνεται ανώμαλα και εξαρτάται από την ποιότητα του καυσίμου και τον τρόπο λειτουργίας του κινητήρα. Έτσι μετά από σχετικά μικρό χρονικό διάστημα λειτουργίας, μόνο το 30% της διατομής παραμένει ανοιχτό για την δίοδο του καυσίμου. Για αυτό το λόγο τα μπέκ επιλέχθηκαν στα εξαρτήματα τα οποία ελέγχθηκαν.

Μια ειδική παραλλαγή ακροφυσίου είναι αυτό με την <<επίπεδη>> βελόνα, στο οποίο πρακτικά δεν υπάρχει διάκενο μεταξύ βελόνας και οπής και το οποίο φράζεται λιγότερο από ανθρακώματα κατά την λειτουργία του. Η βελόνα αυτού του τύπου του ακροφυσίου έχει μεγάλη διατομή και όταν ανυψώνεται, ανοίγει ολόκληρη σχεδόν την δίοδο εξόδου του καυσίμου που σχηματίζεται από την οπή του ακροφυσίου. Δημιουργείται τότε μια φλέβα καυσίμου που συμβάλλει στον αυτοκαθαρισμό του ακροφυσίου από τα ανθρακώματα. Επειδή θερμοκρασίες πάνω από 220 °C αρχίζουν να δημιουργούν ανθρακώματα στα ακροφύσια, χρησιμοποιούνται προστατευτικές πλάκες και καλύμματα έναντι της θερμότητας που αναπτύσσεται στον προθάλαμο καύσης, ώστε να απομακρύνουν την θερμότητα και επομένως την αύξηση της θερμοκρασίας από το ακροφύσιο.

- Εγχυτήρες τύπου οπής.

Οι εγχυτήρες τύπου οπής χρησιμοποιούνται σε κινητήρες άμεσης έγχυσης που δεν διαθέτουν προθάλαμο καύσης. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία εγχυτήρων τύπου οπής και των αντίστοιχων συγκρατητήρων τους στην αγορά. Οι οπές ψεκασμού του καυσίμου είναι σε διάφορες γωνίες στο σώμα των ακροφυσίων και για τον λόγο αυτό όταν τοποθετούνται οι εγχυτήρες στον κινητήρα πρέπει οι άξονες των οπών να ευθυγραμμίζονται απολύτως σε σχέση με τον θάλαμο καύσης. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ειδικοί τρόποι στερέωσης των εγχυτήρων στην κυλινδροκεφαλή, με βίδες ασφαλείας καθώς και με χρήση ειδικού εξαρτήματος μανδάλωσης του ακροφυσίου στη σωστή θέση.

Οι εγχυτήρες τύπου οπής έχουν βελόνες διαμέτρου 4 έως 6 mm. Τα ελατήρια των εγχυτήρων είναι υπολογισμένα σε σχέση με την διάμετρο της

βελόνας και των πιέσεων ανοίγματος των ακροφυσίων που είναι μεγαλύτερες από 180 Bar. Η μόνωση του ακροφυσίου από τα θερμά καυσαέρια κατά το πέρας της έγχυσης είναι ένας σοβαρός παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη γιατί η επιστροφή αερίων καύσης εντός του εγχυτήρα προκαλεί υδραυλικές ανωμαλίες κατά την έγχυση ή ακόμα και καταστροφή του ακροφυσίου. (<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CF%80%CE%B5%CE%BA>).

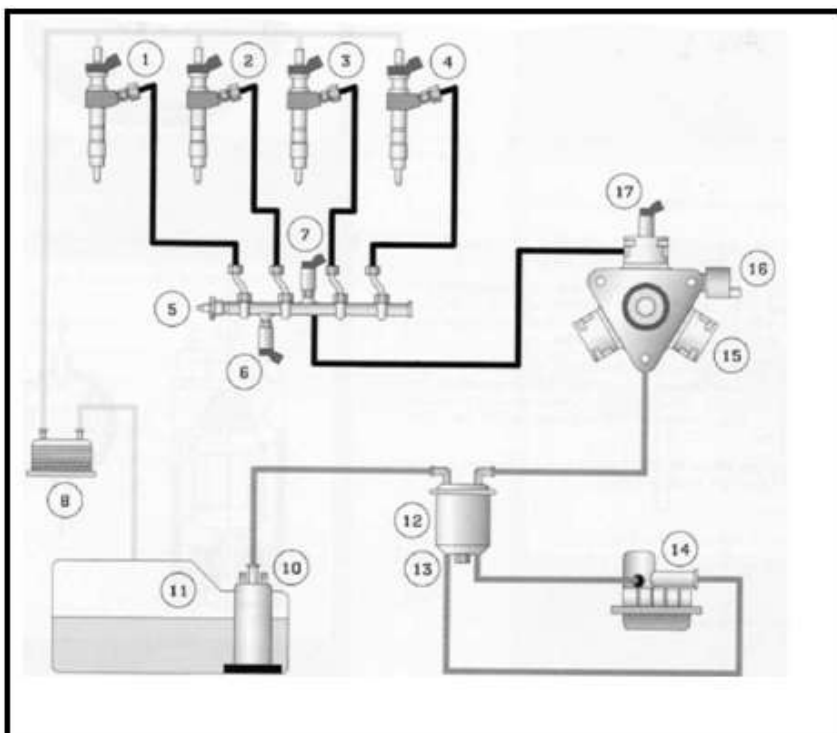
2.2.4 Ανάλυση εγχυτήρων που είναι ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι.

Στους σύγχρονους κινητήρες απευθείας έγχυσης, που χρησιμοποιούνται στους γεωργικούς ελκυστήρες, ο έλεγχος της πίεσης της αντλίας εκτόξευσης αλλά και η λειτουργία των εγχυτήρων ελέγχεται ηλεκτρονικά μέσω ηλεκτρονικού εγκεφάλου όπως για παράδειγμα γίνεται και στο σύστημα **common rail**.

Στα συστήματα common rail η πίεση έγχυσης μπορεί να ρυθμιστεί ανεξάρτητα από τις στροφές του κινητήρα και παραμένει σταθερή στη διάρκεια της έγχυσης. Ο απόλυτος έλεγχος του ανοιγοκλεισίματος του μπεκ από μικροϋπολογιστή αφήνει μεγάλο εύρος δυνατοτήτων για προγραμματισμό της γραμμής έγχυσης και καύσης από τον κατασκευαστή του κινητήρα.

Ο ψηφιακός πλέον έλεγχος όλων των παραμέτρων της έγχυσης με δυνατότητα προγραμματισμού με χάρτες επιτρέπει πλέον τη βελτιστοποίηση όλων των φάσεων της μόνιμης και μεταβατικής λειτουργίας του κινητήρα.

Συγκριτικά με τα κλασικά συστήματα έγχυσης με αντλίες - διανομείς καυσίμου, το σύστημα έγχυσης υψηλής πίεσης **common rail** επιτρέπει, με τη χαρακτηριστική ράμπα συσσώρευσης πίεσης καυσίμου, να διατηρείται σταθερή η εκάστοτε επιθυμητή πίεση έγχυσης ανεξάρτητα από τις στροφές του κινητήρα και την ποσότητα του εγγεόμενου καυσίμου.



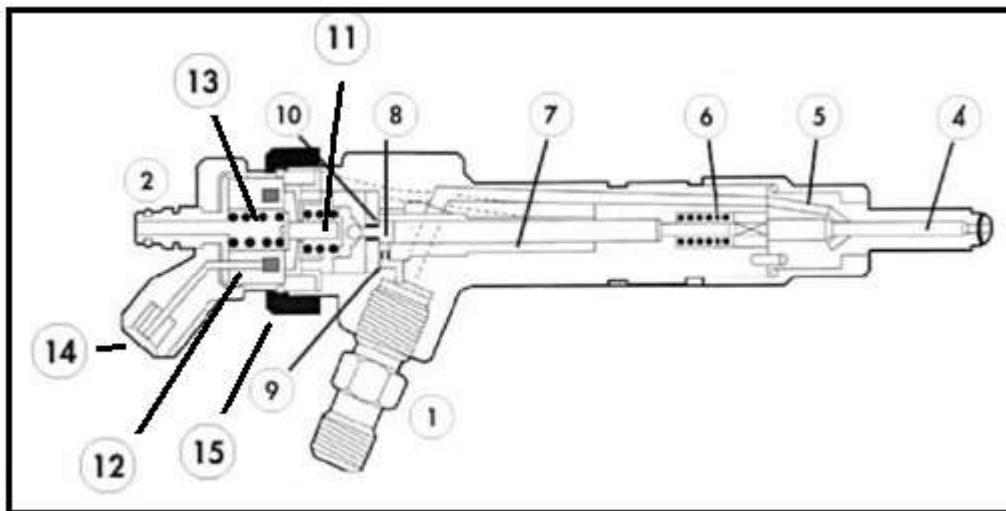
Εικόνα 65: Τροφοδοσία με ηλεκτρική αντλία.

Τα κύρια εξαρτήματα του συνολικού συστήματος είναι τα εξής:

- 1) έως 4) ηλεκτροϋδραυλικοί εγχυτήρες.
- 5) common rail υψηλής πίεσης.
- 6) αισθητήρας θερμοκρασίας καυσίμου.
- 7) αισθητής πίεσης καυσίμου.
- 8) ψύκτης του καυσίμου τοποθετημένος στο κύκλωμα επιστροφών.
- 9) προ-φίλτρο καυσίμου.
- 10) αντλία τροφοδοσίας χαμηλής πίεσης.
- 11) ρεζερβουάρ καυσίμου.
- 12) φίλτρο καυσίμου, υδατοπαγίδα και ρυθμιστής κυκλώματος χαμηλής πίεσης.
- 13) κοχλίας αδειάσματος νερού υδατοπαγίδας.
- 14) προθερμαντήρας καυσίμου.
- 15) αντλία υψηλής πίεσης.
- 16) ρυθμιστής υψηλής πίεσης καυσίμου.
- 17) απενεργοποιητής του τρίτου εμβόλου της αντλίας υψηλής πίεσης.
- 18) ηλεκτροβαλβίδα διακοπής.

Ο ηλεκτρονικά ελεγχόμενος εγχυτήρας αποτελείται από δύο μέρη:

- το κατώτερο τμήμα : πρόκειται για ένα εγχυτήρα με πολλαπλές οπές, παρόμοιο με τους κλασσικούς εγχυτήρες των κινητήρων Diesel απ' ευθείας έγχυσης.
- το ανώτερο τμήμα: πρόκειται για μια ηλεκτρικά οδηγούμενη διάταξη που επιτρέπει τη μετακίνηση της βελόνας του εγχυτήρα.



Εικόνα 66: Ηλεκτρονικά ελεγχόμενος εγχυτήρας

Ο ηλεκτρονικά ελεγχόμενος εγχυτήρας αποτελείται από:

- 1) ρακόρ εισόδου από αντλία.
- 2) ρακόρ επιστροφής προς ρεζερβουάρ.
- 3) φίλτρο τύπου γόπας.

- 4) βελόνα εγχυτήρα.
 - 5) θάλαμος πίεσης.
 - 6) ελατήριο εγχυτήρα.
 - 7) δακτύλιος σύνδεσης.
 - 8) θάλαμος εντολής.
 - 9) οπή διαρροής του κυκλώματος τροφοδοσίας.
 - 10) οπή διαρροής του κυκλώματος επιστροφής.
 - 11) πυρήνας ηλεκτρομαγνήτη εντολής.
 - 12) τύλιγμα πηνίου.
 - 13) ελατήριο επαναφοράς.
 - 14) κοννέκτορας.
 - 15) παξιμάδι.
- (Ζώγου και Δημητριάδης, 2008)

3 Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γεωργικών ελκυστήρων που χρησιμοποιήθηκαν.

Για τις ανάγκες των μετρήσεων της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν και καινούργιοι αλλά και μεταχειρισμένοι γεωργικοί ελκυστήρες. Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών τους.

- New Holland T4050 super steer.

Σε αυτόν τον τύπο ελκυστήρα έγιναν μετρήσεις σε δύο καινούργια μηχανήματα αλλά εφαρμόστηκε και μία σειρά μετρήσεων σε ένα μεταχειρισμένο μηχανήμα στην περιοχή του Μαραθώνα. Οι μετρήσεις αφορούσαν τα ακροφύσια εκτόξευσης πετρελαίου και τα πίσω ρουλεμάν του άξονα μετάδοσης της κίνησης (PTO).

Στο άξονα του PTO ελέγχθησαν και τα δύο ρουλεμάν που φαίνονται στην εικόνα 66β. Τα ρουλεμάν αυτά έχουν και τα δύο κωδικό 6308N.



Εικόνα 67α: Καινούργιο T4050 κατά την ώρα των μετρήσεων.



Εικόνα 67β: Τα δύο ρουλεμάν που ελέγχθησαν.

Το New Holland T4050 σχεδιάστηκε για να καλύψει τις ανάγκες των γεωργών σε τρακτέρ στις ανοιχτές καλλιέργειες. Είναι σχεδιασμένα για διάφορων ειδών καλλιέργειες αλλά και για όλες τις βοηθητικές εργασίες όπως το σκάλισμα, οι ψεκασμοί κλπ.

Ο κινητήρας του T4050 είναι χωρητικότητας 4500 κυβικών εκατοστών ενώ φέρει τέσσερις κυλίνδρους με δύο βαλβίδες σε κάθε κύλινδρο και σύστημα turbo. Η απόδοση του είναι 97 ίπποι με 398 Nm ροπής και μετάδοση της κίνησης και στους τέσσερις τροχούς.

Σε κάθε κύλινδρο του κινητήρα υπάρχει από ένα μπεκ. Ο έλεγχος του ανοιγοκλεισίματος του μπεκ καθώς και η ρύθμιση της πίεσης από την αντλία ελέγχεται ηλεκτρονικά μέσω ηλεκτρονικού εγκεφάλου.

Το T4050 είναι ένας ελκυστήρας με τελείως ανεξάρτητο άξονα PTO. Δηλαδή υπάρχει πολύδισκος συμπλέκτης ενεργοποιούμενος με υδραυλικό σύστημα ώστε η μετάδοση της κίνησης στο κιβώτιο ταχυτήτων να είναι παντελώς ανεξάρτητη της μετάδοσης της κίνησης στο PTO. Ο άξονας PTO μπορεί να δώσει ταχύτητες 540 και 1000 στροφών.

- McCormick GM50.

Στο GM50 της εταιρίας McCormick έγιναν μετρήσεις στον άξονα του PTO και στα μπεκ σε έναν μόνο καινούργιο ελκυστήρα. Στο GM50 στον άξονα του PTO μετρήθηκε του ρουλεμάν μόνο του άξονα του PTO το οποίο το έχει κωδικό 6207N



Εικόνα 68α: McCormick GM50.



Εικόνα 68α: Το ρουλεμάν του PTO του McCormick GM50.

Το GM50 είναι ένας ελκυστήρας μικρών διαστάσεων που διευκολύνει στην εκτέλεση των γεωργικών εφαρμογών.

Ο κινητήρας του GM50 είναι χωρητικότητας 2189 κυβικών εκατοστών ενώ φέρει τέσσερις κυλίνδρους. Η απόδοση του είναι 47 ίπποι με 150 Nm ροπής και έχει μετάδοση της κίνησης και στους τέσσερις τροχούς.

Όπως και στο T4050, κάθε κύλινδρος έχει και ένα μπεκ ενώ ο έλεγχος του ανοιγοκλεισίματος των μπεκ καθώς και η ρύθμιση της πίεσης και πάλι γίνεται ηλεκτρονικά μέσω ηλεκτρονικού εγκεφάλου όπως σε κάθε σύγχρονο γεωργικό ελκυστήρα.

Επίσης και στον άξονα του PTO υπάρχουν ομοιότητες στους δύο ελκυστήρες αφού και στο GM50 όπως και στο T4050 υπάρχει διπλός συμπλέκτης για ανεξάρτητη λειτουργία του PTO. Η μόνη διαφορά είναι ότι ο GM50 δίνει 540 και 750 στροφές το λεπτό στο PTO.

- New Holland TN65N

Σε αυτόν τον τύπο ελκυστήρα έγιναν μετρήσεις σε ένα μεταχειρισμένο μηχάνημα στην περιοχή του Μαραθώνα. Οι μετρήσεις που έγιναν αφορούσαν τα πίσω ρουλεμάν του άξονα του PTO και τα μπέκ του συστήματος τροφοδοσίας.

Στο άξονα του PTO ελέγχθησαν και τα δύο ρουλεμάν που εξετάστηκαν και στο New Holland T4050 τα οποία έχουν και αυτά κωδικό 6308N.



Εικόνα 69: New Holland TN65N

Το TN65N διαθέτει κινητήρα 2900 κυβικών εκατοστών και αποδίδει 65 ίππους. Σε αντίθεση με το κινητήρα του New Holland T4050 που έχει τέσσερις κυλίνδρους, ο κινητήρας του TN65N έχει τρεις κυλίνδρους με ένα μπέκ ο κάθε κύλινδρος, δηλαδή έχουμε τρία μπέκ.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του TN65N όσο αφορά τον άξονα του PTO και το σύστημα ελέγχου της πίεσης και του ανοιγοκλεισίματος των μπέκ είναι σε γενικές γραμμές ίδια με αυτά του T4050.

- Massey Ferguson 178.

Το Massey Ferguson 178 είναι ένας αμπελουργικός ελκυστήρας κατασκευής του 1968. Διαθέτει κινητήρα 4062 κυβικών εκατοστών, τεσσάρων κυλίνδρων που αποδίδει 75 ίππους.

Σε αυτόν τον τύπο ελκυστήρα έγιναν μετρήσεις στα ρουλεμάν του PTO αλλά και στα μπέκ του συστήματος τροφοδοσίας. Οι μετρήσεις έγιναν στην περιοχή των Σπάτων, Αττικής.

Στο Ferguson 178 ο άξονας του PTO είναι ανεξάρτητος, δηλαδή ο άξονας παίρνει κίνηση από ανεξάρτητο συμπλέκτη. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω υπάρχει ένας ποδομοχλός που ενεργοποιεί τη μετάδοση στο κιβώτιο ταχυτήτων ενώ ένας χειρομοχλός ενεργοποιεί το PTO. Επίσης, δεν υπάρχουν προκαθορισμένες

ταχύτητες περιστροφής του άξονα του PTO, για παράδειγμα 540 ή 1000 στροφές. Αντίθετα, η ταχύτητα περιστροφής του άξονα PTO είναι ίδια με τον αριθμό στροφών του κινητήρα.

Όσο αφορά τα μπέκ, ο έλεγχος της πίεσης από την αντλία υψηλής πίεσης αλλά και ο ρυθμός ανοιγοκλεισίματος τους ελέγχεται μηχανικά.



Εικόνα 70: Massey Ferguson 178

- Zetor 7711.



Εικόνα 71: Zetor 7711

Το Zetor 7711 είναι ένας άλλος ελκυστήρας για αμπελουργική χρήση. Η κατασκευή του έγινε το 1986. Διαθέτει κινητήρα 3900 κυβικών εκατοστών με τέσσερις κυλίνδρους και αποδίδει 58 ίππους.

Αυτός ο ελκυστήρας βρίσκεται στην περιοχή των Σπάτων, Αττικής. Οι μετρήσεις που έγιναν αφορούσαν τα ρουλεμάν του άξονα του PTO αλλά και τα μπέκ.

Στο Zetor 7711 μετρήθηκε το ρουλεμάν μόνο του άξονα του PTO το οποίο το έχει κωδικό 6208A

Το Zetor 7711 διαθέτει και αυτό ανεξάρτητο άξονα PTO χωρίς όμως τι προκαθορισμένες ταχύτητες των 540 και

1000 στρόφων. Η πίεση της αντλίας των μπέκ και το ανοιγοκλείσιμο τους ελέγχεται και σε αυτόν τον ελκυστήρα μηχανικά.

- Zetor 6911.

Το Zetor 6911 είναι και αυτός ένας ελκυστήρας που ο ιδιόκτητης τον χρησιμοποιεί για αμπελουργικές εργασίες. Είναι κατασκευής του 1977. Ο κινητήρας του αποδίδει 65 ίππους και έχει τέσσερις κυλίνδρους.

Σε αυτόν τον ελκυστήρα που βρίσκετε στην περιοχή των Σπάτων, Αττικής έγιναν μετρήσεις στον άξονα PTO αλλά και στα μπέκ.

Στο Zetor 6911 στον άξονα του PTO μετρήθηκε του ρουλεμάν μόνο του άξονα του PTO το οποίο το έχει κωδικό 6208A

Όπως οι περισσότεροι ελκυστήρες εκείνης της εποχής, έτσι και το Zetor 6911 διαθέτει ανεξάρτητο άξονα PTO χωρίς τις προκαθορισμένες ταχύτητες των 540 και 1000 στρόφων που διαθέτουν οι σύγχρονοι ελκυστήρες.

Επίσης η ρύθμιση της αντλίας των μπέκ και το ανοιγοκλείσιμο τους ελέγχεται μηχανικά.



Εικόνα 72α: Zetor 6911.



Εικόνα 72β: Zetor 6911.

4. Τρόπος διεξαγωγής των μετρήσεων.

4.1 Μετρήσεις στα ρουλεμάν του άξονα μετάδοσης της κίνησης (PTO).

Για τον καθορισμό της κατάστασης των ρουλεμάν στον άξονα μετάδοσης της κίνησης αρχικά θα πρέπει να καθοριστεί το σωστό σημείο μέτρησης και να γίνει σωστά η έδραση του επιταχυνσιόμετρου.

Στις μετρήσεις που έγιναν σε αυτή την εργασία η έδραση του επιταχυνσιόμετρου στο σημείο της μέτρησης γινόταν με μαγνήτη εκτός από ορισμένα δυσπρόσιτα σημεία που η έδραση γινόταν με probe.

Για την εύρεση του σωστού σημείου ώστε να πάρουμε τα καλύτερα αποτελέσματα έγιναν μετρήσεις τόσο ακτινικά όσο και αξονικά.



Εικόνα 73α: Έδραση με probe και μέτρηση ακτινικά.



Εικόνα 73β: Έδραση με μαγνήτη και μέτρηση αξονικά.

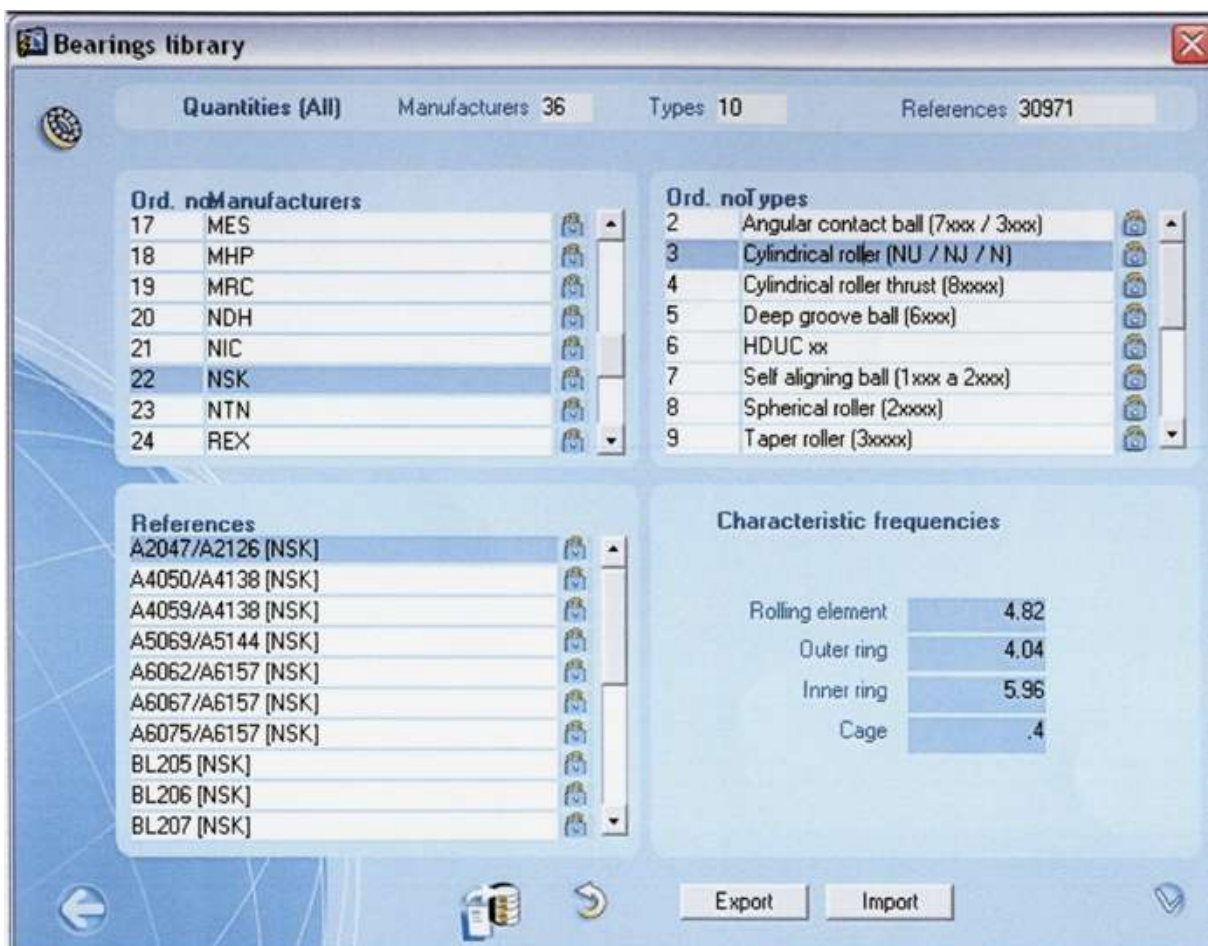
Μετά το προσδιορισμό του σημείου μέτρησης και τον τρόπο έδρασης του επιταχυνσιόμετρου προχωράμε στην εισαγωγή κάποιων απαραίτητων στοιχείων στα όργανα μέτρησης.

Στο **bearing checker** πρέπει για τον υπολογισμό του dB_i να εισάγουμε την εσωτερική διάμετρο του ρουλεμάν και τον ρυθμό περιστροφής του άξονα.

Στο **Vibrotest 60** επειδή πήραμε μόνο overall τιμές και τιμές BCU δεν ήταν απαραίτητη η εισαγωγή κάποιων στοιχείων στο όργανο.

Το **OneproD MV2** πριν την μέτρηση συνδέεται με φορητό υπολογιστή ο οποίος έχει φορτωμένο το πρόγραμμα **OneproD XPR**. Στο πρόγραμμα OneproD XPR φορτώνονται στοιχεία όπως το όνομα του γεωργικού μηχανήματος, το σημείο της μέτρησης άλλα και το κυριότερο που είναι ο κωδικός του ρουλεμάν. Ο κωδικός του ρουλεμάν εισάγετε για τον προσδιορισμό των τυπικών συχνοτήτων του κλωβού, του εξωτερικού δακτυλίου, των σφαιρών και του εσωτερικού δακτυλίου. Μετά, τα στοιχεία αυτά από το πρόγραμμα μεταφέρονται ξανά στο όργανο μέτρησης. Αφού ρυθμιστούν όλα αυτά, προχωράμε στις μετρήσεις.

Με το **bearing checker** και το **Vibrotest 60** οι μετρήσεις λαμβάνονται αμέσως. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται με το **OneproD MV-2C** μετά μεταφέρονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για να επεξεργαστούν πάλι στο πρόγραμμα OneproD XPR. Με αυτή την επεξεργασία μπορούμε να πάρουμε τα διαγράμματα FFT ώστε να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα όπως κακή ευθυγράμμιση ή ζυγοστάθμιση αλλά και σε ποια κατάσταση βρίσκονται τα ρουλεμάν.

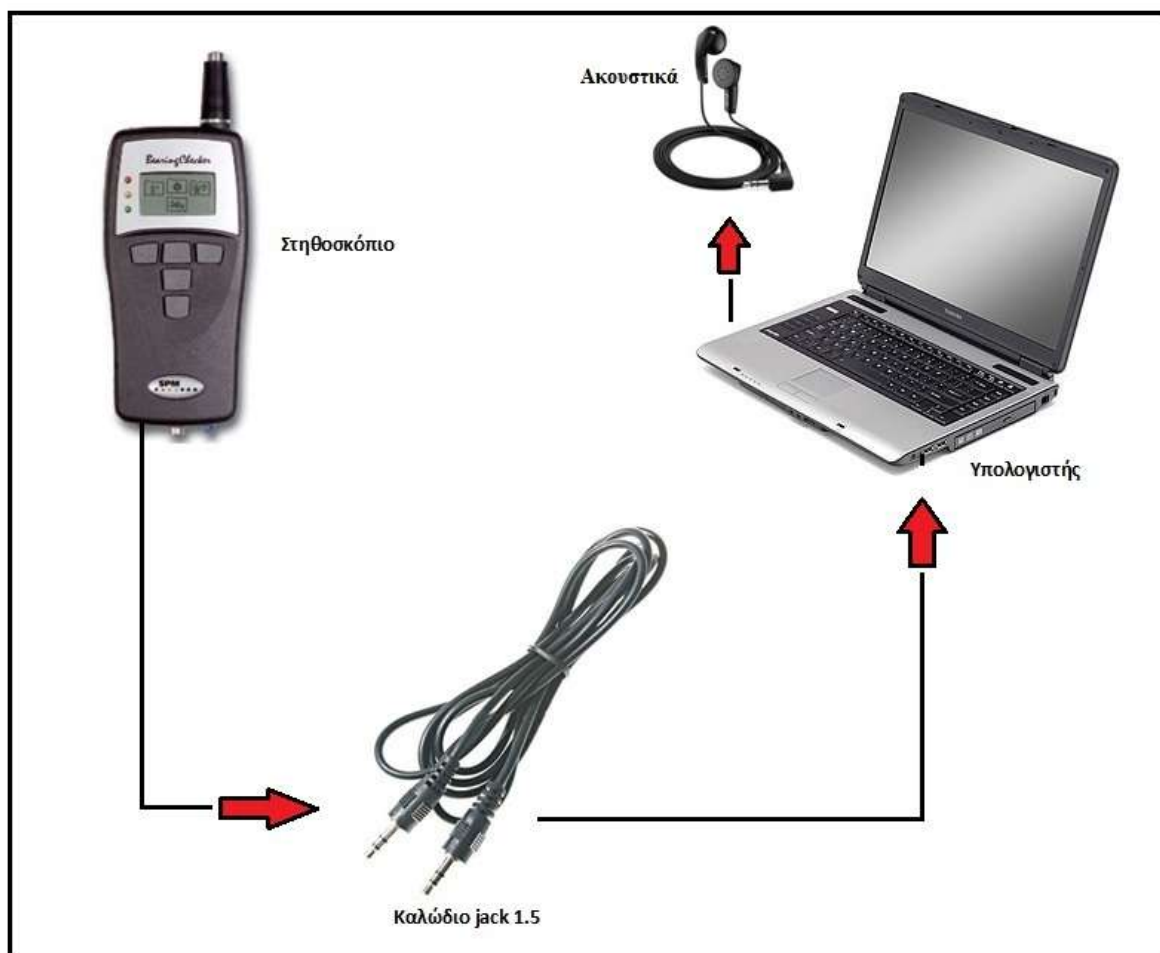


Εικόνα 74:Εισαγωγή του κωδικού του ρουλεμάν στο πρόγραμμα OneproD XPR και οι χαρακτηριστικές συχνότητες

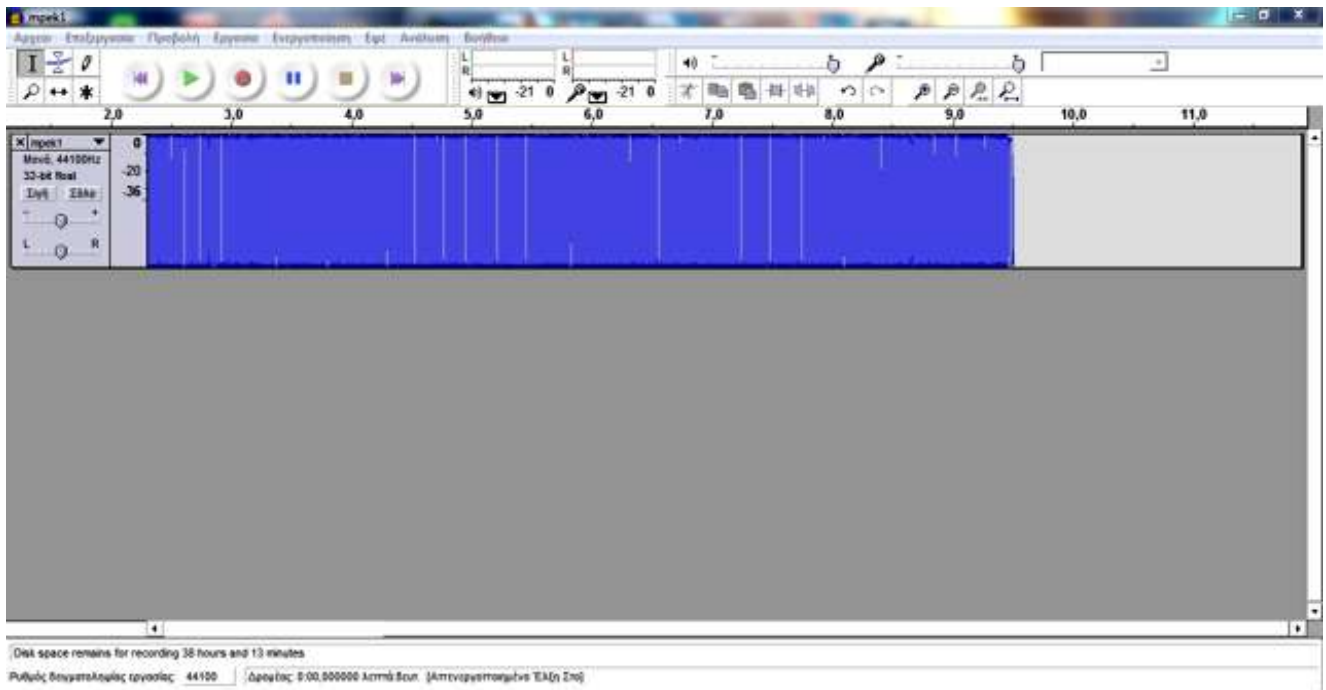
4.2 Καταγραφή του ήχου των ακροφύσιων εκτόξευσης πετρελαίου (μπέκ).

Για τον έλεγχο των μπέκ ακολουθήσαμε μια διαδικασία που δεν εφαρμόζετε πουθενά και ήταν δικής επινοήσεως. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό στηθοσκόπιο το οποίο συνδέθηκε σε φορητό υπολογιστή για την εγγραφή του ήχου και για την περαιτέρω ανάλυση του. Παρακάτω περιγράφεται όλη η διαδικασία σύνδεσης του στηθοσκοπίου με τον υπολογιστή, της εγγραφής και της ανάλυσης του ήχου.

Σαν ηλεκτρονικό στηθοσκόπιο χρησιμοποιήθηκε το Bearing Checker. Το Bearing Checker διαθέτει έξοδο ακουστικών jack 1.5 mm. Η κάρτα ήχου του υπολογιστή διαθέτει αντίστοιχη είσοδο ήχου. Έτσι με την χρήση καλωδίου με καρφί jack 1.5 mm έγινε σύνδεση της εξόδου του στηθοσκοπίου με την είσοδο της κάρτας ήχου του υπολογιστή. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνουμε την μεταφορά ήχου από το στηθοσκόπιο στον υπολογιστή. Η εγγραφή και αποθήκευση του ήχου έγινε με το πρόγραμμα Audacity. Ο ήχος αποθηκεύθηκε σε μορφή mp3 με Bit rate 128kbps. Για τον έλεγχο της εγγραφής χρησιμοποιήθηκαν ακουστικά τα οποία συνδέθηκαν στον υπολογιστή. Με το ίδιο πρόγραμμα έγινε και η επεξεργασία του ήχου.



Εικόνα 75: Συνδεσμολογία για τον έλεγχο των ακροφύσιων εκτόξευσης πετρελαίου (μπέκ).



Εικόνα 76: Πρόγραμμα Audacity

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

1.1 Μετρήσεις στα ρουλεμάν του άξονα μετάδοσης της κίνησης (PTO).

1.1.1 Μετρήσεις εξοικείωσης με τα όργανα μετρήσεων.

Τον Δεκέμβριο του 2009 έγιναν κάποιες μετρήσεις για εξοικείωση με το όργανο Vibrotest 60. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν σε ειδική συσκευή της εταιρίας. Η συσκευή αυτή αποτελείται από έναν ηλεκτροκινητήρα με έναν άξονα που περιστρέφεται σε δύο ρουλεμάν. Τα ρουλεμάν αυτά μπορούσαν να αλλάζονται με φθαρμένα ώστε να μπορούμε να δούμε την μεταβολή των μετρήσεων ανάμεσα στα

καινούργια και στα φθαρμένα ρουλεμάν. Επίσης υπήρχε δυνατότητα εκπαίδευσης για ευθυγράμμιση και για ζυγοστάθμιση του άξονα.



Εικόνα 77: Συσκευή εξοικείωσης Vibrotest 60.

1.1.2 Μετρήσεις σε καινούργιους γεωργικούς ελκυστήρες.

Μετά από την εξοικείωση με τα όργανα μετρήσεων έγιναν κάποιες μετρήσεις σε καινούργιους ελκυστήρες χωρίς φορτίο στον άξονα του PTO. Όπως ήταν φυσικό, τα ρουλεμάν των καινούργιων ελκυστήρων είχαν μηδενική φθορά. Οι μετρήσεις αυτές όμως δεν είχαν ως σκοπό να μας δείξουν το βαθμό της φθοράς των ρουλεμάν, αλλά για να καθοριστεί η ταχύτητα δόνηση των καινούργιων ρουλεμάν.

Συνολικά έγιναν μετρήσεις σε δύο New Holland T4050 και σε ένα McCormick GM50.

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων καθώς και τα συμπεράσματα που βγήκαν.

1.1.2.α New Holland T4050.

Στο New Holland T4050 έγιναν μετρήσεις και με τα τρία όργανα που είχαμε στην διάθεση μας στις 15 Ιανουαρίου 2010 και στις 15 Μαρτίου 2010.

Στις 15 Ιανουαρίου έγιναν μετρήσεις όταν ο κινητήρας του ελκυστήρα βρισκόταν:

α) στο ρελαντί.

β) στις 2000 στροφές και χωρίς εμπλοκή του PTO.

γ) στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.

Οι μετρήσεις σε αυτές τις τρεις καταστάσεις έγιναν ώστε να προσδιοριστεί η τιμή των δονήσεων που παράγονται από τον ίδιο τον γεωργικό ελκυστήρα και όχι από τα ρουλεμάν.

Στις μετρήσεις που έγιναν στις 15 Μαρτίου ο κινητήρας βρισκόταν στις 2000 στροφές και είχαμε εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές. Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το Bearing Checker και το Vibrotest 60.

Όπως αναφέρθηκε στους ελκυστήρες New Holland εκτός από το ρουλεμάν του PTO έγιναν μετρήσεις και στο ρουλεμάν που βρίσκεται πάνω από το PTO και χρησιμεύει για την στήριξη του άξονα που μεταφέρει την κίνηση από το συμπλέκτη στο άξονα του PTO.



Εικόνα 78α: Ρουλεμάν 1.



Εικόνα 78β: Ρουλεμάν 2

Για να πάρουμε όμως περισσότερα στοιχεία από τις μετρήσεις πρέπει θα πρέπει να γνωρίζουμε την ταχύτητα του καθενός από τα ρουλεμάν για κάθε μία από αυτές τις καταστάσεις. Οι ταχύτητες αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα περιστροφής του ρουλεμάν 1(Στροφές/ λεπτό)	Ταχύτητα περιστροφής του ρουλεμάν 2(Στροφές/ λεπτό)
Στο ρελαντί	0	0
Στις 2000 στροφές και χωρίς εμπλοκή του ΡΤΟ	1970	0
Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	1970	540

Πίνακας 16: Ταχύτητα περιστροφής του ρουλεμάν.

• **Bearing Checker.**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dBi	dBc	dBm	Κωδικός αξιολόγησης
15/01/2010	1	Στο ρελαντί	0	12	22	4/5
		Στις 2000 στροφές και χωρίς εμπλοκή του ΡΤΟ	18	4	22	4/5
		Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	18	17	37	2
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dBi	dBc	dBm	Κωδικός αξιολόγησης
15/01/2010	2	Στο ρελαντί	0	13	20	1
		Στις 2000 στροφές και χωρίς εμπλοκή του ΡΤΟ	0	5	23	4/5
		Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	7	8	31	4/5

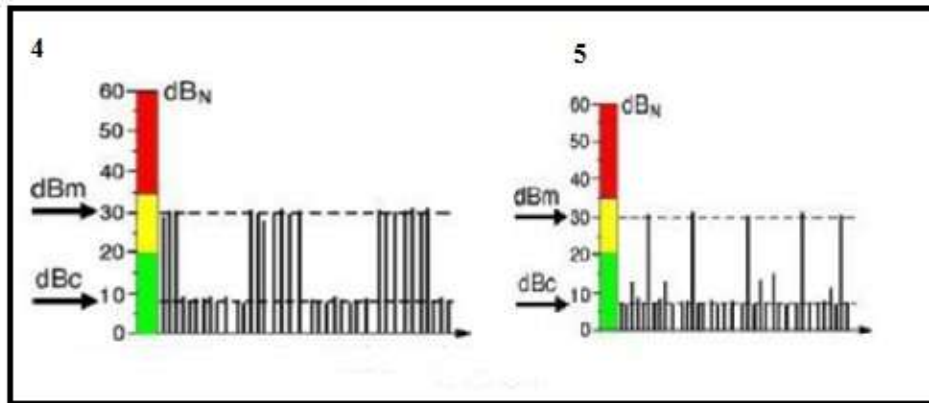
Πίνακας 17: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Bearing Checker.

Από τα αποτελέσματα μπορούμε να δούμε ότι σχεδόν σε όλες τις καταστάσεις έχουμε **κωδικό αξιολόγησης 4/5**. Βλέποντας το εγχειρίδιο του οργάνου προσπαθούμε να βρούμε τα πιθανά αιτία τα οποία είναι:

- Κρούσεις φορτίου ή πίεσης στη λειτουργία της μηχανής, οι οποίες προκαλούν μηχανικές κρούσεις στο ρουλεμάν.

- Ζημιά ρουλεμάν.
- Ο άξονας τρίβεται στη φωλιά ή το τέλος του άξονα τρίβεται στο καπάκι του ρουλεμάν
- Ζημιά οδοντώσεως.
- Άλλη μηχανική τριβή.
- Φορτίο ή πίεση από εξοπλισμό τοποθετημένο στο πλαίσιο του μηχανήματος.
- Άλλα μηχανικά ή κρουστικά φορτία από την λειτουργία του μηχανήματος.

Παρατηρώντας όλα τα πιθανά αίτια και δεδομένου ότι τα ρουλεμάν είναι καινούργια συμπεραίνουμε ότι υπάρχει πρόβλημα κρουστικών φορτιών που παράγονται από τον ίδιο τον γεωργικό ελκυστήρα. Αυτά τα κρουστικά φορτία δεν μπορούσαν να απομονωθούν από το όργανο με αποτέλεσμα να δημιουργούν πρόβλημα στις μετρήσεις. Ο **κωδικός αξιολόγησης 2** οφείλεται σε υψηλές τιμές δονήσεων. Αντίθετα, ο **κωδικός αξιολόγησης 1** οφείλεται στις χαμηλότερες τιμές δονήσεων διότι εκείνη την ώρα ο κινητήρας λειτουργούσε στο ρελαντί.



Εικόνα 79: Πιθανές γραφικές παραστάσεις

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dBi	dBc	dBm	Κωδικός αξιολόγησης
15/03/2010	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.	18	6	31	4/5
15/03/2010	2	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.	7	7	38	2

Πίνακας 18: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Bearing Checker

Από τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι πάλι υπήρχαν προβλήματα δονήσεων τα οποία επηρέαζαν τις μετρήσεις.

• **Vibrotest 60 (Τιμές Overall).**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
15/01/2010	1	Στο ρελαντί	0,967	0.062
		Στις 2000 στροφές και χωρίς εμπλοκή του PTO	3.691	0.141
		Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.	3.171	0.163
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
15/01/2010	2	Στο ρελαντί	0.971	0.062
		Στις 2000 στροφές και χωρίς εμπλοκή του PTO	3.699	0.072
		Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.	3.351	0.156

Πίνακας 19: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Vibrotest 60.

Από τις μελέτη των μετρήσεων μπορούν να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά, παρατηρούμε ότι όσο πιο χαμηλές είναι οι στροφές του κινητήρα τόσο παράγονται όλο και χαμηλότερες τιμές δονήσεων. Δηλαδή, όταν ο κινητήρας βρίσκεται στο ρελαντί, δηλαδή στις 850 με 900 στροφές ανά λεπτό, έχουμε ταχύτητα δόνησης 0.970 mm/s περίπου. Αντίθετα, η ταχύτητα δόνησης αυξάνεται στα 3.691 mm/s περίπου όταν ο κινητήρας λειτουργεί στις 2000 στροφές ανά λεπτό. Ενώ παρατηρείται μία μικρή πτώση της ταχύτητας της δόνησης όταν γίνεται και εμπλοκή του PTO.

Όσο αφορά στις τιμές του BCU, παρατηρούμε ότι στις περιπτώσεις που το ρουλεμάν δεν περιστρέφεται έχει πολύ χαμηλές τιμές, περίπου 0.065, ενώ όταν αρχίσει η περιστροφή των ρουλεμάν τότε το BCU παίρνει τις φυσιολογικές τιμές που δίνει η εταιρία του οργάνου μέτρησης για καινούργια ρουλεμάν. Δηλαδή για τα περιστρεφόμενα ρουλεμάν πήραμε BCU ίσο με 0.153 (οι τιμές που μπορεί να πάρει το BCU ανάλογα με την φθορά φαίνονται στην εικόνα 51, σελίδα 92)

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
15/03/2010	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	4.404	0.282
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα		
15/03/2010	2	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	4.823	0.289

Πίνακας 20: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Vibrotest 60.

Από την ανάλυση των παραπάνω μετρήσεων παρατηρούμε μία μικρή αύξηση της ταχύτητας δόνησης η οποία μπορεί να προέρχεται από πολλούς παράγοντες όπως μία μικρή μεταβολή στις στροφές του κινητήρα ή μία μικρή μεταβολή στην θέση τοποθέτησης του αισθητήρα. Επίσης βλέπουμε μία αύξηση της τιμής του BCU χωρίς όμως αυτό να σημαίνει την ύπαρξη κάποιου προβλήματος αφού η τιμή του εξακολουθεί να είναι χαμηλή όπως σε κάθε καινούργιο ρουλεμάν.

- **OneproD MV2 (Τιμές Overall).**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης m/s^2	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
15/01/2010	1	Στο ρελαντί	0.103	1.11	2.98
		Στις 2000 στροφές και χωρίς εμπλοκή του ΡΤΟ	0.213	3.25	2.39
		Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	0.361	3.83	3.73

Πίνακας 21: Αποτελέσματα μετρήσεων για το OneproD MV-2C.

Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης m/s ²	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
15/01/2010	1	Στο ρελαντί	0.091	0.377	3.27
		Στις 2000 στροφές και χωρίς εμπλοκή του ΡΤΟ	0.188	0.640	2.91
		Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	0.434	0.983	3.40
Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση m/s ²	Ταχύτητα mm/s	Defect factor
15/01/2010	2	Στο ρελαντί	0.100	1.04	2.94
		Στις 2000 στροφές και χωρίς εμπλοκή του ΡΤΟ	0.266	3.41	2.39
		Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	0.747	3.87	3.44

Πίνακας 22: Αποτελέσματα μετρήσεων για το OneproD MV-2C.

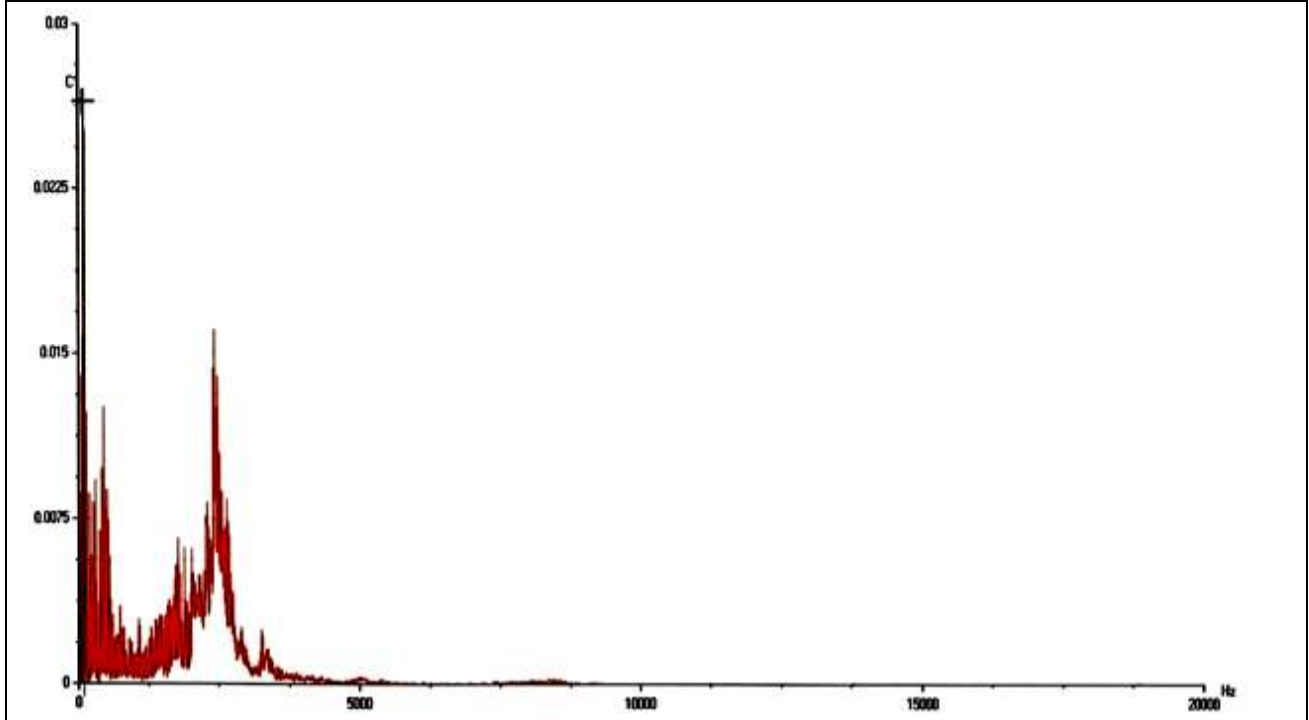
Από τις μετρήσεις αρχικά μπορούμε να δούμε τις χαμηλές ταχύτητες δονήσεων. Επίσης, όπως και στις μετρήσεις με το Vibrotest 60, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνονται οι στροφές του κινητήρα τόσο αυξάνεται η ταχύτητα δόνησης.

Ένα άλλο ενδιαφέρον στοιχείο που παρατηρούμε είναι η διαφορά στις τιμές των ταχυτήτων των δονήσεων όταν η μέτρηση γίνεται ακτινικά ή αξονικά. Αυτό οφείλεται στις διαφορετικές πορείες που ακολουθούν οι δονήσεις για την μετάδοσή τους.

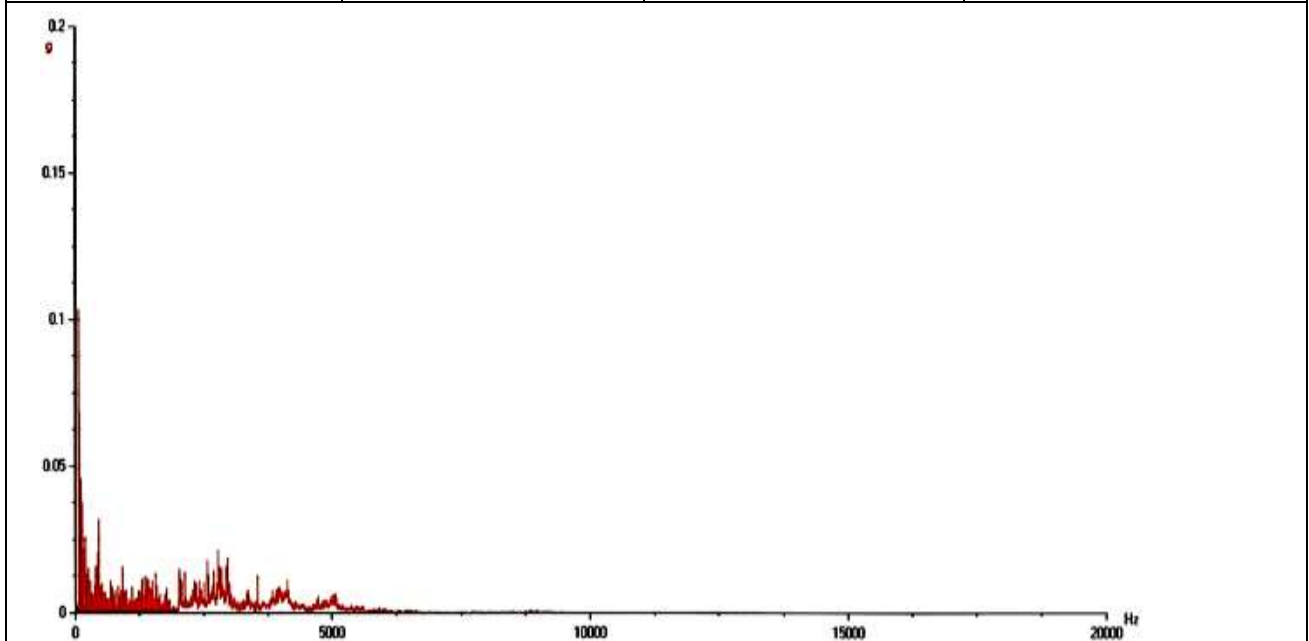
Επίσης, το Defect factor το οποίο είναι ένας μυστικός αλγόριθμος που δεν δημοσιεύει η εταιρία που κατασκευάζει το OneproD MV-2C έχει και αυτό τιμές εντός των φυσιολογικών ορίων που επιδεικνύει η εταιρία.

- **OneproD MV2 (Ανάλυση FFT).**

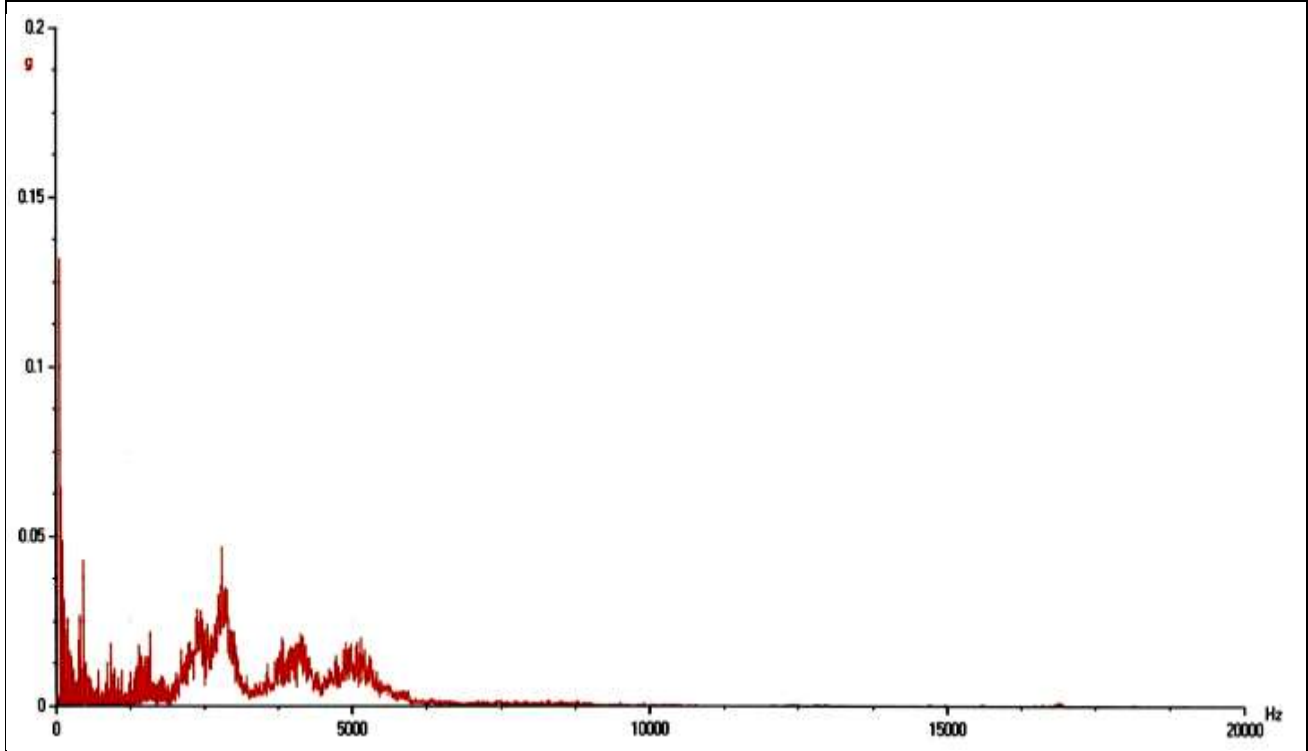
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
15/01/2010	1	Ακτινικά	Στο ρελαντί



Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
15/01/2010	1	Ακτινικά	Στις 2000 στροφές και χωρίς εμπλοκή του ΡΤΟ



Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
15/01/2010	1	Ακτινικά	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.



Πίνακας 23: Ανάλυση FFT με το OperproD XPR το ρουλεμάν 1.

Με την ανάλυση του FFT μπορούμε να δούμε πάλι την αύξηση των δονήσεων με την αύξηση των στροφών καθώς επίσης και την αύξηση της συχνότητας των δονήσεων.

Το διάγραμμα FFT όμως μπορεί να μας δώσει πολύ χρήσιμες πληροφορίες για την κατάσταση των μηχανικών τμημάτων που μετράμε.

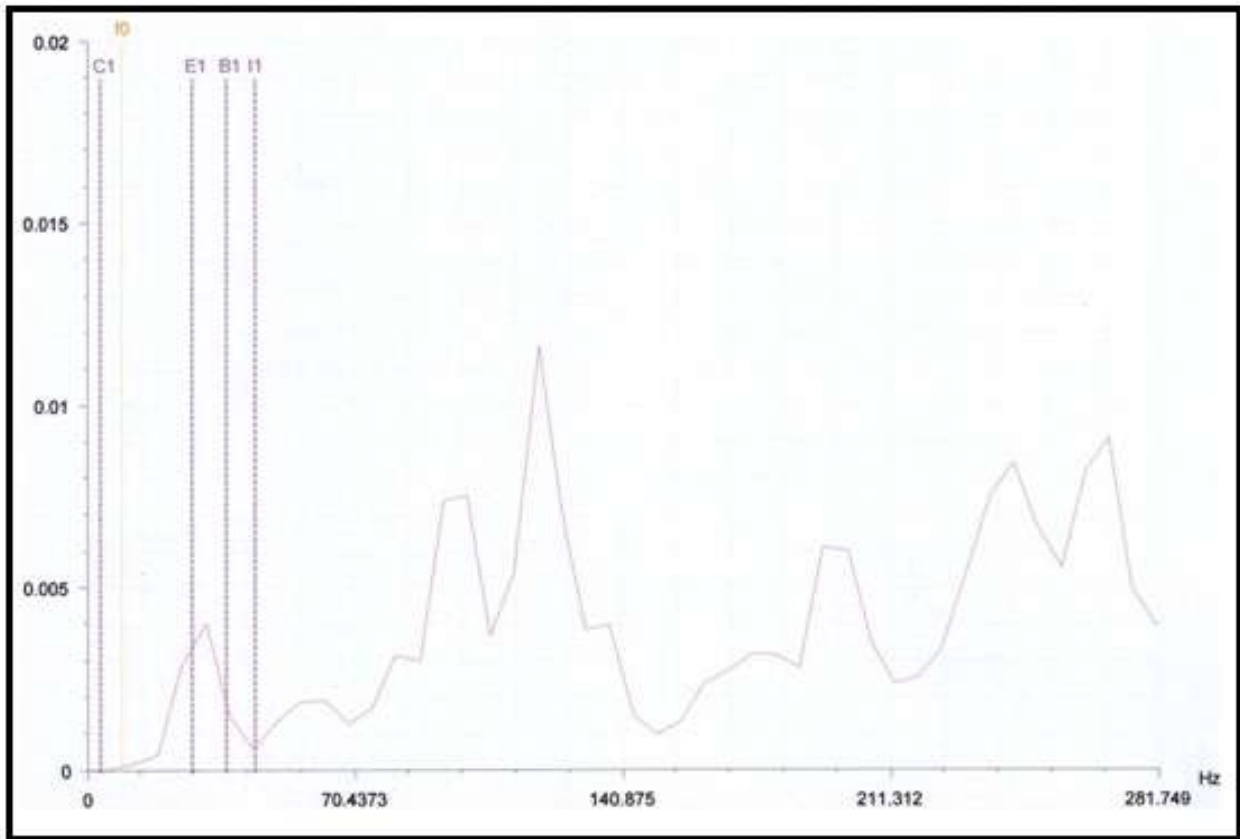
Για την εύρεση της συχνότητας που υποδηλώνει προβλήματα ευθυγράμμισης και ζυγοστάθμισης διαιρέσαμε την ταχύτητα περιστροφής του κάθε άξονα με το 60.

- Πάνω άξονας $1970 / 60 = 32.8 \text{ Hz}$
- Άξονας ΡΤΟ: $540 / 60 = 9 \text{ Hz}$

Πηγαίνοντας στα διαγράμματα FFT ψάχνουμε να βρούμε τις συγκεκριμένες συχνότητες και ελέγχουμε αν συμπίπτει σε αυτές κάποια από τις κορυφές. Στα διαγράμματα που πήραμε από τις μετρήσεις για τις συγκεκριμένες συχνότητες δεν εντοπίσαμε κάποια κορυφή να συμπίπτει, δηλαδή δεν είχαμε προβλήματα ευθυγράμμισης και ζυγοστάθμισης.

Βέβαια υπήρχε ένα εμπόδιο στην αξιολόγηση των μετρήσεων. Το εμπόδιο αυτό ήταν οι χαμηλές ταχύτητες περιστροφής των αξόνων που είχε ως αποτέλεσμα

να παίρνουμε πολύ χαμηλές συχνότητες και έτσι αυξάνει η πιθανότητα κάποιου λάθους .

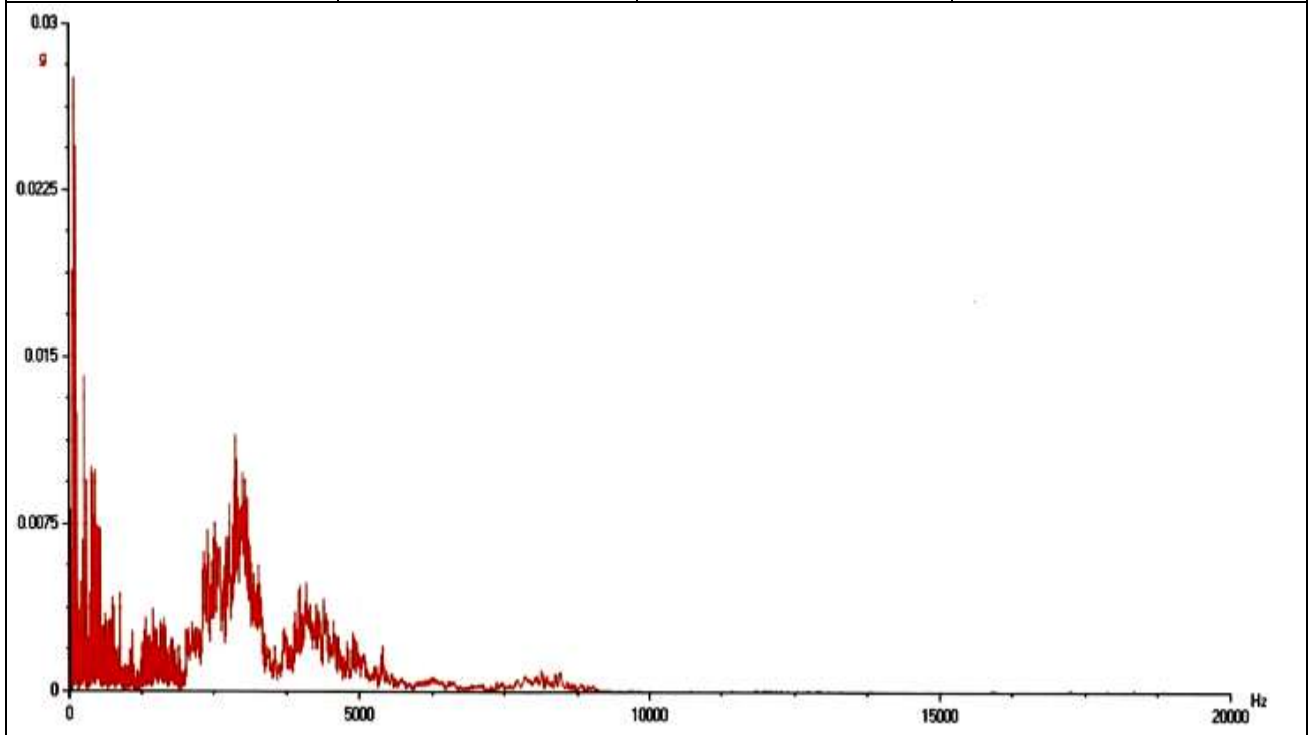


Πίνακας 24: Τυπικές συχνότητες βλαβών του ρουλεμάν 6308N του ελκυστήρα TN4050.

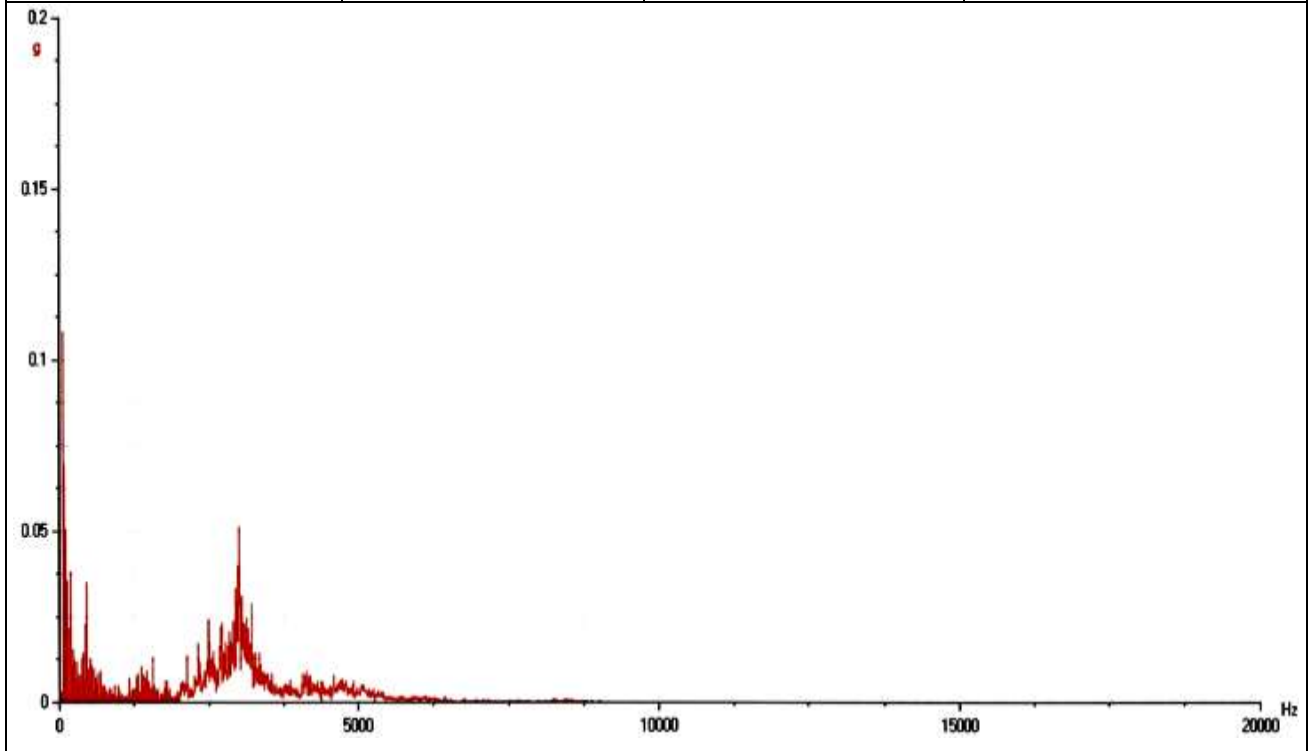
- C1: τυπική συχνότητα κλωβού.
- E1: τυπική συχνότητα εξωτερικού δακτυλίου.
- B1: τυπική συχνότητα σφαιρών.
- I1 : τυπική συχνότητα εσωτερικού δακτυλίου.

Μετά την εισαγωγή του κωδικού του ρουλεμάν παίρνουμε τις παραπάνω τυπικές συχνότητες. Μετά πηγαίνουμε στο διάγραμμα FFT και εντοπίζουμε αυτές τις συχνότητες να δούμε αν πέφτει κάποια κορυφή σε αυτές τις συχνότητες. Από το διάγραμμα FFT που πήραμε από τις μετρήσεις βλέπουμε ότι καμία κορυφή δεν συμπίπτει με τις τυπικές συχνότητες βλαβών του ρουλεμάν κάτι που δείχνει ότι το ρουλεμάν είναι σε άριστη κατάσταση. Βέβαια αυτό ήταν και το αποτέλεσμα που περιμέναμε αφού ο γεωργικός ελκυστήρας που ελέγχθηκε ήταν καινούργιος.

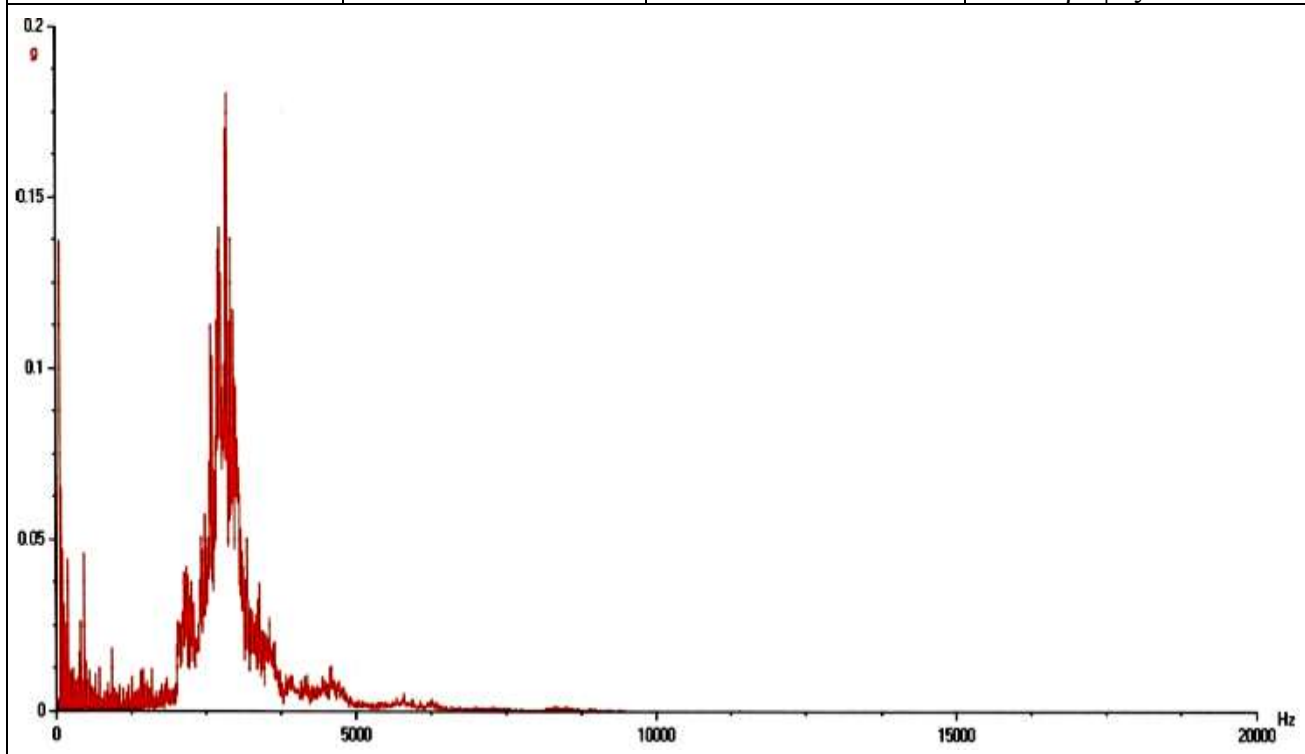
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
15/01/2010	2	Ακτινικά	Στο ρελαντί



Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
15/01/2010	2	Ακτινικά	Στις 2000 στροφές και χωρίς εμπλοκή του ΡΤΟ



Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
15/01/2010	2	Ακτινικά	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.



Πίνακας 25: Ανάλυση FFT με το OperproD XPR για το ρουλεμάν 2.

Τα συμπεράσματα που καταλήξαμε από την μελέτη των διαγραμμάτων FFT που πήραμε από τις μετρήσεις του δεύτερου ρουλεμάν, είναι παρόμοια με τα συμπεράσματα που βγάλαμε από την ανάλυση των μετρήσεων του πρώτου ρουλεμάν.

1.1.2.β. McCormick GM50.

Στο McCormick GM50 έγιναν μετρήσεις μόνο στο ρουλεμάν του PTO με το Bearing Checker και το Vibrotest 60 στις 25 Φεβρουαρίου 2010. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων ο κινητήρας βρισκόταν στις 2000 στροφές και είχαμε εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές. Οι μετρήσεις έγιναν ακτινικά.

- **Bearing Checker.**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dBi	dBc	dBm	Κωδικός αξιολόγησης
25/02/2010	2	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.	7	9	32	4/5

Πίνακας 26: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Bearing Checker

Στα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι έχουμε χαμηλό dBc αλλά παίρνουμε υψηλό dBm από τις δονήσεις που παράγονται από τον ίδιο τον ελκυστήρα με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να πάρουμε σωστές ενδείξεις για την πραγματική κατάσταση των ρουλεμάν.

- **Vibrotest 60 (Τιμές Overall).**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
25/02/2010	2	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.	1.419	0.21

Πίνακας 27: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Vibrotest 60.

Από τις μετρήσεις μπορούμε να δούμε την χαμηλή ταχύτητα δόνησης και την χαμηλή τιμή BCU. Αυτά ήταν και τα αναμενόμενα αποτελέσματα αφού ο γεωργικός ελκυστήρας ήταν καινούργιος.

1.1.3 Μετρήσεις σε μεταχειρισμένους γεωργικούς ελκυστήρες.

Μετά από τις μετρήσεις που έγιναν σε καινούργιους γεωργικούς ελκυστήρες και είχαν ως σκοπό τον έλεγχο των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από τα όργανα μετρήσεων προχωρήσαμε στις μετρήσεις παλαιών ελκυστήρων.

1.1.3.α New Holland T4050.

Στο New Holland T4050 έγιναν δύο φορές μετρήσεις σε ελκυστήρα στην περιοχή του Μαραθώνα που είχε δουλέψει περίπου 300 ώρες. Η πρώτη σειρά μετρήσεων έγινε στις 14 Μαΐου 2010 και η δεύτερη στις 4 Ιουνίου 2010, χρησιμοποιώντας και τα τρία όργανα μετρήσεων που διαθέταμε.



Μετρήθηκαν τα δύο ρουλεμάν, που είχαν μετρηθεί και στο καινούργιο New Holland T4050. Η μέτρηση έγινε αξονικά και ακτινικά, όταν ο ελκυστήρας βρισκόταν στις 2000 στροφές και είχε γίνει εμπλοκή του PTO.

Εικόνα 80: Κατά της διάρκεια των μετρήσεων στο T4050.

• Bearing Checker.

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dB _i	dB _c	dB _m	Κωδικός αξιολόγησης
14/05/2010	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.	18	10	28	4/5

Πίνακας 28: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Bearing Checker.

Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dBi	dBc	dBm	Κωδικός αξιολόγησης
14/05/2010	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	18	15	32	4/5
Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dBi	dBc	dBm	Κωδικός αξιολόγησης
14/05/2010	2	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	7	21	42	2

Πίνακας 29: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Bearing Checker.

Από τις μετρήσεις παρατηρούμε ότι έχουμε λίγο υψηλότερες τιμές dBc και dBm σε σχέση με τον καινούργιο ελκυστήρα. Παρ' όλα αυτά, όπως βλέπουμε και από τον κωδικό αξιολόγησης, πάλι υπάρχουν έντονοι κραδασμοί που δεν μπορεί να απομονώσει το όργανο μέτρησης με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να βγάλουμε σωστά συμπεράσματα για την πραγματική κατάσταση που βρίσκονται τα ρουλεμάν του ΡΤΟ.

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dBi	dBc	dBm	Κωδικός αξιολόγησης
04/06/10	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	18	13	30	4/5
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dBi	dBc	dBm	Κωδικός αξιολόγησης
04/06/10	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	18	18	33	4/5

Πίνακας 30: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Bearing Checker.

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dBi	dBc	dBm	Κωδικός αξιολόγησης
04/06/10	2	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	7	19	40	2

Πίνακας 31: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Bearing Checker

Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε πάλι υψηλές δονήσεις από τις οποίες επηρεάζεται το όργανο μέτρησης εμποδίζοντας έτσι τη σωστή διάγνωση της κατάστασης των ρουλεμάν.

- **Vibrotest 60 (Τιμές Overall).**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
14/05/2010	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	4.777	0.21
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
14/05/2010	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	1.283	0.166
Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
14/05/2010	2	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	2.682	0.177

Πίνακας 32: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Vibrotest 60.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πήραμε για τον συγκεκριμένο ελκυστήρα και συγκρίνοντας τα με τα αποτελέσματα που πήραμε από τον καινούργιο ελκυστήρα βλέπουμε ότι παίρνουμε παρόμοιες τιμές δονήσεων. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει κάποια βλάβη στα ρουλεμάν που μετράμε.

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
04/06/10	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	4.329	0.212
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
04/06/10	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	1.389	0.171
Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
04/06/10	2	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	2.461	0.181

Πίνακας 33: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Vibrotest 60.

Οι μετρήσεις δείχνουν ότι οι ταχύτητες δονήσεων άλλα και το BCU είναι κοντά στις τιμές που λάβαμε και στο καινούργιο T4050.

- **OneproD MVP-2C (Τιμές Overall).**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
14/05/2010	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	0.967	2.50	3.13

Πίνακας 34: Αποτελέσματα μετρήσεων για το OneproD MV-2C.

Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
14/05/2010	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.	0.771	3.47	3.54
Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
14/05/2010	2	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.	0.542	1.44	4.73

Πίνακας 35: Αποτελέσματα μετρήσεων για το OneproD MV-2C.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, βλέπουμε ότι οι ταχύτητες δονήσεων που καταγράφηκαν δεν είχαν μεγάλη διαφορά από το αντίστοιχο καινούργιο ελκυστήρα, με εξαίρεση μία τιμή. Υψηλή ταχύτητα δόνησης (3.47mm/s) είχαμε στο πρώτο ρουλεμάν κατά την αξονική μέτρηση. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε κάποιο τυχαίο γεγονός γιατί στην αντίστοιχη μέτρηση με τον Vibrotest 60 είχαμε φυσιολογική τιμή (1.283mm/s και 1.389 mm/s). Επίσης και το Defect factor είναι εντός ορίων.

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
04/06/10	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.	0.396	2.82	2.88
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
04/06/10	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.	0.673	1.47	2.51

Πίνακας 36: Αποτελέσματα μετρήσεων για το OneproD MV-2C.

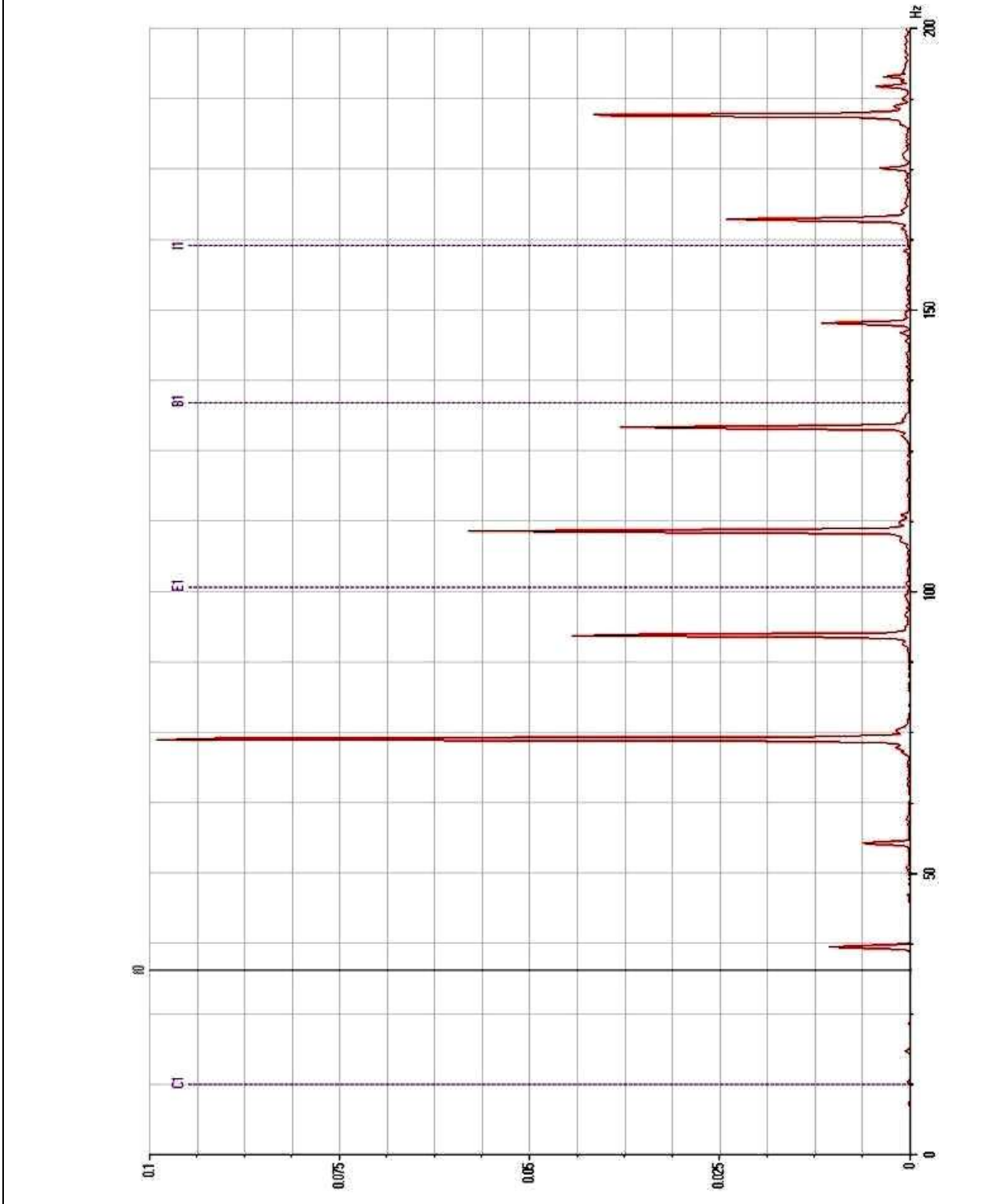
Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
04/06/10	2	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	0.520	3.10	2.72

Πίνακας 37: Αποτελέσματα μετρήσεων για το OneproD MV-2C.

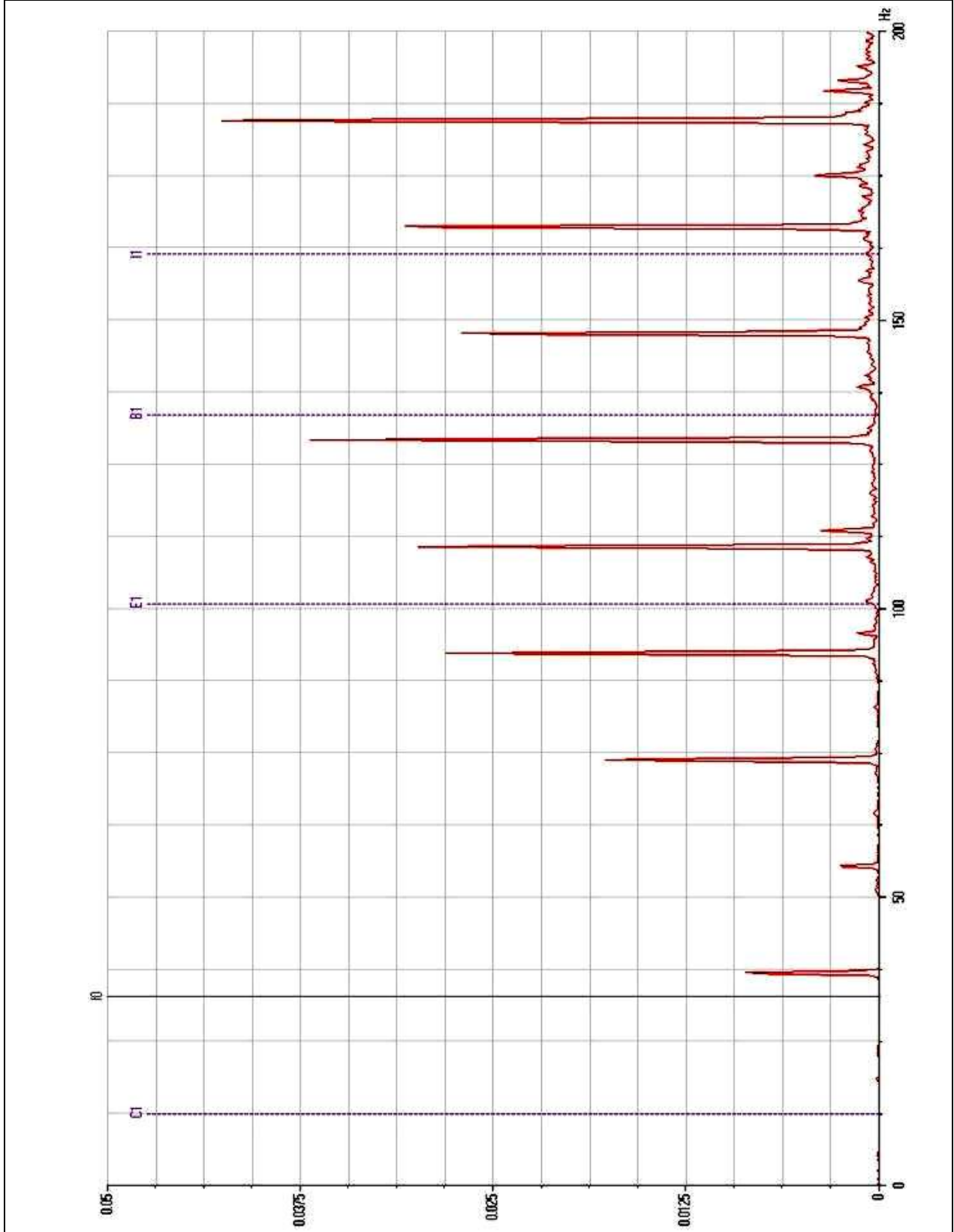
Οι ταχύτητες δονήσεων που καταγράψαμε έχουν τιμές πολύ κοντά στις ταχύτητες δονήσεων των καινούργιων ελκυστήρων. Η ταχύτητα δόνησης της αξονικής μέτρησης του πρώτου ρουλεμάν στις 14/05/2010 είχε χαρακτηριστεί ως υψηλή (3.47mm/s). Στις μετρήσεις που έγιναν στις 04/06/10 βλέπουμε ότι επανήλθε σε φυσιολογικά επίπεδα (1.47mm/s).

• **OneproD MV-2C (Ανάλυση FFT).**

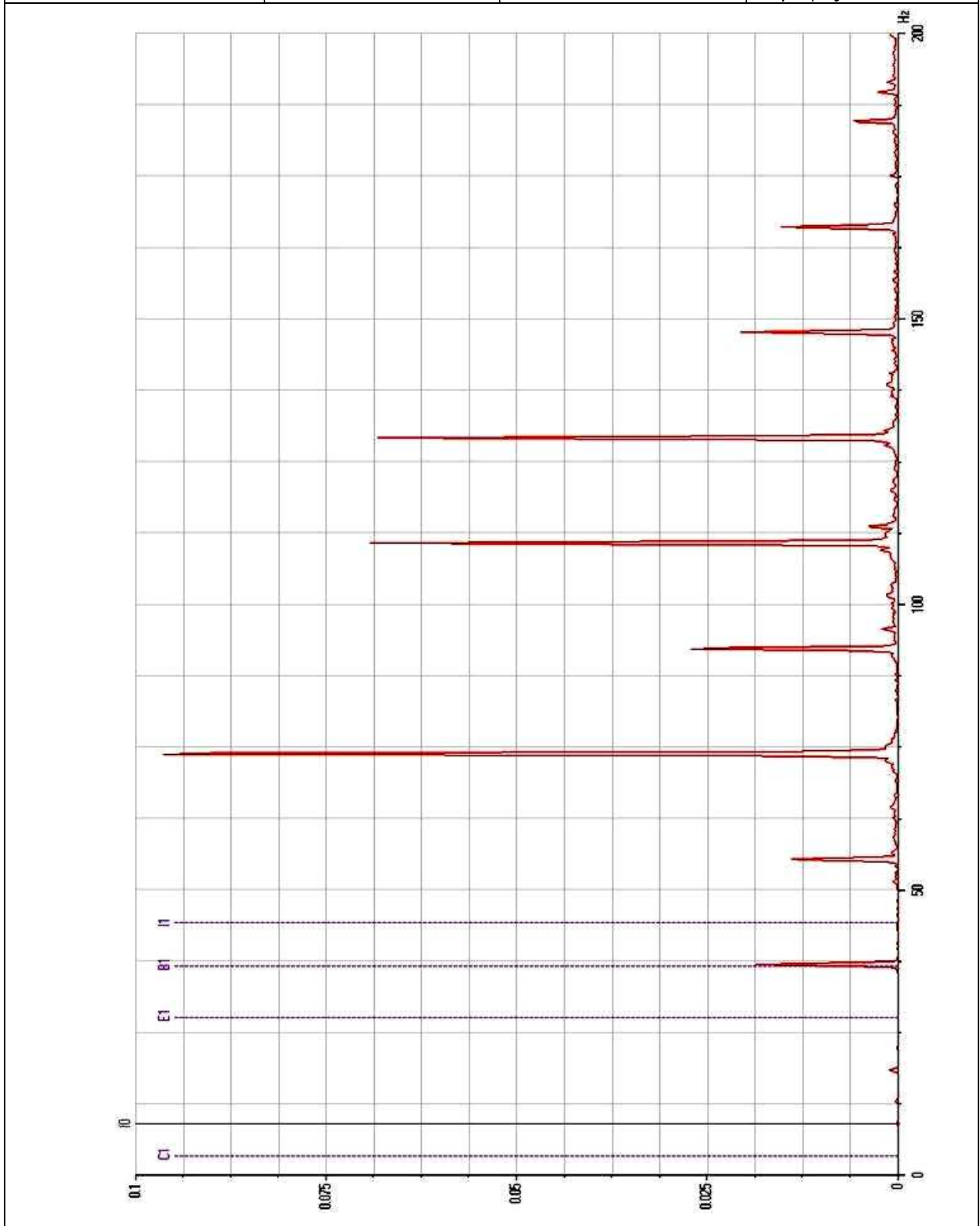
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
04/06/10	1	Ακτινικά	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.



Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
04/06/10	1	Αξονικά	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.



Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
04/06/10	2	Ακτινικά	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.



Πίνακας 38: Ανάλυση FFT με το OneproD MV-2C.

Στα διαγράμματα FFT μπορούμε να δούμε τις τυπικές συχνότητες βλαβών στα δύο ρουλεμάν που μετρήθηκαν. Έτσι από την ανάλυση των διαγραμμάτων βλέπουμε ότι καμία κορυφή δεν συμπίπτει με κάποια τυπική συχνότητα βλάβης. Μόνο στο δεύτερο ρουλεμάν κατά την ακτινική μέτρηση βλέπουμε ότι υπάρχει μία κορυφή κοντά στην τυπική συχνότητα βλάβης των σφαιρών. Όμως δεν συμπίπτει, και αυτό το συμπεραίνουμε γιατί αν υπήρχε πρόβλημα θα μας ειδοποιούσε το ίδιο το πρόγραμμα. Επίσης δεν πέφτει κάποια κορυφή στο σημείο F0 που είναι η συχνότητα που θα εμφανιζόταν κάποια κορυφή αν είχαμε πρόβλημα ευθυγράμμισης ή ζυγοστάθμισης.

1.1.3.β New Holland TN65N.



Στο New Holland TN65N έγιναν δύο μετρήσεις στις 14 Μαΐου και στις 4 Ιουνίου. Ο ελκυστήρας βρισκόταν στην περιοχή του Μαραθώνα και είχε δουλέψει 2590 ώρες.

Χρησιμοποιήθηκαν και τα τρία όργανα για μετρήσεις overall και ανάλυση FFT. Έγινε έλεγχος των δύο ρουλεμάν του PTO με αξονικές και ακτινικές μετρήσεις, όταν ο ελκυστήρας βρισκόταν στις 2000 στροφές και είχε γίνει εμπλοκή του PTO.

Εικόνα 81: Κατά της διάρκεια των μετρήσεων στο TN65N.

• Bearing Checker.

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dB _i	dB _c	dB _m	Κωδικός αξιολόγησης
14/05/2010	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.	18	10	27	4/5

Πίνακας 39: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Bearing Checker.

Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dB _i	dB _c	dB _m	Κωδικός αξιολόγησης
14/05/2010	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	18	8	22	4/5
Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dB _i	dB _c	dB _m	Κωδικός αξιολόγησης
14/05/2010	2	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	7	15	37	2

Πίνακας 40: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Bearing Checker.

Πάλι παρατηρούμε ότι δημιουργούνται προβλήματα στις μετρήσεις λόγω των δονήσεων.

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dB _i	dB _c	dB _m	Κωδικός αξιολόγησης
04/06/10	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	18	12	28	4/5
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dB _i	dB _c	dB _m	Κωδικός αξιολόγησης
04/06/10	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	18	10	21	4/5
Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dB _i	dB _c	dB _m	Κωδικός αξιολόγησης
04/06/10	2	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	7	12	35	2

Πίνακας 41: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Bearing Checker.

Και σε αυτή την σειρά των μετρήσεων αντιμετωπίσαμε πρόβλημα δονήσεων με το συγκεκριμένο όργανο και έτσι δεν καταλήξαμε σε κάποιο συμπέρασμα.

• **Vibrotest 60 (Τιμές Overall).**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
14/05/2010	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	3.312	0.159
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
14/05/2010	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	1.021	0.23
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
14/05/2010	2	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	1.283	0.49

Πίνακας 42: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Vibrotest 60.

Αυτό που παρατηρούμε από την συγκεκριμένη σειρά μετρήσεων είναι το λίγο αυξημένο BCU στο δεύτερο ρουλεμάν το οποίο όμως εξακολουθεί να είναι χαμηλό και εντός των ορίων. Το ίδιο ισχύει και στις τιμές της ταχύτητας των δονήσεως που είναι εντελώς φυσιολογικές αν τις συγκρίνουμε με τις τιμές των καινούργιων ελκυστήρων.

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
04/06/10	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	3.531	0.163

Πίνακας 43: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Vibrotest 60.

Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
04/06/10	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	1.219	0.221
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
04/06/10	2	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	1.252	0.46

Πίνακας 44: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Vibrotest 60.

Παρατηρώντας τις μετρήσεις καταλήγουμε στα ίδια συμπεράσματα, ότι τα ρουλεμάν του ΡΤΟ του ελκυστήρα δεν αντιμετωπίζουν κάποια αξιολογη φθορά.

- **OneproD MVP-2C (Τιμές Overall).**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
14/05/2010	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	0.520	3.56	3.20
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
14/05/2010	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.	0.554	1.29	2.59

Πίνακας 45: Αποτελέσματα μετρήσεων για το OneproD MV-2C.

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
14/05/2010	2	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.	0.319	2.44	3.04

Πίνακας 46: Αποτελέσματα μετρήσεων για το OneproD MV-2C.

Από τις overall τιμές που πήραμε βλέπουμε ότι οι ταχύτητες των δονήσεων αλλά και οι τιμές του Defect factor και των δύο ρουλεμάν είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες τιμές του καινούργιου ελκυστήρα.

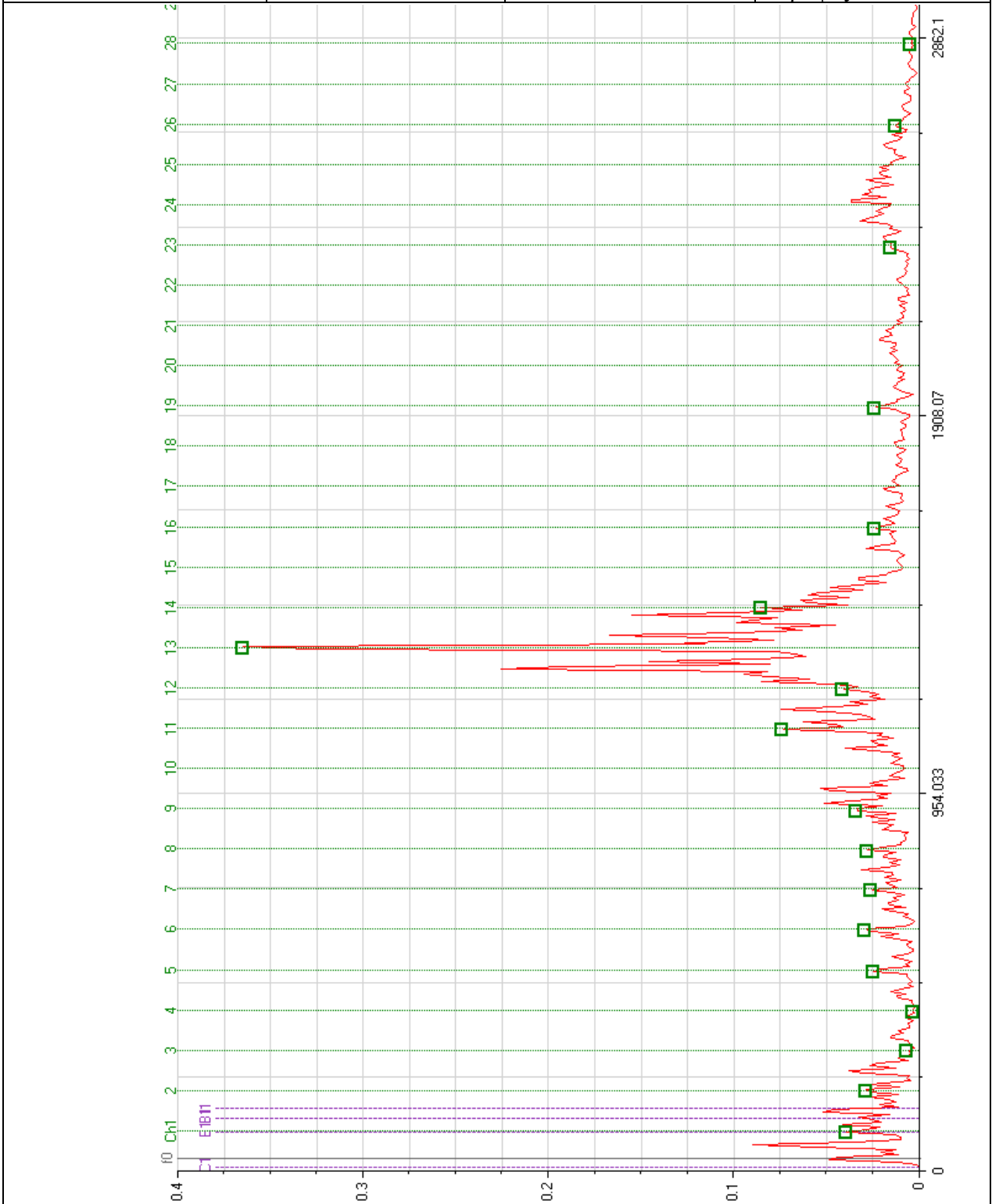
Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
04/06/10	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.	0.567	3.83	3.25
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
04/06/10	1	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.	0.875	1.71	2.88
Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
04/06/10	2	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 540 στροφές.	0.377	3.59	2.75

Πίνακας 47: Αποτελέσματα μετρήσεων για το OneproD MV-2C.

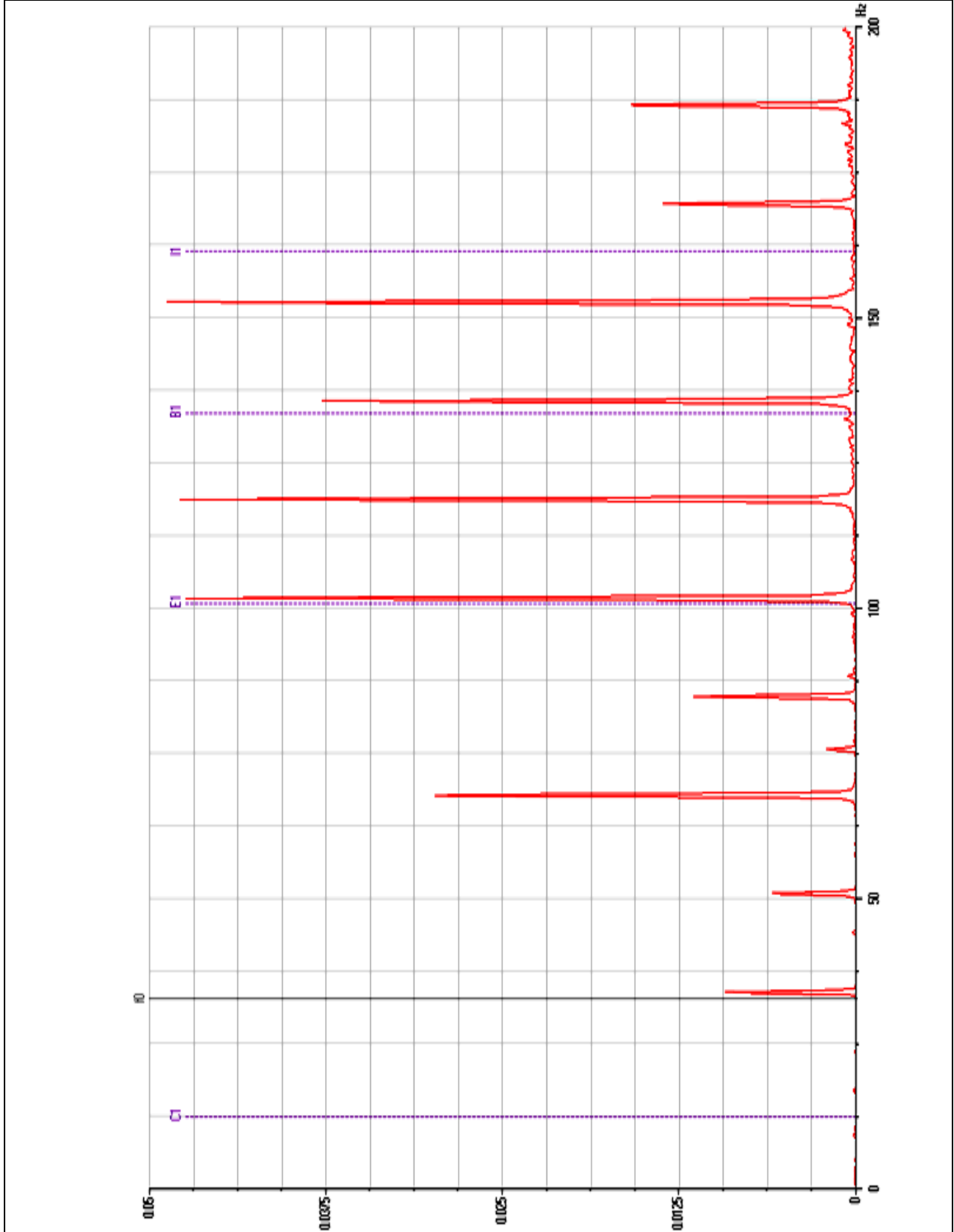
Παρατηρούμε μία μικρή αύξηση στις ταχύτητες των δονήσεων σε σχέση με την προηγούμενη μέτρηση αλλά πάντα κοντά στις τιμές που λάβαμε από τον καινούργιο ελκυστήρα.

• **OneproD MV-2C (Ανάλυση FFT).**

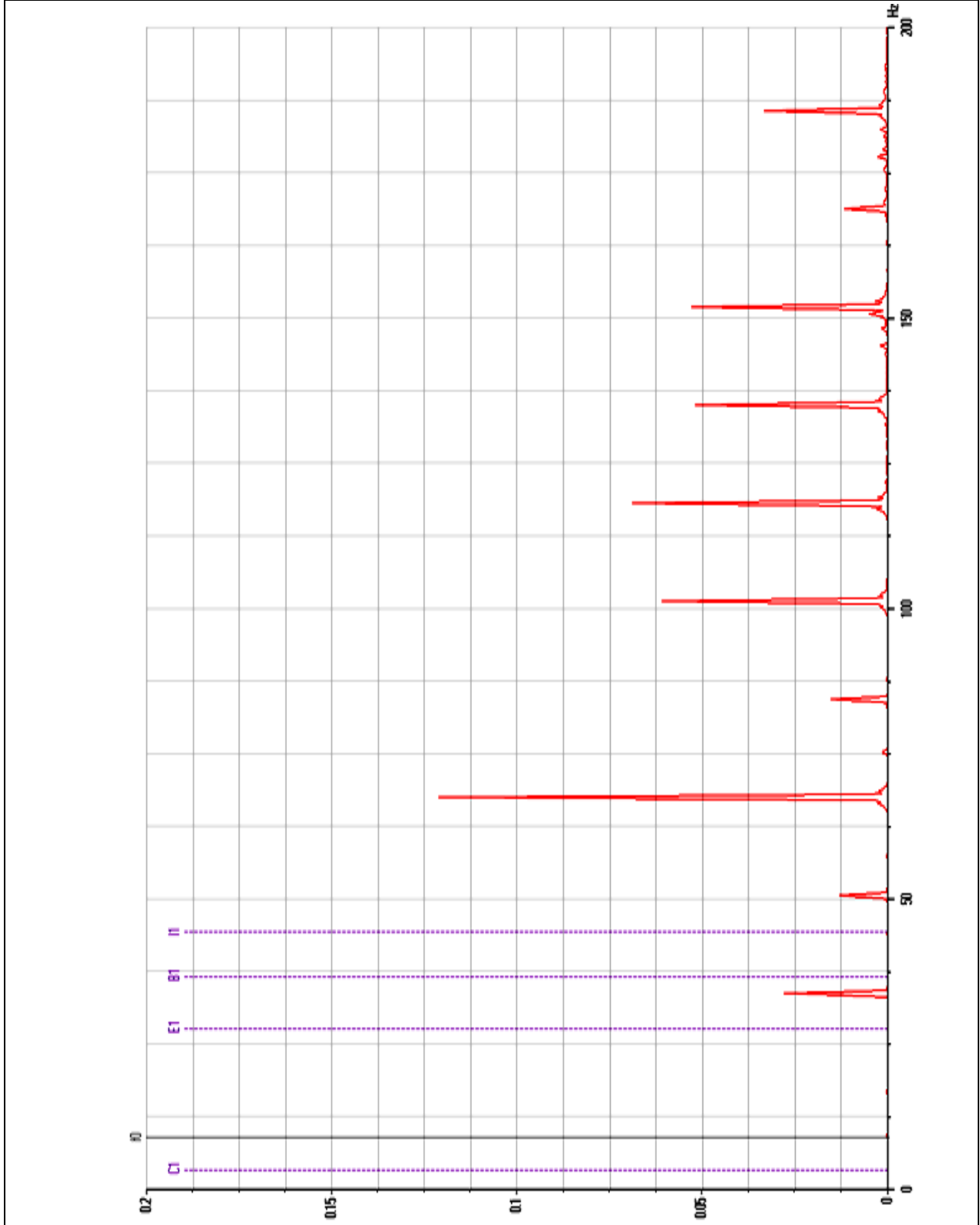
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
04/06/10	1	Ακτινικά	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.



Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
04/06/10	1	Αξονικά	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.



Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
04/06/10	2	Ακτινικά	Στις 2000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 540 στροφές.



Πίνακας 48: Ανάλυση FFT με το OneproD MV-2C.

Στο πρώτο διάγραμμα που αφορά ακτινική μέτρηση στο πρώτο ρουλεμάν βλέπουμε κάτι πολύ ενδιαφέρον. Παρατηρούμε ότι μία κορυφή πέφτει πάνω στην τυπική συχνότητα E1. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μία μικρή βλάβη στον εξωτερικό δακτύλιο.

Το πρόγραμμα από μόνο του, όταν κάποια κορυφή συμπίπτει με κάποια τυπική συχνότητα, μας ειδοποιεί και μας δείχνει όλες τις αρμονικές αυτής της συχνότητας. Αυτό είναι και το πλεονέκτημα της ανάλυσης FFT αφού με τις τιμές overall, Defect Factor και BCU δεν είχε εντοπιστεί κάποια φθορά.

Σε τέτοιες περιπτώσεις που εντοπίζεται κάποια φθορά γίνονται πιο συχνά μετρήσεις ώστε να καθοριστεί ο χρόνος αντικατάστασης του εξαρτήματος. Συγκεκριμένα όταν ο κορυφή που πέφτει πάνω στην συχνότητα αυξηθεί κατά δέκα φορές περίπου τότε πρέπει να αντικαταστήσουμε το ρουλεμάν.

1.1.3.γ Massey Ferguson 178.

Στο Massey Ferguson 178 έγιναν μετρήσεις στις 4 και στις 27 Ιουνίου 2010 στην περιοχή των Σπάτων. Ο ελκυστήρας είχε δουλέψει 4234 ώρες.



Χρησιμοποιήθηκαν πάλι και τα τρία όργανα για μετρήσεις overall και ανάλυση FFT. Έγινε έλεγχος μόνο του ρουλεμάν του PTO με αξονικές και ακτινικές μετρήσεις όταν ο ελκυστήρας βρισκόταν στις 720 και στις 1000 στροφές και είχε γίνει εμπλοκή του PTO στις ίδιες στροφές.

Εικόνα 82: Κατά της διάρκεια των μετρήσεων στο Massey Ferguson 178.

- **Bearing Checker.**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dBi	dBc	dBm	Κωδικός αξιολόγησης
27/06/2010	2	Στις 1000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις ίδιες στροφές.	13	6	9	1

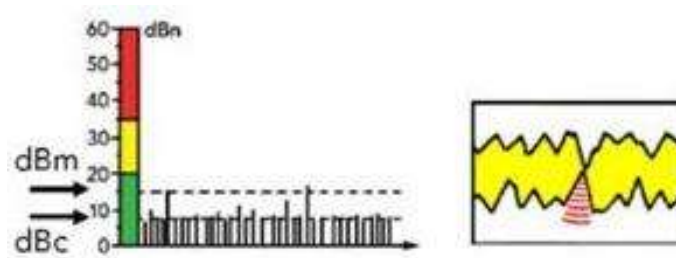
Πίνακας 49: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Bearing Checker.

Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dBi	dBc	dBm	Κωδικός αξιολόγησης
27/06/2010	2	Στις 1000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 1000 στροφές.	13	-9	15	1

Πίνακας 50: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Bearing Checker.

Στα αποτελέσματα μπορούμε να δούμε ότι αν και είναι παλαιός ο ελκυστήρας παράγει λιγότερες δονήσεις από έναν καινούργιο. Αυτό μας έδωσε την ευκαιρία να μπορέσουμε τελικά να κάνουμε και μετρήσεις με το Bearing Checker.

Έτσι παρατηρούμε πολύ χαμηλές dBc και φυσιολογικές dBm. Η διαφορά μεταξύ τους είναι μικρή, για αυτό παίρνουμε κωδικό αξιολόγησης. Δηλαδή ότι δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα στο ρουλεμάν.



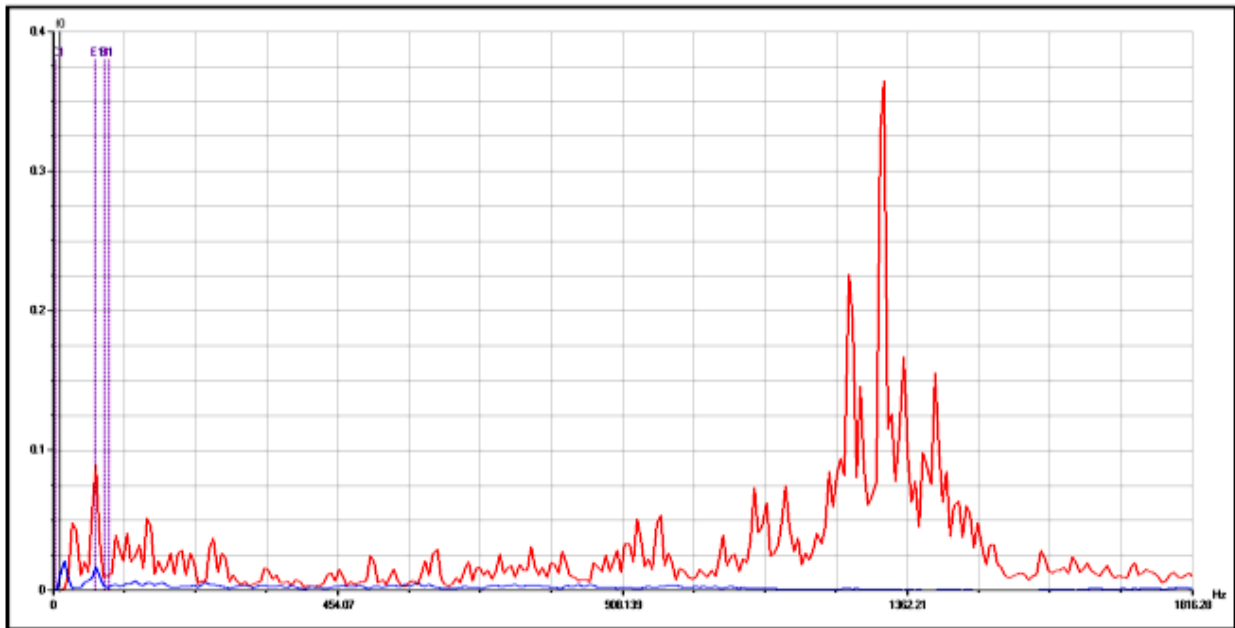
Εικόνα 83: Ένδειξη από καλό ρουλεμάν

- **Vibrotest 60 (Τιμές Overall).**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
27/06/2010	2	Στις 1000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 1000 στροφές.	2.007	0.036
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
27/06/2010	2	Στις 1000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 1000 στροφές.	0.622	0.025

Πίνακας 51: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Vibrotest 60.

Από τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι έχουμε ταχύτητες δονήσεων πιο χαμηλές και καινούργιους ελκυστήρες. Αυτό αρχικά φαίνεται παράξενο αλλά δεν είναι καθόλου γιατί ο κάθε ελκυστήρας έχει διαφορετικό σχεδιασμό που επηρεάζει την ταχύτητα των δονήσεων. Για παράδειγμα, ένα καπάκι στην περιοχή των μετρήσεων το οποίο έχει χαλαρώσει μπορεί να αυξήσει δραματικά την παραγωγή δονήσεων. Στο παρακάτω διάγραμμα FFT μπορούμε να δούμε πόσο λιγότερες δονήσεις παράγονται από ένα **Massey Ferguson 178** κατασκευής 1968 από ένα σχετικά καινούργιο **New Holland TN65N**.



Εικόνα 84: Ανάλυση FFT για Massey Ferguson 178(μπλε χρώμα) και New Holland TN65N (κόκκινο χρώμα).

- **OneproD MVP-2C (Τιμές Overall).**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
04/06/10	2	Στις 720 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 720 στροφές	0.059	2.00	3.83

Πίνακας 52: Αποτελέσματα μετρήσεων για το OneproD MV-2C

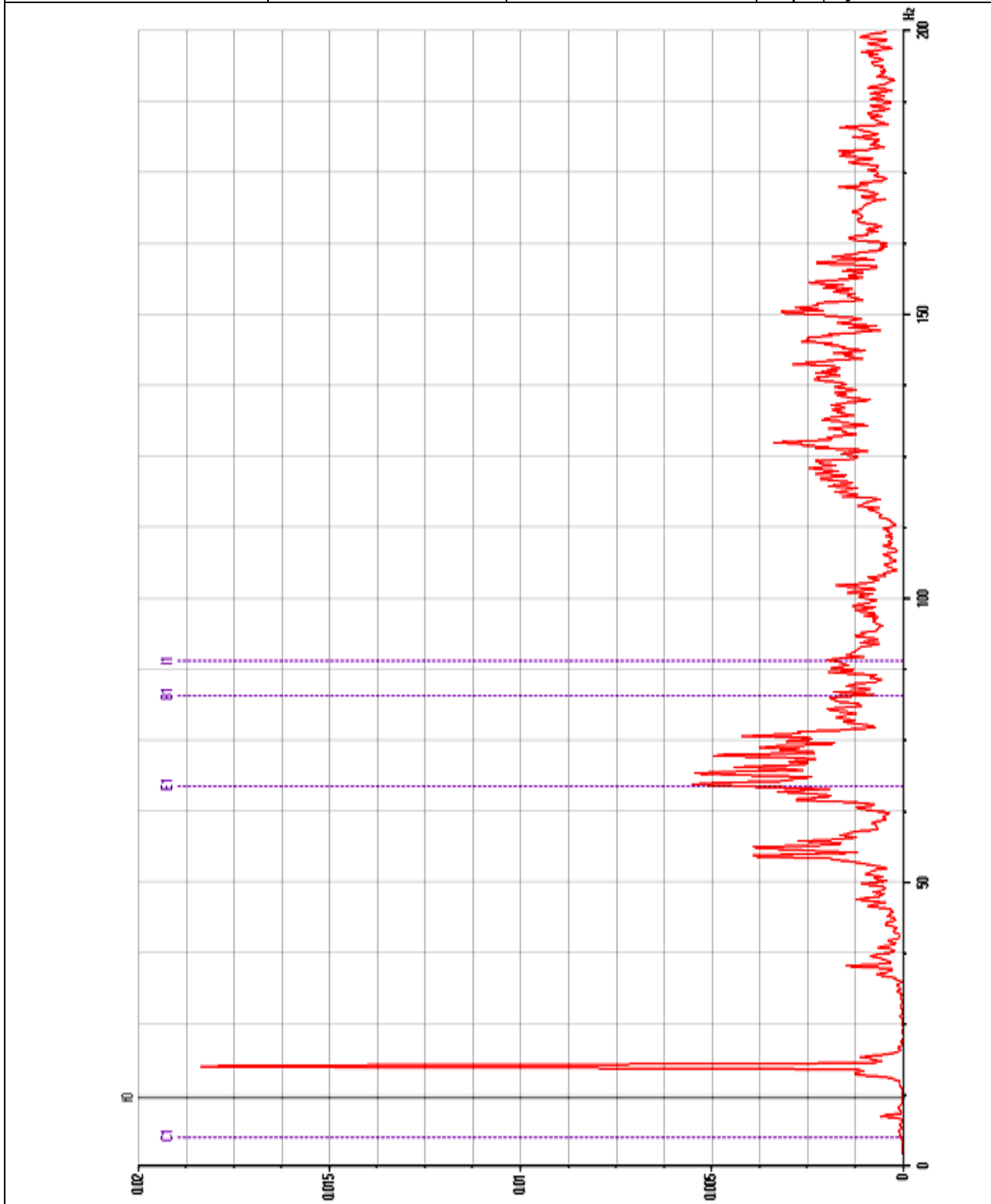
Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
04/06/10	2	Στις 720 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 720 στροφές	0.058	0.877	3.64
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
04/06/10	2	Στις 720 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 720 στροφές	0.059	1.41	3.09

Πίνακας 53: Αποτελέσματα μετρήσεων για το OneproD MV-2C

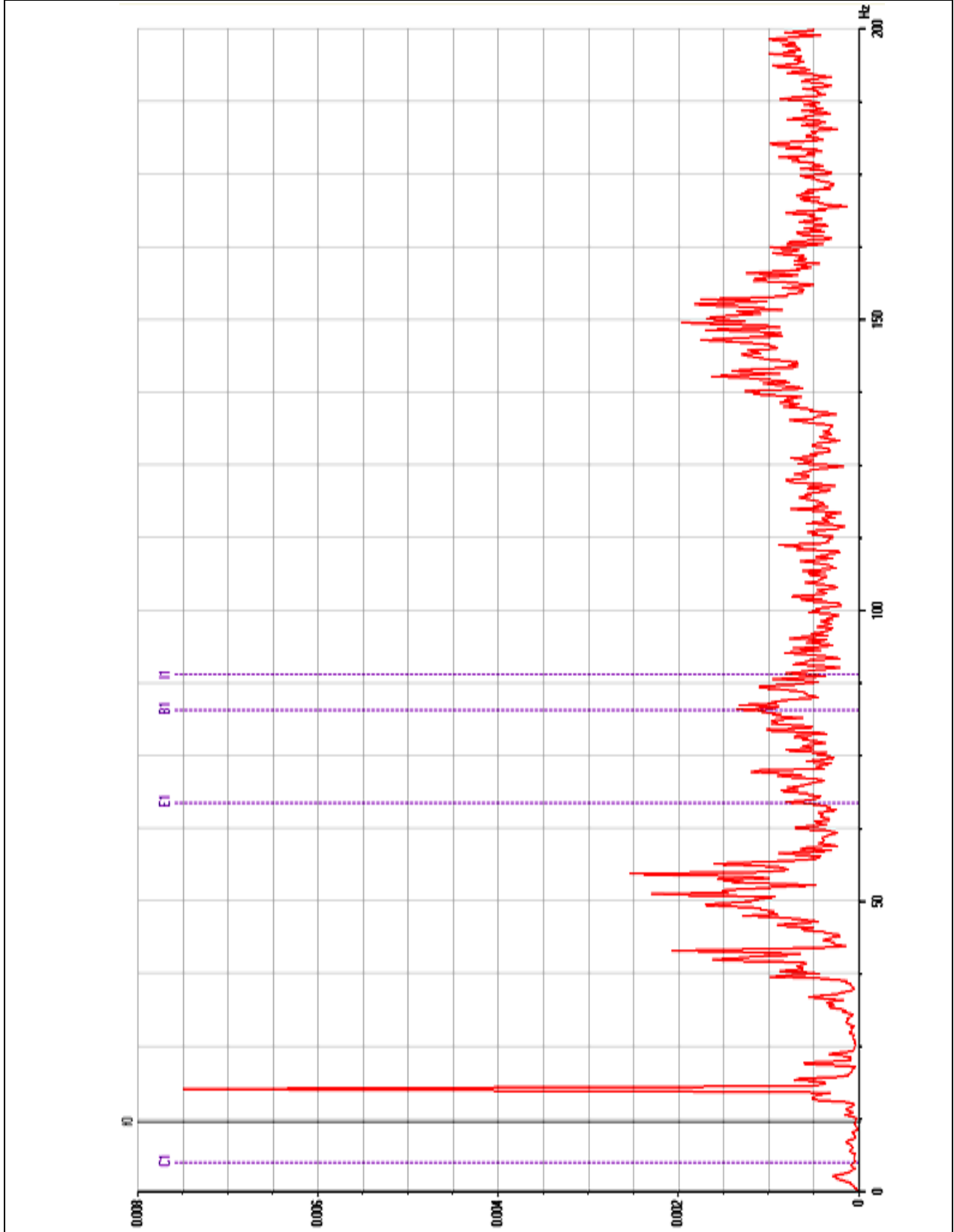
Από τις τιμές overall που λάβαμε από το OneproD MV-2C παρατηρούμε πάλι πολύ χαμηλές ταχύτητες δονήσεων και φυσιολογικές τιμές Defect factor. Από αυτές τις τιμές φαίνεται ότι τα ρουλεμάν του PTO δεν έχουν κάποια φθορά.

• **OneproD MV-2C (Ανάλυση FFT).**

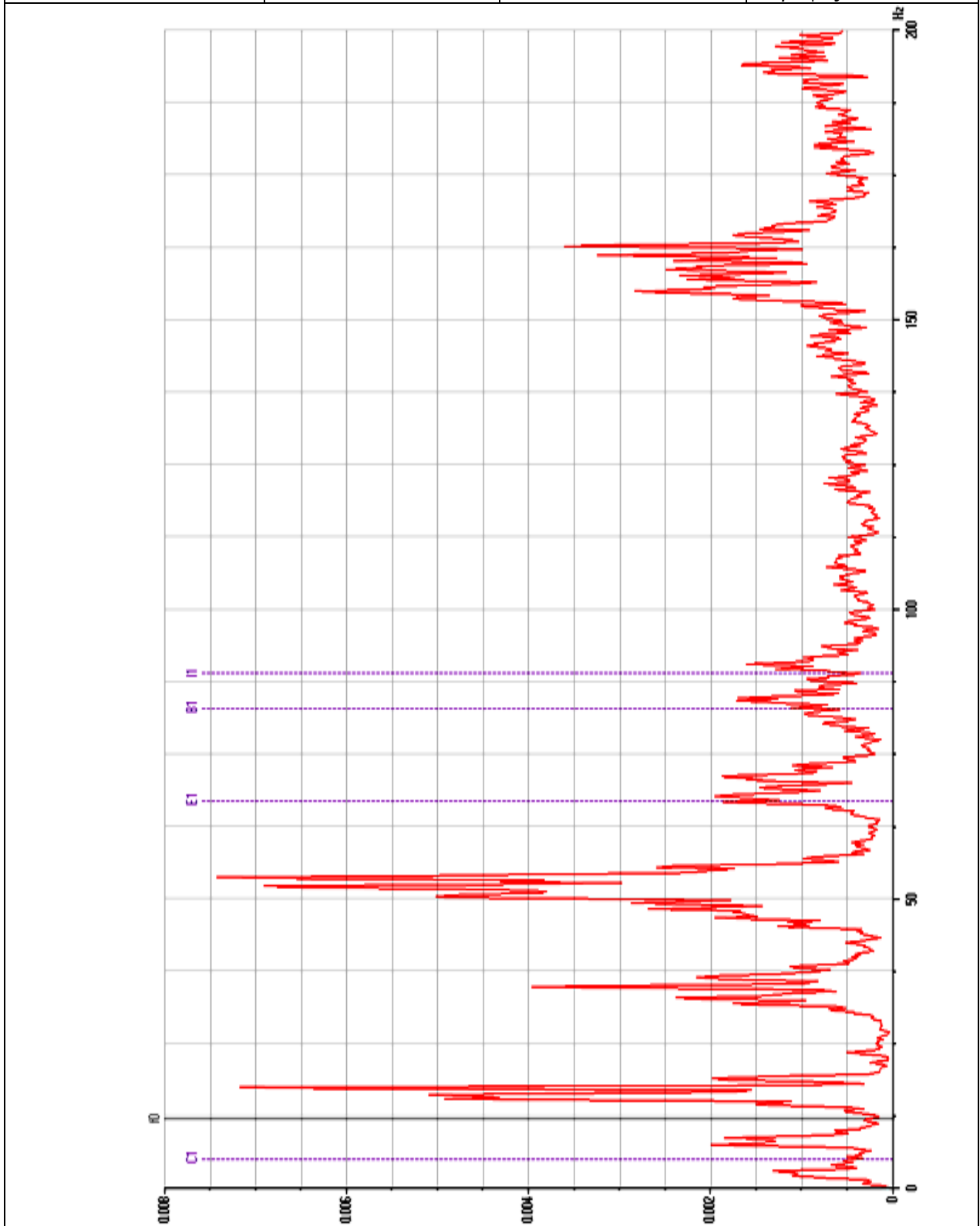
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
04/06/10	2	Ακτινικά	Στις 720 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 720 στροφές



Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
04/06/10	2	Ακτινικά	Στις 720 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 720 στροφές



Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
04/06/10	2	Αξονικά	Στις 720 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 720 στροφές



Πίνακας 54: Ανάλυση FFT με το OneproD MV-2C.

Από τα διαγράμματα FFT δεν βλέπουμε κάποια κορυφή να συμπίπτει με κάποια τυπική συχνότητα βλάβης, αλλά ούτε και με την συχνότητα περιστροφής. Αυτό σημαίνει ότι δεν έχουμε ούτε φθορές στα ρουλεμάν αλλά ούτε και προβλήματα ευθυγράμμισης και ζυγοστάθμισης του άξονα του ΡΤΟ.

1.1.3.8 Zetor 7711.

Στο Zetor 7711 έγιναν μετρήσεις μόνο στο ρουλεμάν του ΡΤΟ με το Bearing Checker, το Vibrotest 60 αλλά και το OneproD MV-2C στις 4 Ιουνίου και στις 27 Ιουνίου 2010. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων ο κινητήρας βρισκόταν στις 700 στροφές και είχε γίνει εμπλοκή του ΡΤΟ στις ίδιες στροφές.



Εικόνα 85: Άξονας ΡΤΟ του Zetor 7711.

- **Bearing Checker.**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dB _i	dB _c	dB _m	Κωδικός αξιολόγησης
27/06/2010	2	Στις 700 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 700 στροφές.		-9	11	1
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dB _i	dB _c	dB _m	Κωδικός αξιολόγησης
27/06/2010	2	Στις 700 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 700στροφές.		8	40	2

Πίνακας 55: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Bearing Checker.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων μπορούμε να δούμε ότι στην μέτρηση που έγινε ακτινικά, παίρνουμε πολύ χαμηλό dBc και φυσιολογικό dBm. Έτσι περνούμε κωδικό αξιολόγησης 1, δηλαδή το ρουλεμάν δεν εμφανίζει κάποια φθορά.

Αντίθετα, αν παρατηρήσουμε τα αποτελέσματα που πήραμε από την μέτρηση που έγινε αξονικά, βλέπουμε ότι παίρνουμε φυσιολογικό dBc και πολύ αυξημένο dBm. Έτσι ο κωδικός αξιολόγησης που πήραμε ήταν 2, που σημαίνει η βλάβη στο ρουλεμάν ή προβλήματα δονήσεων.

Για να δούμε αν πράγματι υπάρχει ή δεν υπάρχει πρόβλημα στο ρουλεμάν προχωρήσαμε στις τιμές overall.

- **Vibrotest 60 (Τιμές Overall).**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
27/06/2010	2	Στις 700 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 700 στροφές.	2.463	0.036
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
27/06/2010	2	Στις 700 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 700 στροφές.	0.551	0.036

Πίνακας 56: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Vibrotest 60.

Από τα παραπάνω βλέπουμε πάλι πολύ χαμηλές τιμές δονήσεων άλλα και χαμηλές τιμές BCU. Δηλαδή φαίνεται το ρουλεμάν να μην αντιμετωπίζει κάποια φθορά.

- **OneproD MVP-2C (Τιμές Overall).**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
04/06/10	2	Στις 700 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 700 στροφές	0.232	6.86	2.35

Πίνακας 57: Αποτελέσματα μετρήσεων για το OneproD MV-2C.

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
04/06/10	2	Στις 700 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 700 στροφές	0.146	0.965	2.14
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
04/06/10	2	Στις 700 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 700 στροφές	0.158	4.68	2.77

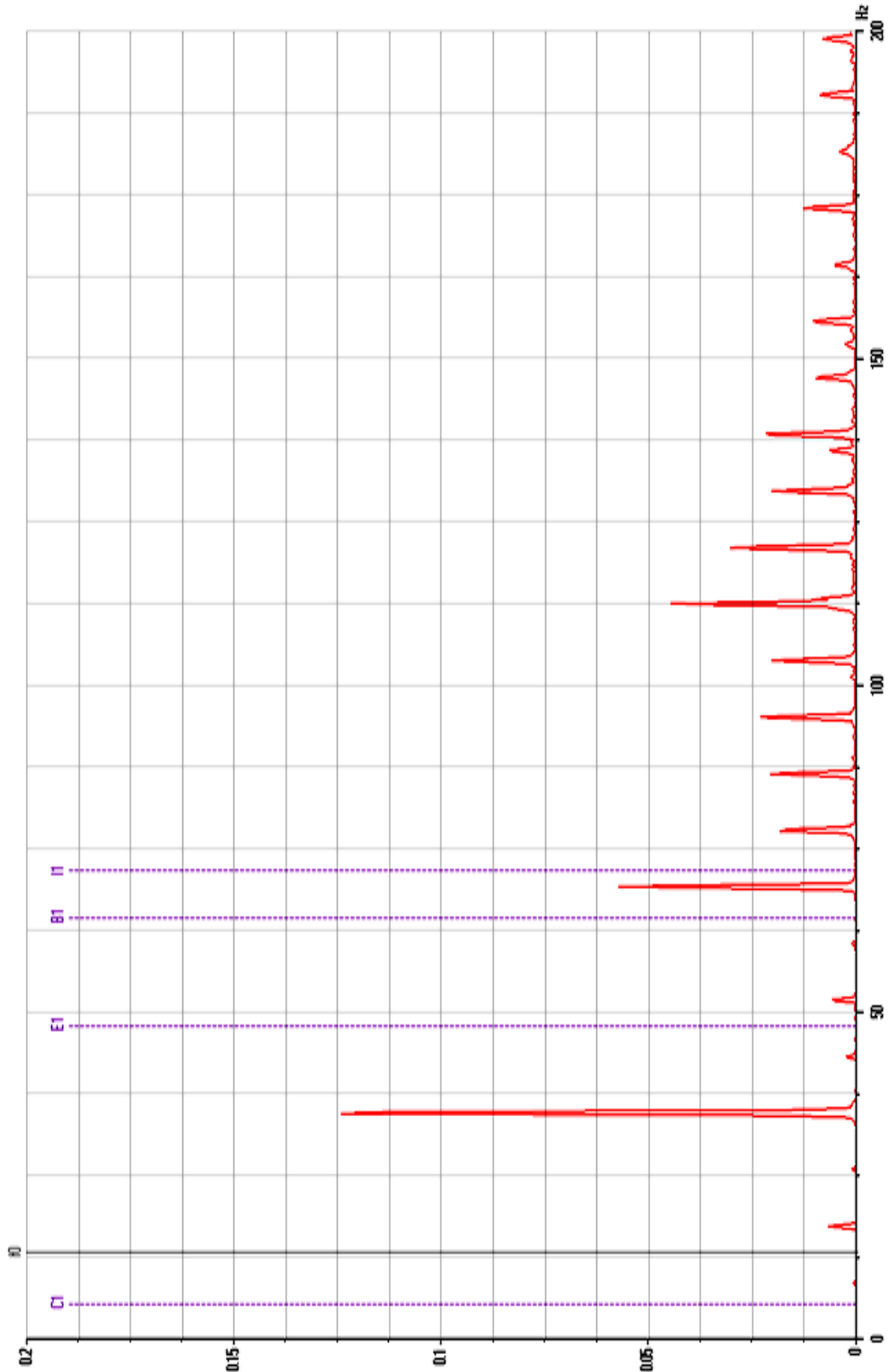
Πίνακας 58: Αποτελέσματα μετρήσεων για το OneproD MV-2C.

Από τις overall τιμές παρατηρήθηκαν δύο υψηλές τιμές δονήσεων. Συγκεκριμένα στην μέτρηση που έγινε ακτινικά είχαμε ταχύτητα δόνησης 6.86 mm/s και στην μέτρηση που έγινε αξονικά είχαμε ταχύτητα δόνησης 4.68 mm/s. Οι τιμές αυτές είναι υψηλές σε σχέση με τα αποτελέσματα που πήραμε από τους νέους ελκυστήρες, κάτι που ίσως δείχνει ότι υπάρχει φθορά στο ρουλεμάν.

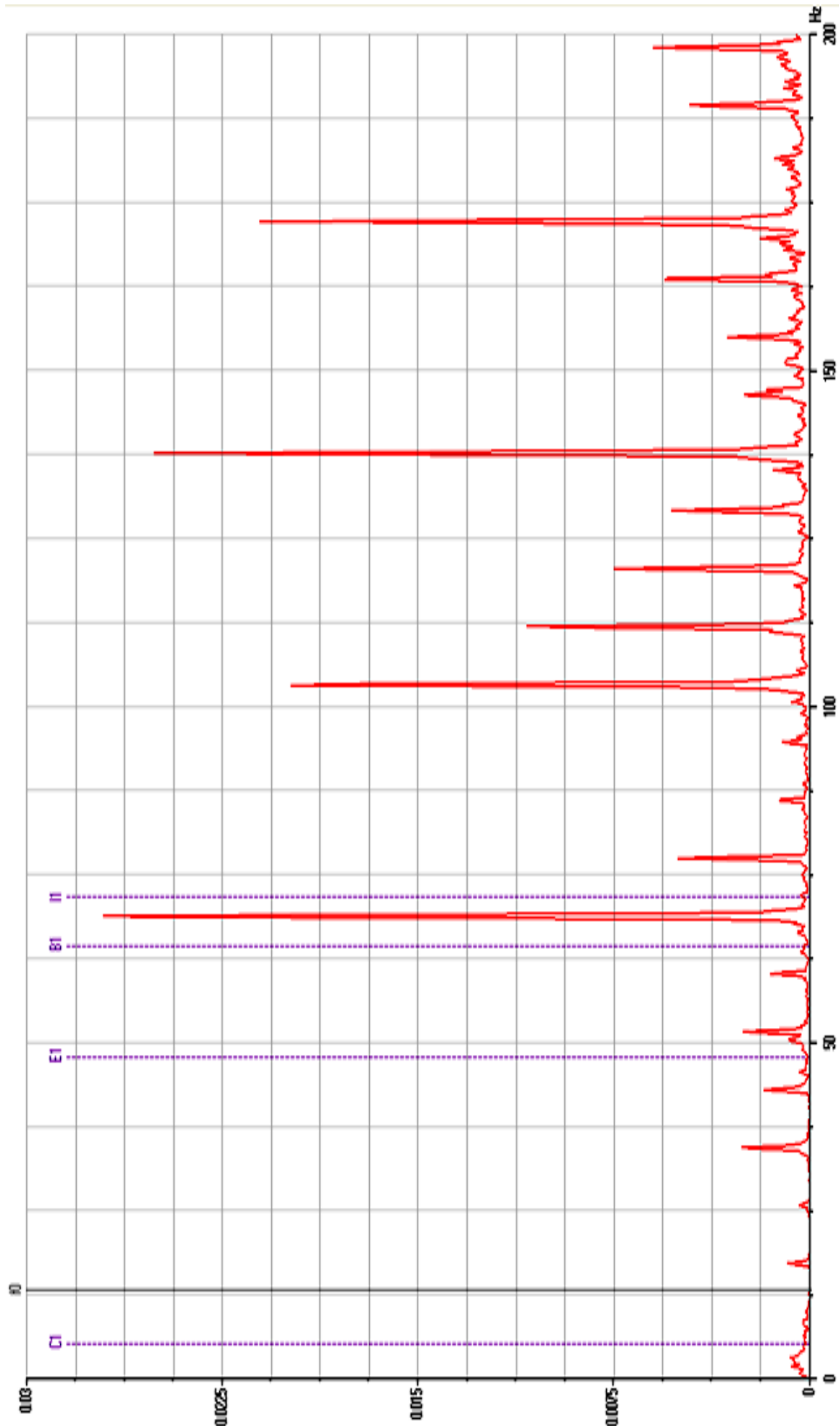
Παρ' όλα αυτά οι τιμές του Defect factor είναι χαμηλές και μέσα στα όρια που δείχνει ότι δεν υπάρχει φθορά στο ρουλεμάν. Για να δούμε αν τελικά υπάρχει φθορά προχωράμε σε ανάλυση FFT.

• **OneproD MV-2C (Ανάλυση FFT).**

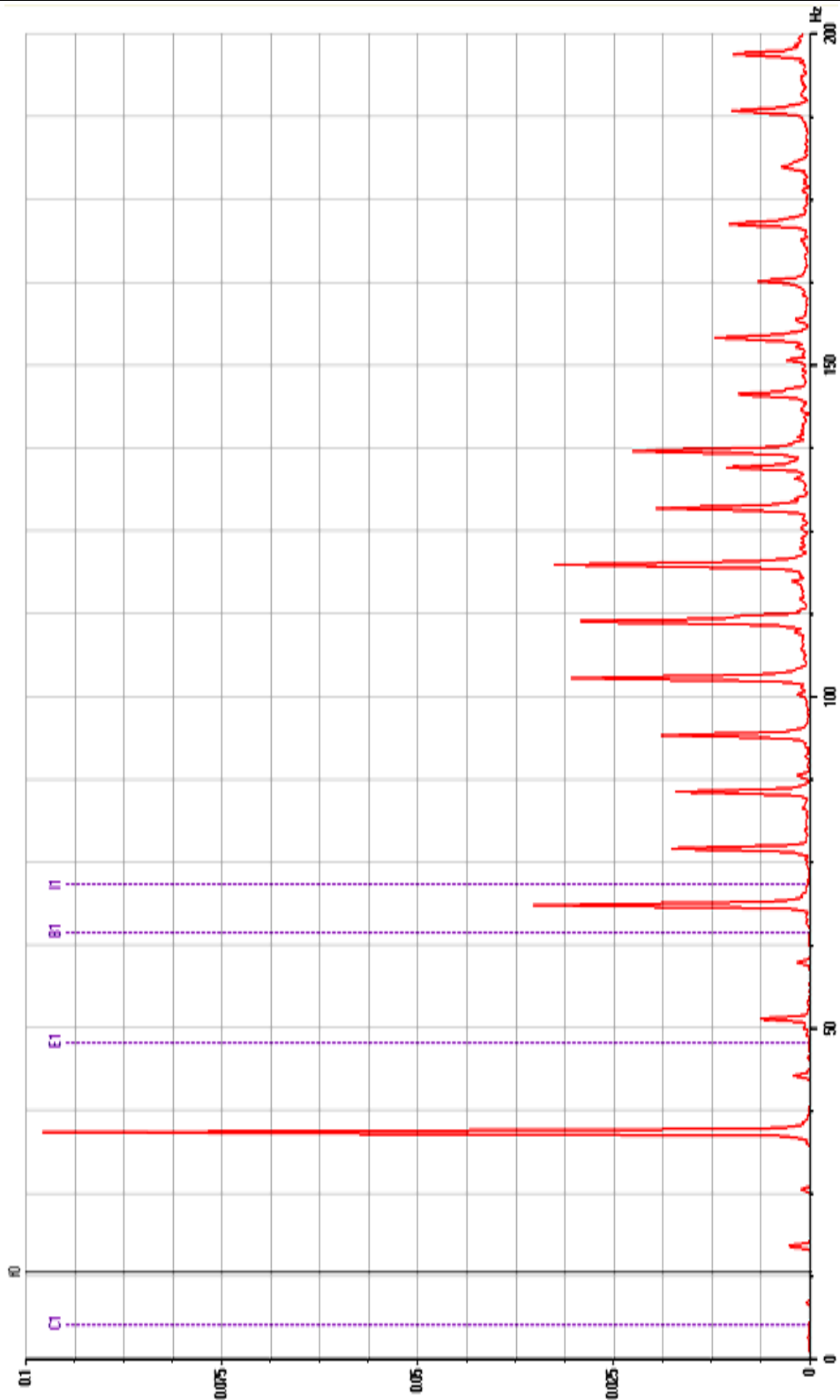
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
04/06/10	2	Ακτινικά	Στις 700 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 700 στροφές



Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
04/06/10	2	Ακτινικά	Στις 700 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 700 στροφές



Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
04/06/10	2	Αξονικά	Στις 700 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 700 στροφές



Πίνακας 59: Ανάλυση FFT με το OneproD MV-2C.

Στα διαγράμματα της ανάλυσης FFT παρατηρούμε ότι καμία κορυφή σε συμπίπτει με τις τυπικές συχνότητες βλαβών των ρουλεμάν αλλά ούτε και με την συχνότητα περιστροφής F0. Δηλαδή καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει κάποια φθορά στο ρουλεμάν.

1.1.3.ε. Zetor 6911.

Στο Zetor 6911 έγιναν μετρήσεις στις 4 Ιουνίου και στις 27 Ιουνίου 2010 στο ρουλεμάν του ΡΤΟ με όλα τα όργανα μετρήσεων που είχαμε στην διάθεση μας.



Κατά την διάρκεια των μετρήσεων ο κινητήρας βρισκόταν στις 1000 στροφές και είχε γίνει εμπλοκή του ΡΤΟ στις ίδιες στροφές.

Ο ελκυστήρας είχε δουλέψει περίπου 3500 ώρες.

Εικόνα 86: Κατά της διάρκεια των μετρήσεων στο TN65N.

• Bearing Checker.

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dB _i	dB _c	dB _m	Κωδικός αξιολόγησης
27/06/2010	2	Στις 1000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 1000 στροφές.	13	-8	16	1
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά					
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	dB _i	dB _c	dB _m	Κωδικός αξιολόγησης
27/06/2010	2	Στις 1000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 1000 στροφές.	13	-9	10	1

Πίνακας 60: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Bearing Checker.

Από τις τιμές μετρήσεων βλέπουμε ότι παίρνουμε πολύ χαμηλές τιμές dBc και φυσιολογικές τιμές dBm. Αυτό μας δίνει κωδικό αξιολόγησης 1, δηλαδή ότι δεν υπάρχει κάποια φθορά. Για την εξακρίβωση των συμπερασμάτων που βγαίνουν από τα αποτελέσματα προχωράμε στις τιμές overall.

- **Vibrotest 60 (Τιμές Overall).**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
27/06/2010	2	Στις 1000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 1000 στροφές.	1.682	0.043
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά			
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Ταχύτητα δόνησης (mm/s σε rms)	BCU
27/06/2010	2	Στις 1000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 1000 στροφές.	0.459	0.051

Πίνακας 61: Αποτελέσματα μετρήσεων για το Vibrotest 60.

Από τις overall τιμές μπορούμε να δούμε τις χαμηλές ταχύτητες δόνησης και την πολύ χαμηλή τιμή BCU.

- **OneproD MVP-2C (Τιμές Overall).**

Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
04/06/10	2	Στις 1000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 1000 στροφές	0.107	1.48	0.405

Πίνακας 62: Αποτελέσματα μετρήσεων για το OneproD MV-2C.

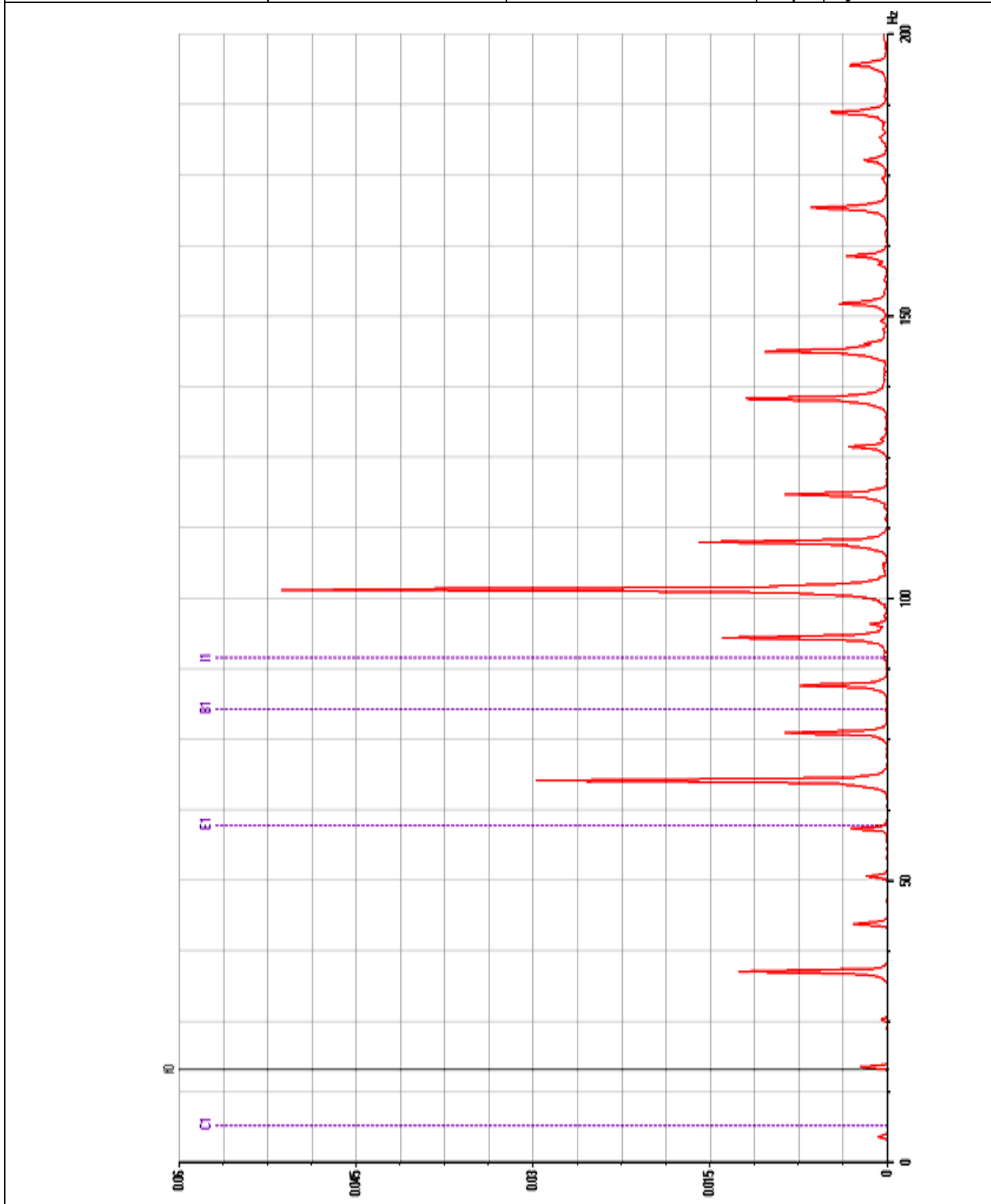
Τρόπος Μέτρησης	Ακτινικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
04/06/10	2	Στις 1000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 1000 στροφές	0.211	0.755	2.30
Τρόπος Μέτρησης	Αξονικά				
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα	Επιτάχυνση δόνησης (g)	Ταχύτητα δόνησης mm/s	Defect factor
04/06/10	2	Στις 1000 στροφές και εμπλοκή του PTO στις 1000 στροφές	0.121	1.27	2.09

Πίνακας 63: Αποτελέσματα μετρήσεων για το OneproD MV-2C.

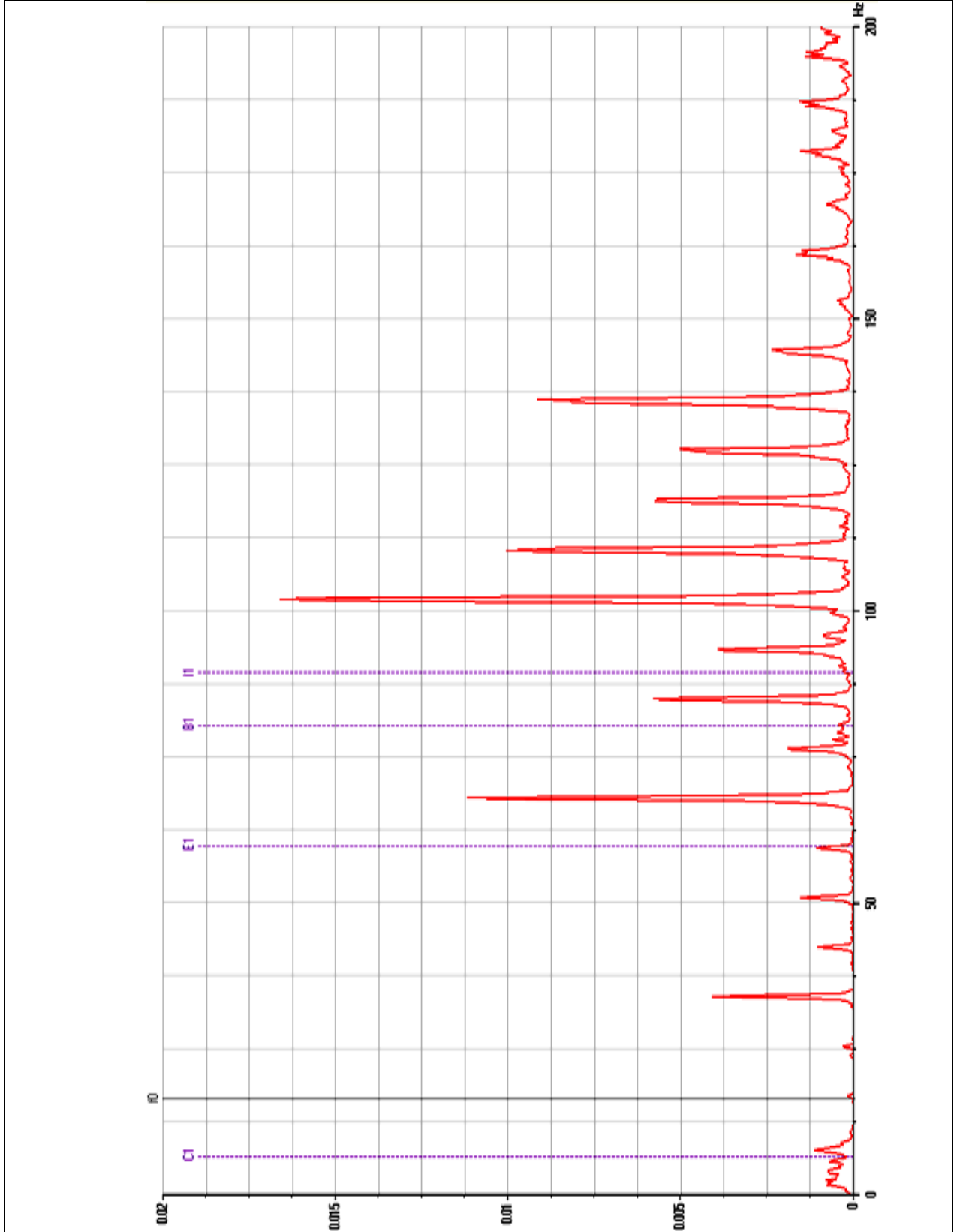
Παρατηρούμε πάλι πολύ χαμηλές τιμές δονήσεων και Defect factor, κάτι που μας φαίνεται περίεργο για έναν ελκυστήρα 30 ετών. Γι' αυτό προχωράμε και σε ανάλυση FFT.

• **OneproD MV-2C (Ανάλυση FFT).**

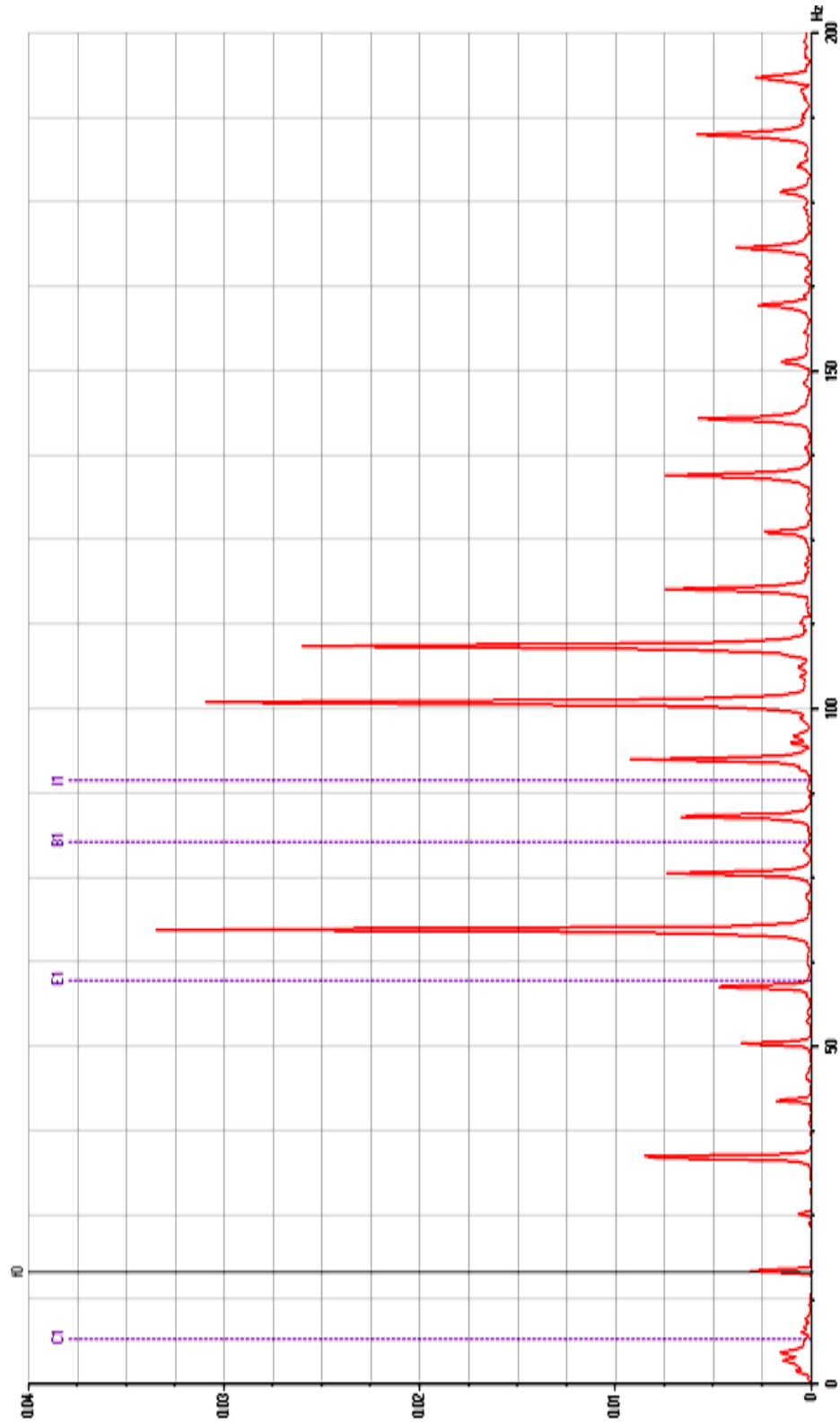
Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
04/06/10	2	Ακτινικά	Στις 1000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 1000 στροφές.



Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
04/06/10	2	Ακτινικά	Στις 1000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 1000 στροφές



Ημερομηνία Μέτρησης.	Ρουλεμάν Μέτρησης	Τρόπος Μέτρησης	Κατάσταση ελκυστήρα
04/06/10	2	Αξονικά	Στις 1000 στροφές και εμπλοκή του ΡΤΟ στις 1000 στροφές



Πίνακας 64: Ανάλυση FFT με το OneproD MV-2C.

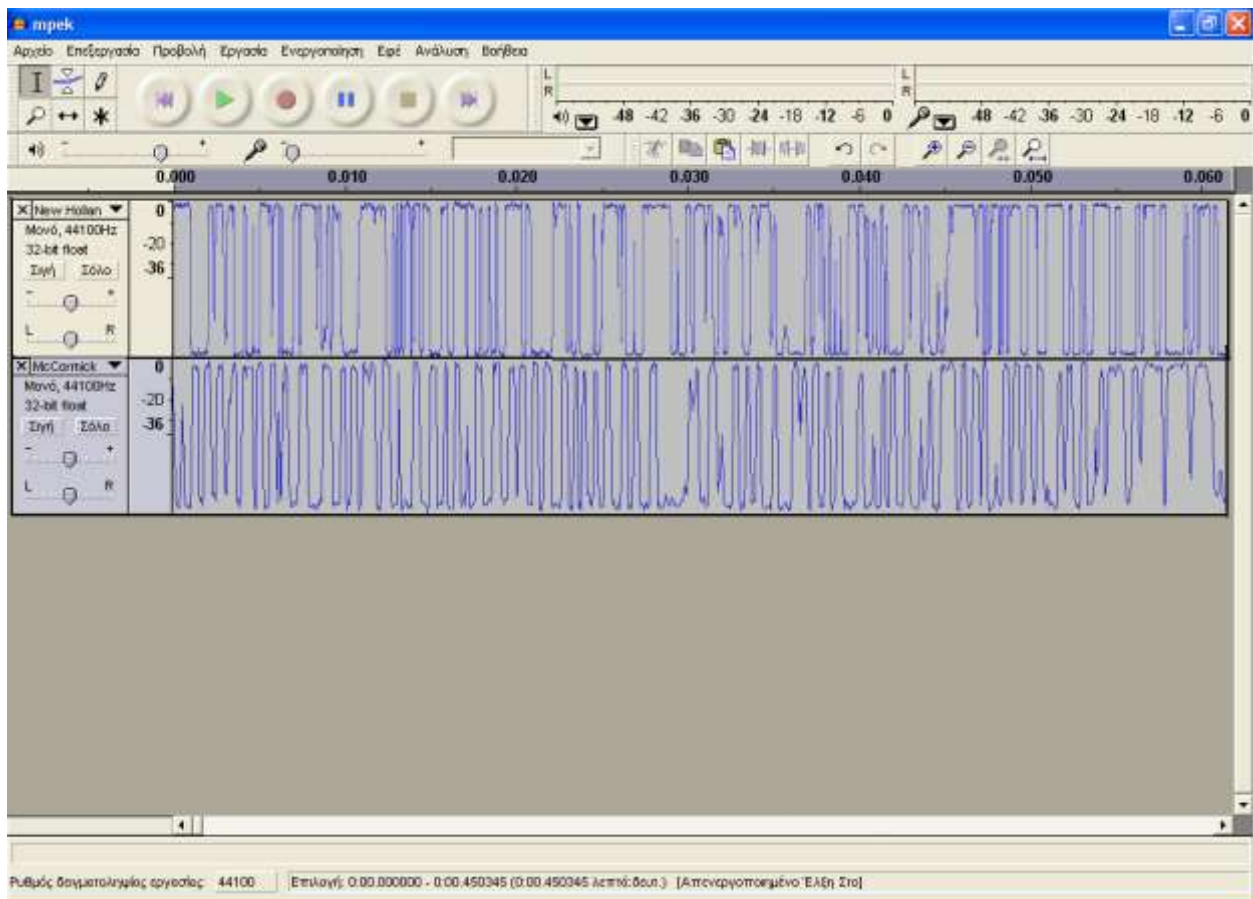
Τα διαγράμματα FFT μας δείχνουν ότι το ρουλεμάν δεν έχει ούτε πρόβλημα φθοράς ούτε και προβλήματα ευθυγράμμισης και ζυγοστάθμισης, αφού πάλι καμία κορυφή δεν συμπίπτει με τις τυπικές συχνότητες.

1.2 Καταγραφή του ήχου των ακροφύσιων εκτόξευσης πετρελαίου (μπέκ).

1.2.1 Καταγραφή ήχου σε καινούργιους γεωργικούς ελκυστήρες.

Αρχικά έγιναν μετρήσεις σε καινούργιους ελκυστήρες ώστε να καθοριστεί η κυματομορφή (db) που λαμβάνουμε από τα καινούργια μπεκ και έτσι να έχουμε ένα μέτρο σύγκρισης για τα μπεκ που ελέγχουμε.

Έγιναν μετρήσεις σε δύο νέους ελκυστήρες στο New Holland T4050 στις 15 Μαρτίου και στο McCormick GM50 στις 25 Φεβρουαρίου 2010.



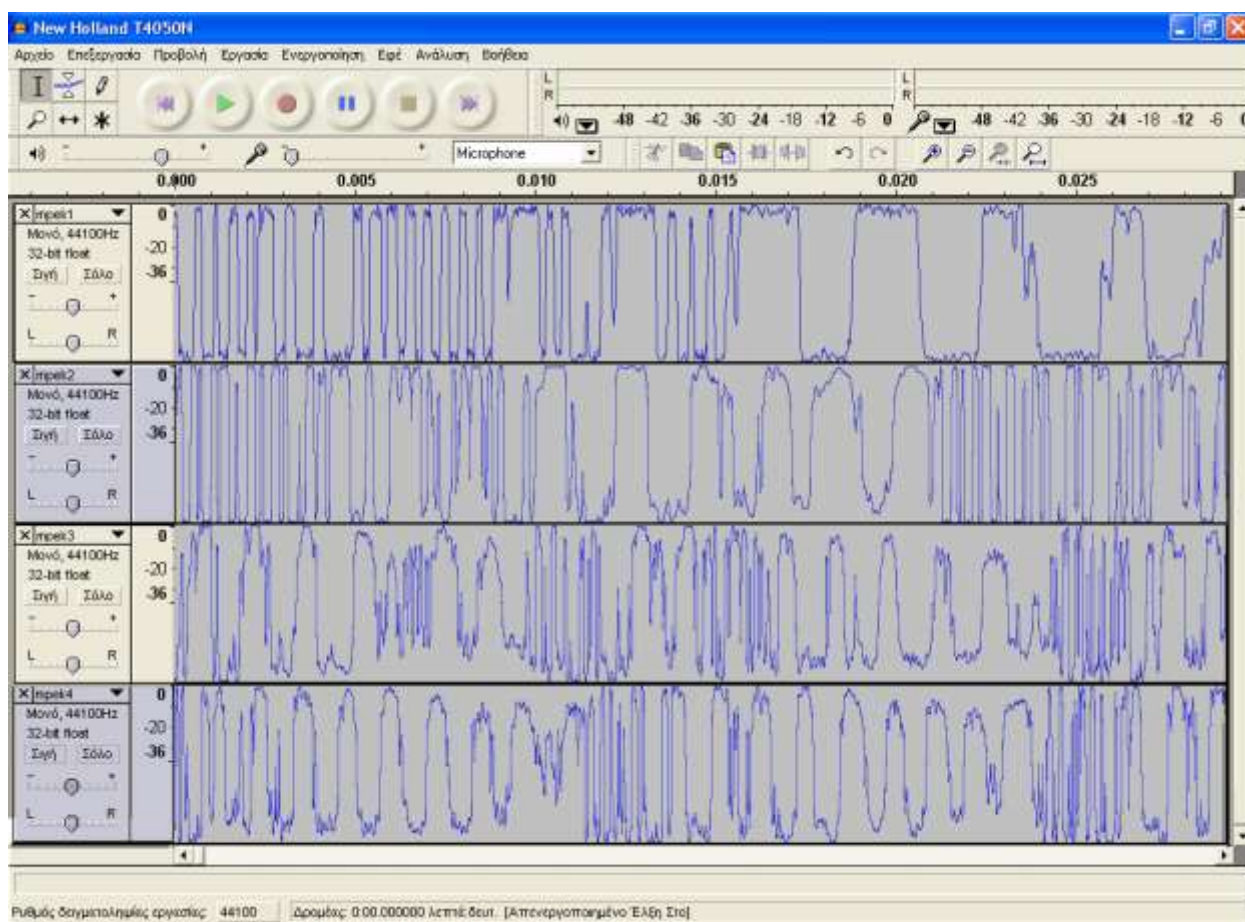
Εικόνα 87: Κυματομορφή (db) ενός από τα μπεκ του New Holland T4050 και του McCormick GM50 αντίστοιχα.

Παρατηρούμε ότι και στους δύο ελκυστήρες τα καινούργια μπεκ έχουν μία συγκεκριμένη κυματομορφή η οποία μπορεί να συγκριθεί με τις κυματομορφές των μεταχειρισμένων μπεκ ώστε να δούμε σε τι κατάσταση βρίσκονται.

1.2.2 Καταγραφή ήχου σε μεταχειρισμένους γεωργικούς ελκυστήρες.

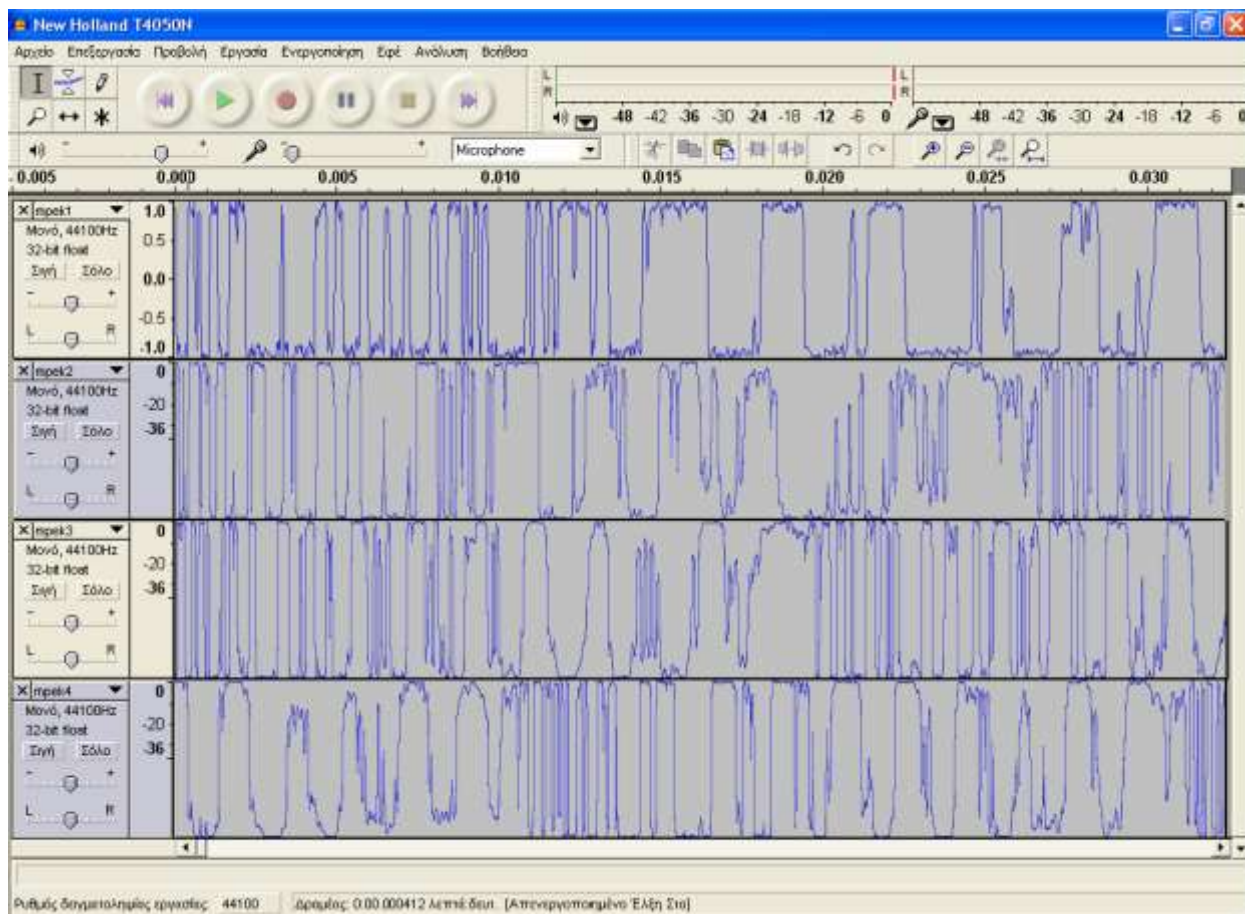
1.2.2.α New Holland T4050.

Οι παρακάτω κυματομορφές προέρχονται από μεταχειρισμένο ελκυστήρα New Holland T4050 που βρίσκεται στην περιοχή του Μαραθώνα. Σε αυτό τον ελκυστήρα έγιναν δύο φορές μετρήσεις στις 14 Μαΐου 2010 και στις 4 Ιουνίου 2010.



Εικόνα 88: Οι κυματομορφές (db) των τεσσάρων μπεκ του T4050 (14 Μαΐου 2010).

Από την ανάλυση των κυματομορφών που λάβαμε από τις μετρήσεις που έγιναν στις 14 Μαΐου βλέπουμε ότι τα δύο πρώτα μπεκ δεν έχουν κάποιο πρόβλημα. Αντίθετα, το τρίτο και τέταρτο μπεκ παρουσιάζουν μια μικρή αρρυθμία χωρίς όμως να φαίνεται κάτι σημαντικό.



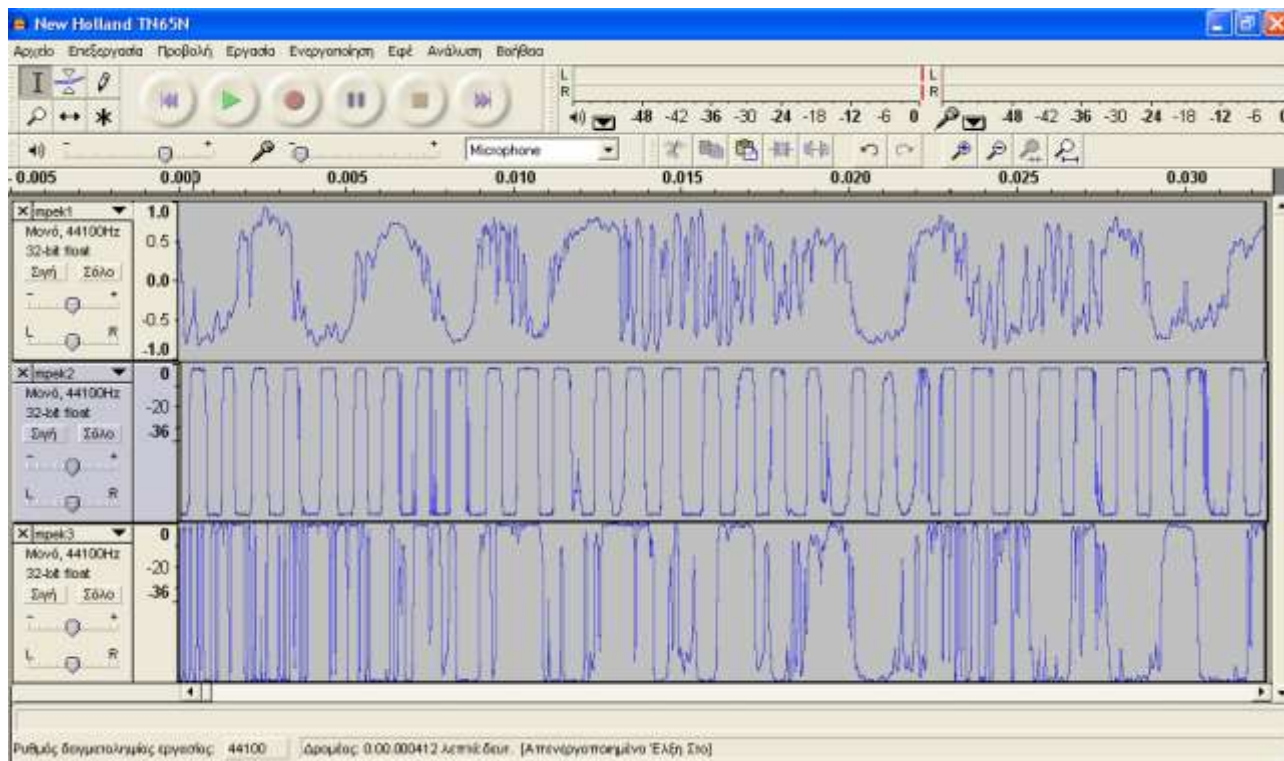
Εικόνα 89: Οι κυματομορφές (db) των τεσσάρων μπεκ του T4050 (4 Ιουνίου 2010).

Από την ανάλυση των κυματομορφών βλέπουμε ότι το πρώτο μπέκ παραμένει σε πολύ καλή κατάσταση, το δεύτερο μπέκ παραμένει στην ίδια καλή κατάσταση ενώ στο τρίτο και στο τέταρτο μπεκ βλέπουμε μία μικρή βελτίωση σε σχέση με τις προηγούμενες μετρήσεις. Αυτό σημαίνει ότι στις προηγούμενες μετρήσεις υπήρχε κάποιο παροδικό πρόβλημα το οποίο λύθηκε. Γενικά παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα με τα μπεκ του ελκυστήρα.

1.2.2.β New Holland TN65N.

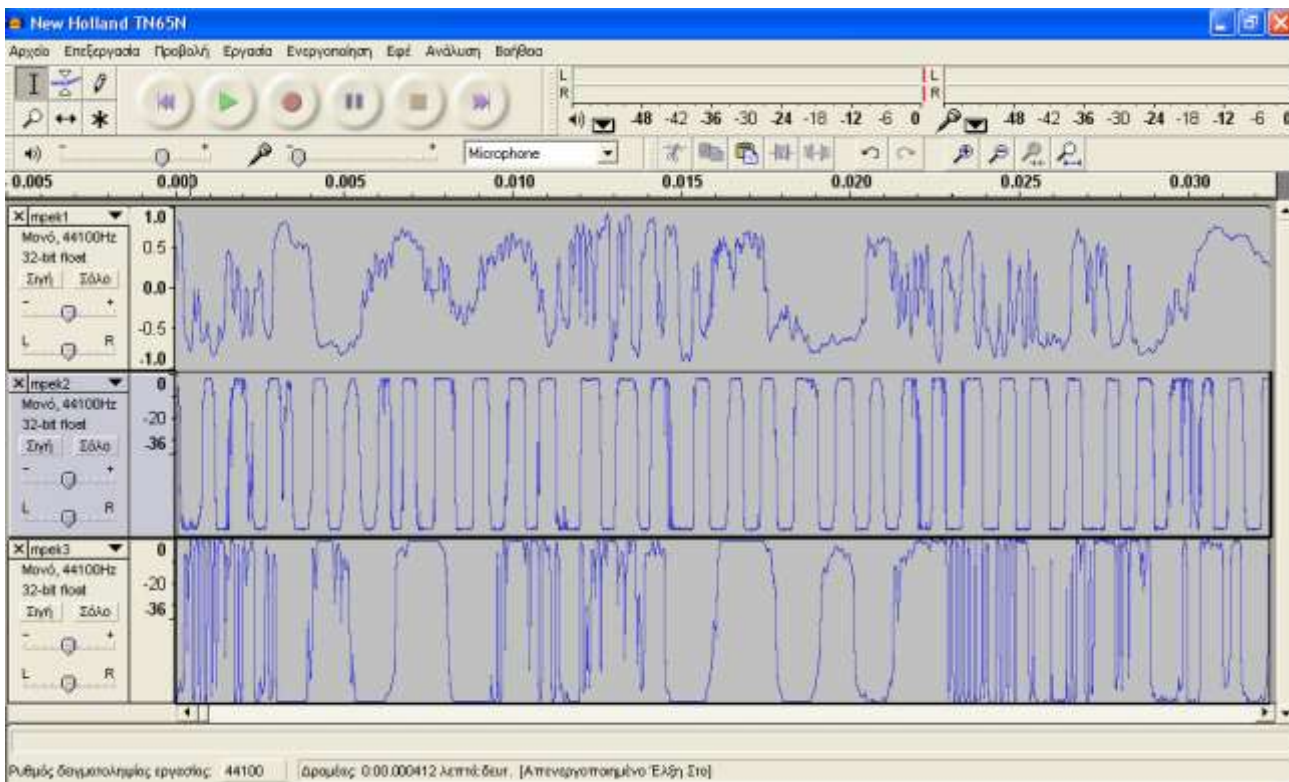
Στο New Holland TN65N έγιναν μετρήσεις στην περιοχή του Μαραθώνα στις 14 Μαΐου 2010 και στις 4 Ιουνίου 2010.

Το TN65N έχει τρεις κυλίνδρους για αυτό μετρήσαμε τρία μπεκ. Παρακάτω ακολουθούν οι κυματομορφές που λάβαμε.



Εικόνα 90: Οι κυματομορφές (db) των τριών μπεκ του TN65N (14 Μάιου 2010).

Από τις κυματομορφές βλέπουμε ότι το πρώτο μπέκ δεν είναι σε καλή κατάσταση και καλό θα ήταν επισκευαστεί. Το δεύτερο μπέκ είναι σαν καινούργιο αφού η κυματομορφή του είναι ίδια με των καινούργιων μπεκ. Το τρίτο μπέκ είναι σε αρκετά καλή κατάσταση σύμφωνα με τις κυματομορφές που λάβαμε.

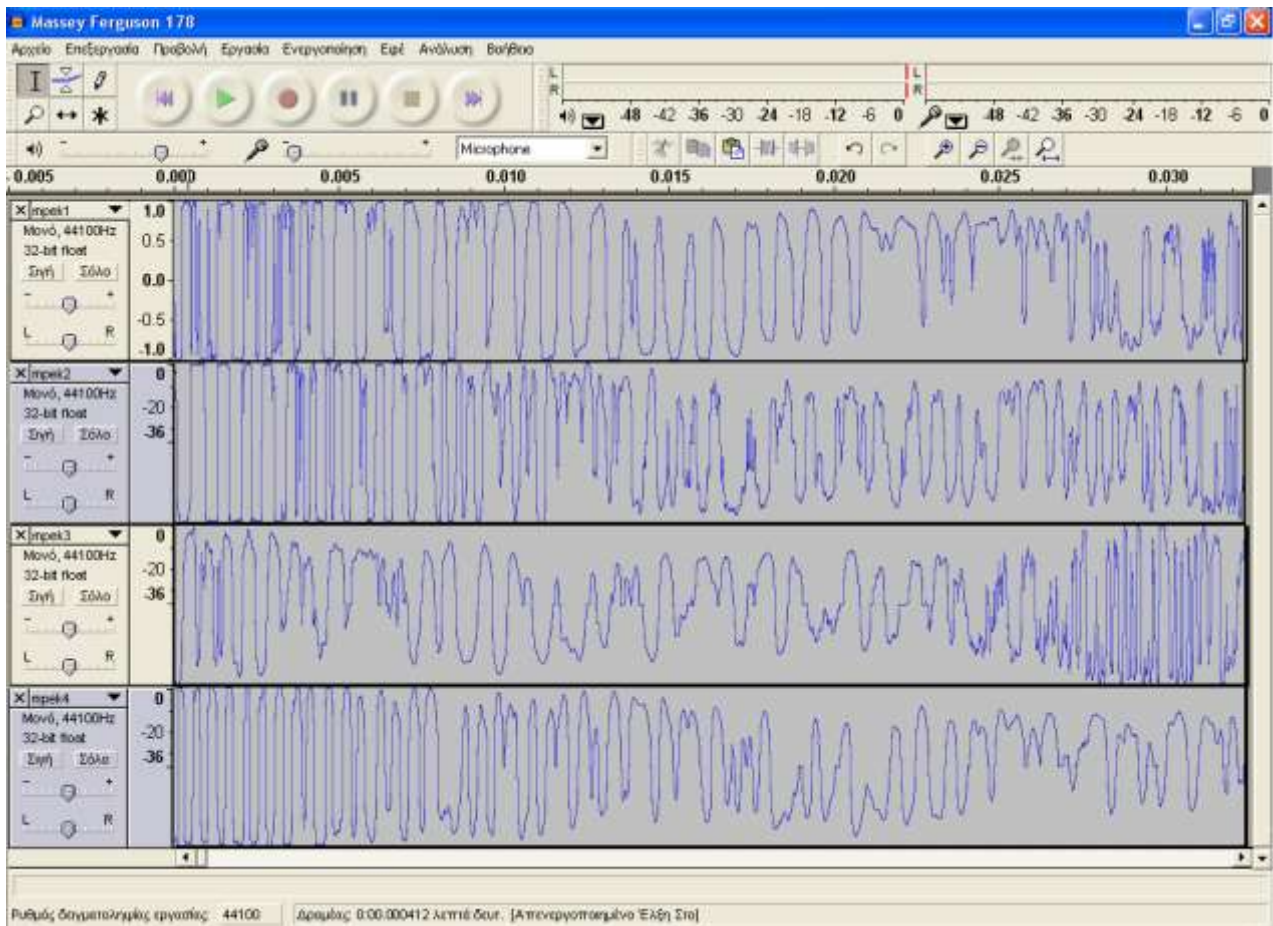


Εικόνα 91: Οι κυματομορφές (db) των τριών μπεκ του TN65N (4 Ιουνίου 2010).

Οι μετρήσεις που έγιναν στις 4 Ιουνίου μας επιβεβαίωσαν τα συμπεράσματα που είχαμε βγάλει από την αρχή. Δηλαδή ότι το πρώτο μπεκ έχει πρόβλημα, το δεύτερο είναι σε εξαιρετική κατάσταση και το τρίτο είναι σε καλή κατάσταση.

1.2.2.γ Massey Ferguson 178.

Στις 26 Ιουνίου στην περιοχή των Σπάτων έγινε έλεγχος στα μπεκ του Massey Ferguson 178. Παρακάτω ακολουθούν οι κυματομορφές των μπεκ.

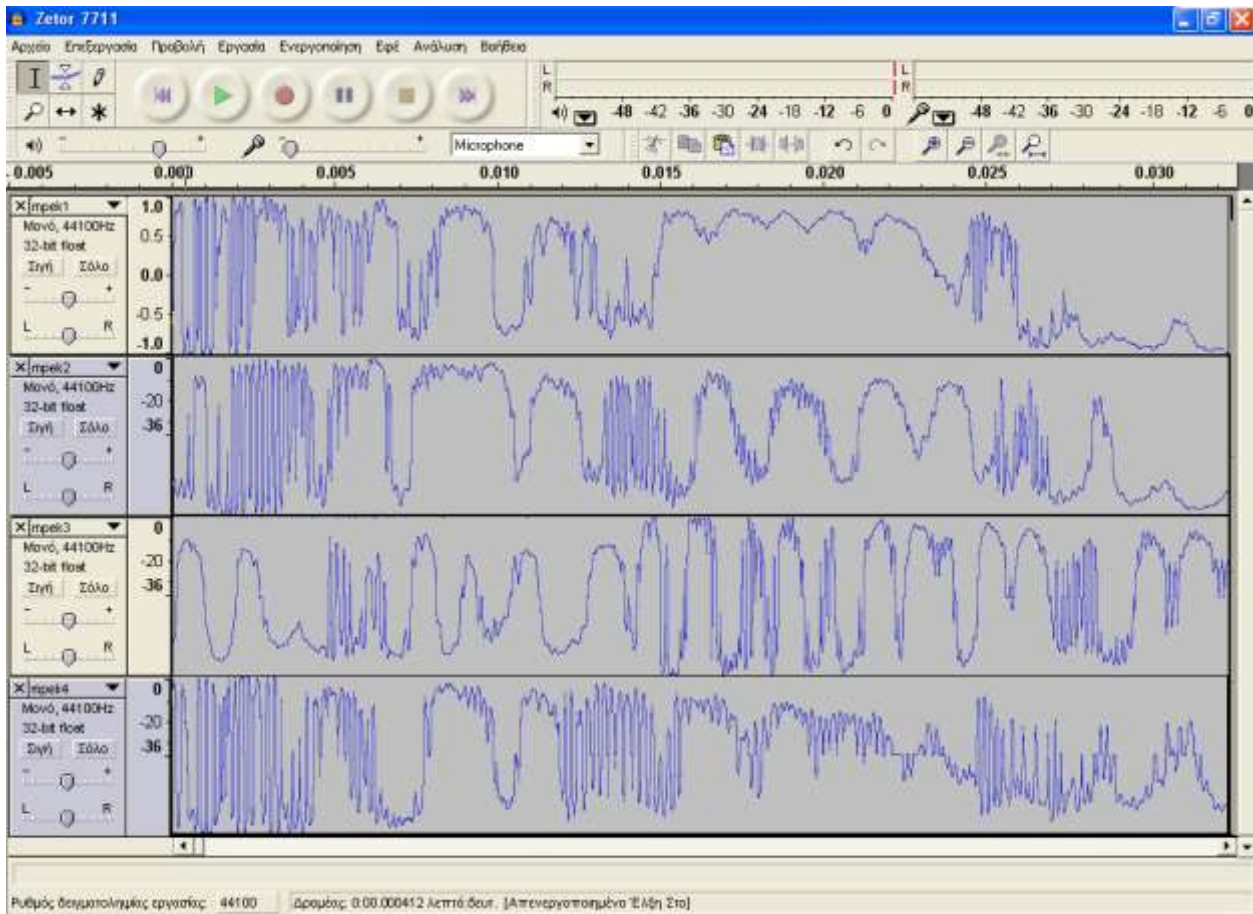


Εικόνα 92: Οι κυματομορφές (db) των τεσσάρων μπεκ του Massey Ferguson 178.

Από τις κυματομορφές βλέπουμε ότι όλα τα μπεκ έχουν μία μεταβολή σε σχέση με τα καινούργια, γεγονός το οποίο είναι φυσιολογικό αν αναλογιστούμε την παλαιότητα του ελκυστήρα. Το τρίτο μπεκ όμως ίσως είναι σε λίγο χειρότερη κατάσταση από τα υπόλοιπα.

1.2.2.8 Zetor 7711.

Στις 26 Ιουνίου 2010 πάλι στην περιοχή των Σπάτων έγινε έλεγχος στα μπέκ του Zetor 7711. Παρακάτω ακολουθούν οι κυματομορφές των μπεκ.

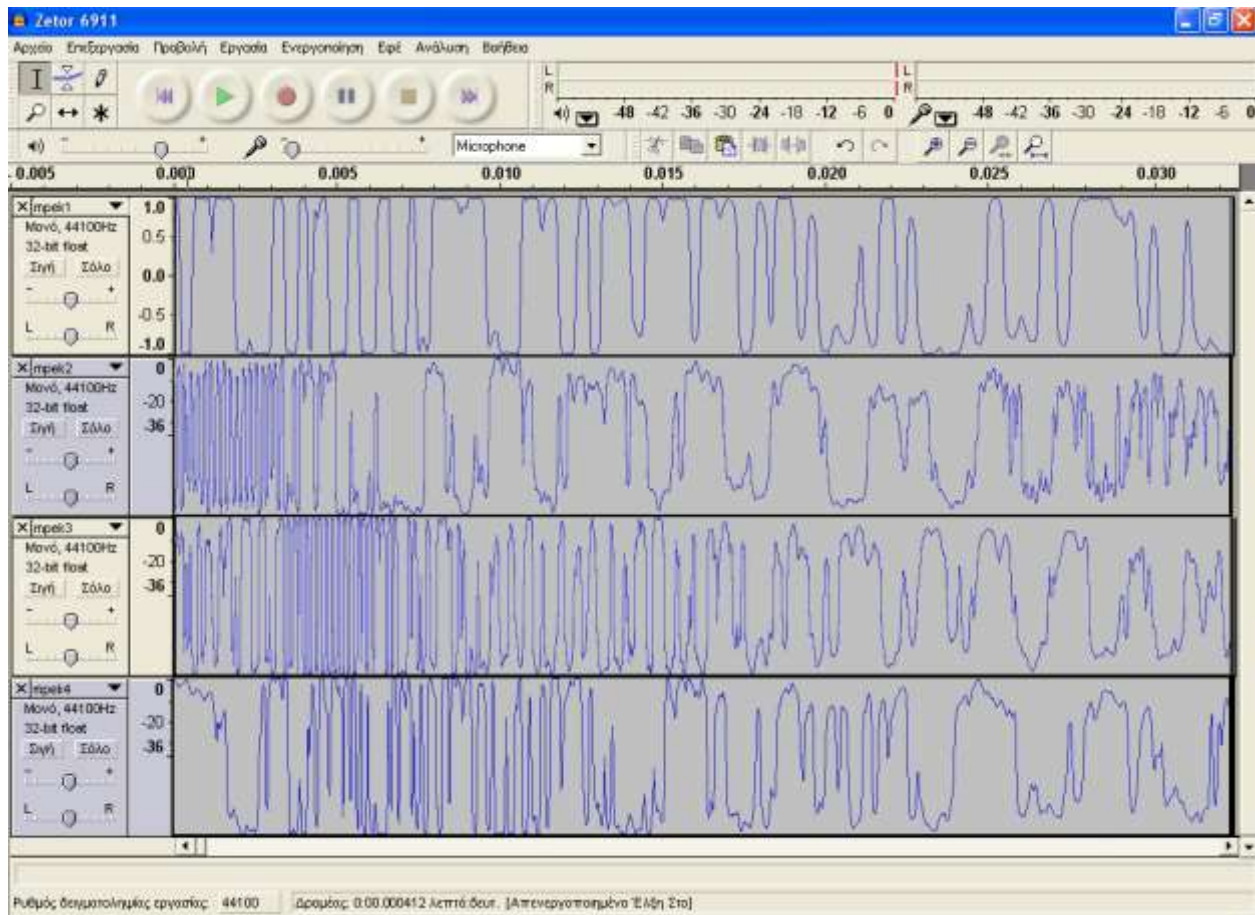


Εικόνα 93: Οι κυματομορφές (db) των τεσσάρων μπεκ του Zetor 7711.

Από τις κυματομορφές βλέπουμε ότι όλα τα μπεκ έχουν κάποιο πρόβλημα και καλό θα ήταν τα μπεκ να καθαριστούν ώστε να βελτιωθούν οι επιδόσεις του κινητήρα και να αυξηθεί η αξιοπιστία του.

1.2.2.ε. Zetor 6911.

Στα μπεκ του Zetor 6911 έγιναν μετρήσεις στην περιοχή των Σπάτων στις 26 Ιουνίου 2010 και πήραμε τις παρακάτω κυματομορφές.



Εικόνα 94: Οι κυματομορφές (db) των τεσσάρων μπεκ του Zetor 6911.

Από τις κυματομορφές βλέπουμε ότι τα μπεκ έχουν μια διαφορά από τα καινούργια αλλά αυτό δεν πρέπει να δημιουργεί ανησυχία αν σκεφτούμε την παλαιότητα του ελκυστήρα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας, όπως είχαμε αναφέρει και στην αρχή, ήταν η πρόγνωση και η διάγνωση βλαβών σε γεωργικούς ελκυστήρες με την χρήση διαφόρων τεχνολογιών. Έτσι, για τον έλεγχο των ρουλεμάν χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ανάλυσης των κρουστικών παλμών και η ανάλυση των δονήσεων σε overall τιμές και FFT διαγράμματα.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι οι μέθοδοι αυτοί αν και προέρχονται από την βιομηχανία θα μπορούσαν άνετα να χρησιμοποιηθούν και στην γεωργική μηχανολογία. Η εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών στην γεωργική μηχανολογία θα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των επιδόσεων των ελκυστήρων, την αύξηση της αξιοπιστίας τους, την αύξηση της διάρκειας ζωής τους αλλά και την μείωση του κόστους και του χρόνου συντήρησης.

Για παράδειγμα για τον έλεγχο του ρουλεμάν του PTO του McCormick GM50 απαιτούνται περίπου εννέα ώρες ώστε να βγάλουμε το ρουλεμάν να το ελέγξουμε και να το επανατοποθετήσουμε. Αντίθετα, με νέες τεχνολογίες που χρησιμοποιήσαμε ο χρόνος αυτός δεν ξεπερνάει τα 15 λεπτά.

Βέβαια, υπάρχουν κάποια προβλήματα προσαρμογής τα οποία είχαμε να αντιμετωπίσουμε και εμείς κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

Καταρχάς, με την μέθοδο ανάλυσης των κρουστικών παλμών υπήρχαν προβλήματα λόγω των δονήσεων που παράγονται από τον ίδιο τον ελκυστήρα και επηρεάζουν τους κρουστικούς παλμούς που παράγονται από ένα χαλασμένο ρουλεμάν. Αυτό μας εμπόδιζε να βγάλουμε σωστά συμπεράσματα για την κατάσταση των ρουλεμάν. Γι' αυτό προχωρήσαμε στην ανάλυση των δονήσεων που είναι διαφορετική τεχνολογία και έτσι καταφέραμε να βγάλουμε αξιόπιστα αποτελέσματα.

Κατά την ανάλυση δονήσεων, ένα σημαντικό πρόβλημα είναι η χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του άξονα του PTO, που είναι 540 ή 1000 στροφές. Αυτός ο αριθμός στροφών είναι ιδιαίτερα χαμηλός σε σχέση με τον αριθμό στροφών που συναντάμε στην βιομηχανία που χρησιμοποιούνται αυτά τα προγνωστικά συστήματα. Ο χαμηλός αυτός αριθμός στροφών είναι πρόβλημα γιατί μειώνονται οι δονήσεις και τα χτυπήματα που παράγονται από τα φθαρμένα ρουλεμάν με αποτέλεσμα να μην γίνονται αισθητά από τους αισθητήρες των οργάνων μετρήσεων. Βέβαια, το ίδιο πρόβλημα παρατηρείται και στην βιομηχανία όταν υπάρχουν χαμηλές ταχύτητες περιστροφής. Γι' αυτό το λόγο οι εταιρίες προσπαθούν να δημιουργήσουν νέες τεχνικές ώστε να μπορούν να μετράνε σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής.

Όπως έχει αναφερθεί, στην βιομηχανία υπάρχουν διεθνή στάνταρ τα οποία ορίζουν το πεδίο συχνοτήτων εντός του οποίου πρέπει να γίνουν οι μετρήσεις ανάλογα με το μέγεθος της μηχανής και τον τρόπο έδρασης της.

Αντίθετα στην γεωργική μηχανολογία δεν υπάρχουν τέτοια στάνταρ που να καθορίζουν τα όρια των συχνοτήτων που πρέπει να κινηθούμε αλλά ούτε και τις

τιμές των δονήσεων που περιμένουμε ανάλογα με την κατάσταση που βρίσκεται το ρουλεμάν. Έτσι στην overall ανάλυση των δονήσεων, φυσιολογικές τιμές δονήσεων θεωρήθηκαν αυτές που ήταν κοντά στις τιμές των καινούργιων ελκυστήρων. Παρ' όλα αυτά είδαμε ότι τα παλιά μοντέλα ελκυστήρων παρουσίαζαν χαμηλότερες ταχύτητες δονήσεων από τα καινούργια μοντέλα. Αυτό αρχικά φαίνεται παράξενο, αλλά δεν είναι και τόσο αν σκεφτεί κανείς ότι κάθε ελκυστήρας έχει ξεχωριστή στιβαρότητα στην κατασκευή του που επηρεάζει τις τιμές των δονήσεων.

Τις πιο αξιόπιστες και αναλυτικές μετρήσεις τις πήραμε από την ανάλυση FFT. Για παράδειγμα, από τα αποτελέσματα του New Holland TN65N εντοπίσαμε μικρή φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο χωρίς να κάνουμε καμία παρέμβαση στον ελκυστήρα. Επίσης, με συνεχή παρακολούθηση του ρουλεμάν για μεγάλο χρονικό διάστημα και μέσω των αναλύσεων FFT θα βρούμε ακριβώς πότε θα χρειαστεί αντικατάσταση. Όμως, το σημαντικότερο είναι ότι με την ανάλυση FFT εντοπίστηκε με μεγάλη ακρίβεια η φθορά που δεν είχε εντοπιστεί ούτε με την ανάλυση των κρουστικών παλμών ούτε με την ανάλυση δονήσεων με τιμές overall. Επίσης, υπήρχε και μία περίπτωση του Zetor 7711 όπου από τις τιμές overall ενώ έδειχναν υψηλές ταχύτητες δονήσεων, η ανάλυση FFT έδειξε ότι δεν υπήρχε κάποιο πρόβλημα στα ρουλεμάν.

Για αυτό καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα σε γεωργικούς ελκυστήρες θα πρέπει αρχικά να πάρουμε overall τιμές και μετά να προχωρήσουμε σε ανάλυση FFT. Επίσης συναντήσαμε την περίπτωση η ακτινική μέτρηση να δείχνει ότι υπάρχει φθορά στο ρουλεμάν ενώ η αξονική μέτρηση να δείχνει ότι δεν υπάρχει φθορά. Για αυτό πάντα πρέπει να γίνονται μετρήσεις τόσο ακτινικά όσο και αξονικά.

Από την ανάλυση των μπεκ βλέπουμε ότι ακόμα και σε πιο καινούργιους ελκυστήρες οι κυματομορφές που πήραμε δεν ήταν όπως έπρεπε να ήταν. Αυτό δείχνει την ευαισθησία που έχουν τα μπεκ και πόσο σημαντικός είναι ο έλεγχός τους. Από την ανάλυση των κυματομορφών εντοπίσαμε το Zetor 7711 του οποίου τα μπέκ δεν ήταν και σε πολύ καλή κατάσταση και καλό θα ήταν να καθαριστούν όπως επίσης και το ένα μπεκ από το New Holland TN65N που επίσης πρέπει να καθαριστεί.

Το συμπέρασμα που βγαίνει από αυτή την εργασία είναι ότι μπορούν και πρέπει να εφαρμοστούν νέες τεχνικές ελέγχου των γεωργικών ελκυστήρων ώστε να μειωθεί το κόστος συντήρησης και να αυξηθεί η αξιοπιστία τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bechara, Alexi. Σύγχρονα Όργανα και Τεχνικές Συντήρησης Μηχανών. Αθήνα, 2008
- Εγχειρίδιο Ρουλεμάν NSK. England : NSK
- Ζώγου, Ολυμπία / Δημητριάδης Λουκάς. Συστήματα Έγχυσης Κινητήρων Diesel Επιβατικών Αυτοκινήτων. Βόλος, 2008
- Καλαμποκά, Ευτυχία. Ολική Παραγωγική Συντήρηση σε Εργοστάσιο Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας. Αθήνα, 2007
- Κανδύλης, Εμμανουήλ. Μοντέρνα Τεχνολογία Συντήρησης Περιστεροφόμων Μηχανών. Αθήνα, 2008
- Κανδύλης, Εμμανουήλ. Προληπτική Συντήρηση Μηχανών - Τεχνολογία και Παραδείγματα Εφαρμογών. Αθήνα, 2007
- Κανδύλης, Εμμανουήλ. Προληπτικός Έλεγχος / Διάγνωση Βλαβών Μηχανών. Αθήνα
- Κανδύλης, Εμμανουήλ. Προληπτικός Έλεγχος - Προληπτική Διάγνωση Βλαβών Μηχανών - Πρόβλεψη Χρόνου Αντικατάστασης Εξαρτημάτων - Ζυγοσταθμίσεις. Αθήνα, 2004
- Καππάτος, Βασίλειος. Μη Καταστροφικός Έλεγχος Μεταλλικών Κατασκευών με Ψηφιακή Επεξεργασία Σημάτων Ακουστικής Εκπομπής. Πάτρα, 2007
- Κοντέλλης, Παύλος. Βιβλίο Οδηγιών Χειρισμού FIATAGRI L60/L65/L75/L85/L95. Αθήνα
- Κορωνάιος, Αμιίλιος / Σαργέντης, Φοίβος. Θερμογραφία. Αθήνα : Δημοσιεύσεις Εργαστηρίου Τεχνικών Υλικών - Τεύχος 2, 2003
- Λυγγοπούλου, Διονυσία. Ακουστική Παρακολούθηση και Ανάλυση Λειτουργίας Μηχανών σε Βιομηχανικές και Μη Εφαρμογές. Πάτρα, 2009
- Νάτσης, Αθανάσιος. Τεχνική Διάγνωση / Πρόγνωση Αστοχιών / Αξιοπιστία Μηχανικών Συστημάτων. Αθήνα, 2005
- Ξαγοράρης, Κωνσταντίνος. Ανάπτυξη και Εφαρμογή Προγραμμάτων σε Περιβάλλον MATLAB για Διάγνωση Βλαβών στη Συντήρηση Περιστεροφόμων Μηχανών μέσω Ανάλυσης Μετρήσεων Κραδασμών. Αθήνα, 2008
- Σιμωνίδης, Βαρθολομαίος. Διάγνωση Βλαβών και Προβλεπτική Συντήρηση στα Υδραυλικά Συστήματα. Αθήνα, 2007
- Σκαρλάτος, Δημήτρης. Εφαρμοσμένη Ακουστική. Αθήνα : Εκδόσεις "ΙΩΝ", 2001

- Τριάντης, Γιώργος. Ταυτοποίηση Βλαβών Οδοντωτών Τροχών. Αθήνα, 2008
 - Τσαρούχας, Παναγιώτης / Ναζλής, Δημήτρης / Λυμπερόπουλος, Γιώργος. Συντήρηση Μηχανολογικού Εξοπλισμού υπό το Πρίσμα της Αξιοπιστίας. Θεσσαλία
 - Τσατσαρέλης, Κωνσταντίνος. Γεωργικοί Ελκυστήρες. Θεσσαλονίκη : Εκδόσεις ΓΙΑΧΟΥΔΗ, 1997
 - Τσόλη, Ασημίνα. Μεθοδολογίες Συντήρησης Μηχανών και Σύγχρονες Τάσεις. Αθήνα, 2007
-
- <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%B1%CE%BB%CE%AC%CE%BD%CF%84%CF%89%CF%83%CE%B7>
 - <http://www.scribd.com/doc/23603439/8>
 - <http://www.dliengineering.com/vibman/Alan2-toc.htm>
 - <http://www.solusource.com/TomInfo/ui/default.aspx?callerid=24&Criteria=2&id=1812&key=Compact%20Air-Cooled%20Ozone%20Generators>.
 - <http://www.bksv.com/applications/noisesourceidentification.aspx>
 - <http://www.01db-metravib.com/predictive-maintenance.5/products.98/oneprod-xpr.114/?L=1>
 - <http://www.01db-metravib.com/predictive-maintenance.5/products.98/oneprod-mvp-2c.109/?L=1>
 - <http://www.dumelow.co.uk/MF100.html>
 - <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CF%80%CE%B5%CE%BA>
 - <http://sfrang.com/historia/selida609.htm#4>
 - http://www.bkvibro.com/Main/Products+%26+Services/Off-line+Instruments+%26+Software/xms+Software/xmsV4_Specification.pdf
 - <http://www.measurement.sk/2007/S3/Stein.pdf>
 - http://www.vibrotek.com/articles_bearings.php
 - <http://www.vibrotek.com/article.php?article=articles/brn97/index.htm>
 - <http://www.vibrotek.com/articles/newgen/index.htm>
 - <http://www.dliengineering.com/downloads/vibrationdiagnosticguide.pdf>
 - <http://people.msoe.edu/~kumpaty/courses/VibrationSeminar/K-Machine%20Vibration%20Diagnostic%20Summary.pdf>
 - <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780750662758>
 - http://dmargaris2.blogspot.com/2009/02/blog-post_06.html
 - <http://www.vrecosis.gr/datafiles/files/Bibliothiki/NDT.pdf>
 - <http://www.traininmain.eu/dat/325C13B7/%5Be1%5Dfile.pdf?633950021346250000>
 - <http://uesystems.com/news/listen-mro2.pdf>
 - www.arnos.groktioniadownload.phpfile=5943.pdf

- http://www.emt.unilinz.ac.at/education/Inhalte/se_moderne_methoden/WS0304/Gessl-Cepstrum.pdf
- <http://www.sumobrain.com/patents/wipo/Accelerometer-shear-type/WO1994009373A1.pdf>
- <http://www.everythingattachments.com/New-Holland-TN65-Attachments-specs-s/3873.htm>
- <http://www.tractordata.com/farm-tractors/003/1/0/3105-new-holland-tn65.html>
- <http://www.metadosi-ischios.gr/article.php?ID=84>
- <http://www.metadosi-ischios.gr/article.php?ID=95>
- http://www.actionbearing.com/technical_toolbox.html
- http://www.pall.com/Aerospace_18167.asp
- <http://www.gordonengland.co.uk/wear.htm>
- <http://www.aludra.nl/Eng/Coatings/Weerstand%20tegen%20slijtage/Adhesive/Adhesive.htm>
- <http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/177>
- <http://www.sensorland.com/HowPage003.html>
- http://www.stanford.edu/class/me220/data/lectures/lect10/lect_6.html
- <http://www.bkvibro.com/Main/Products+%26+Services/Offline+Instruments+%26+Software/Vibrotest+60>
- http://www.condellispaul.gr/pictures/Prod239-T4000_Spec.pdf
- http://www.mccormick.gr/products_mcc_gm_tech.htm
- <http://audacity.sourceforge.net/>