

**Ε.Μ.Πολυτεχνείο**  
**Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας**

**Μελέτη και κατασκευή μετρητικής διάταξης μηχανικών ταλαντώσεων μηχανολογικών κατασκευών με κινητά μέρη. Συνακόλουθη πειραματική διερεύνηση των σχετικών φαινομένων.**

---

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΦΩΤΕΙΝΟΠΟΥΛΟΥ**

Σπουδαστή του Διαπανεπιστημιακού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών  
‘‘Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη’’

Επίβλεψη: Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ Ε.Π Χίνης

Συνεργασία: Α.Α Νικόγλου, Δρ. Μηχ.Μηχ ΕΜΠ

**ΑΘΗΝΑ 2014**

1.	Εισαγωγή .....	4
2.	Θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου .....	6
2.1	Γενικά περί κραδασμών .....	6
2.2	Στροφικοί κραδασμοί.....	7
2.3	Ημιτονοειδείς ταλαντώσεις .....	9
2.4	Στροφικές ταλαντώσεις.....	11
2.5	Κριτήρια δριμύτητας ταλαντώσεων .....	13
2.6	Πηγές κραδασμών.....	15
2.6.1	Αζυγοσταθμία .....	15
2.6.2	Κακή ευθυγράμμιση .....	18
2.6.3	Κραδασμοί από ένσφαιρούς τριβείς (roulements/ρουλεμάν) .....	20
2.7	Προτάσεις ελάττωσης κραδασμών σε μηχανολογικές κατασκευές .....	21
2.8	Συσκευή απόσβεσης κραδασμών .....	23
3.	Πειραματική διάταξη.....	25
3.1	Αναλογοψηφιακός μετατροπέας (ADC) .....	27
3.2	Επαγωγικός μεταλλάκτης.....	29
3.2.1	Αρχή λειτουργίας .....	30
3.2.2	Ο επαγωγικός αισθητήρας NBN 8-18GM50-E2.....	32
3.3	Ελεγκτής/μετατροπέας συχνότητας WEM/Ex-FSU.....	33
3.4	Ψηφιακό ενδεικτικό όργανο .....	38
3.5	Βαθμονόμηση του μεταλλάκτη NBN 8-18GM50-E2 .....	40
3.5.1	Διαδικασία βαθμονόμησης .....	42
3.5.2	Επεξεργασία μετρήσεων .....	44
3.5.3	Βαθμονόμηση του μεταλλάκτη με στροφόμετρο .....	49
3.6	Μεταλλάκτης μετατοπίσεως – επιταχυνσιόμετρο. ....	51
3.6.1	Αρχή λειτουργίας – γενικά στοιχεία .....	52
3.6.2	Ο μεταλλάκτης BS 10.022 .....	53
3.6.3	Διασύνδεση μεταλλάκτη .....	54
3.6.4	Βαθμονόμηση του επιταχυνσιόμετρου.....	56
3.7	Διάταξη μηχανικών ταλαντώσεων.....	68
3.8	Γλώσσα προγραμματισμού LabView. ....	69

3.8.1	Υπορουτίνες - Virtual Instruments.....	70
3.9	Η εφαρμογή vibrations.vi.....	73
4.	Πειραματική διαδικασία. ....	79
4.1	Πειραματικά αποτελέσματα .....	79
4.2	Ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων .....	87
4.2.1	Σύγκριση μετρούμενων τιμών ταχύτητας με τα κριτήρια δριμύτητας ταλάντωσης, ISO 2372, VDI 2056, BS 4675 .....	88
5.	Συμπεράσματα .....	90
6.	Βιβλιογραφία.....	91

## 1. Εισαγωγή

Αντικειμενικός σκοπός της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας<sup>1</sup> είναι η συγκρότηση πειραματικής μετρητικής διάταξης για τη μελέτη των μηχανικών ταλαντώσεων κατασκευών – διατάξεων με κινητά μέρη, όπως ηλεκτροκινητήρες, μηχανές εσωτερικής καύσης, αντλίες, συμπιεστές κ.α. Μετά την ολοκλήρωση της μετρητικής διάταξης γίνεται πειραματική εφαρμογή για την περίπτωση μονοφασικού ηλεκτροκινητήρα, με έκκεντρη φόρτιση στο ρότορά του.

Η μετρητική διάταξη είναι κατασκευασμένη εξ'ολοκλήρου στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π<sup>2</sup> και συγκροτείται από ένα επιταχυνσιόμετρο (§3.6) και έναν μαγνητικό επαγωγικό μετρητή στροφών (§3.2), απευθείας συνδεδεμένων σε Η/Υ, ενώ ως ελεγχόμενη διάταξη θα χρησιμοποιηθεί ηλεκτροκινητήρας με ρύθμιση στροφών μέσω της τάσης τροφοδοσίας. Για την εκμετάλλευση του ηλεκτρικού σήματος των μεταλλακτών αναπτύχθηκε κατάλληλη εφαρμογή, με χρήση του εμπορικού πακέτου λογισμικού LabVIEW (§3.8). Ο κώδικας που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας ΔΕ πραγματοποιεί καταγραφή και επεξεργασία των σημάτων των μεταλλακτών, εμφανίζει τα αποτελέσματα στην οθόνη του Η/Υ ενώ επιτρέπει και την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων σε ηλεκτρονικό αρχείο.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της μετρητικής διάταξης πραγματοποιήθηκε επιβεβαίωση της βαθμονόμησης του επαγωγικού μεταλλάκτη στροφών, αλλά και του επιταχυνσιόμετρου με χρήση κατάλληλων διατάξεων, οι οποίες κατασκευάστηκαν εξ' ολοκλήρου στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ. Η διαδικασία ελέγχου των βαθμονομήσεων και τα αποτελέσματα αυτών περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3. Κατά την πειραματική εφαρμογή πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο του ρυθμού περιστροφής ηλεκτροκινητήρα με έκκεντρη φόρτιση και της μεταβολής της επιτάχυνσης των μηχανικών ταλαντώσεων - κραδασμών του σε διεύθυνση κάθετη ως προς τη βάση στήριξής του. Από τις ενδείξεις της μεταβολής της επιτάχυνσης του κινητήρα μέσω ανάλυσης Fourier εκτιμάται το φάσμα συχνοτήτων των κραδασμών και η κυρίαρχη συχνότητα του φαινομένου. Επιπλέον ολοκληρώνοντας ως προς το χρόνο τη μεταβολή της επιτάχυνσης εκτιμάται η μεταβολή της ταχύτητας των ταλαντώσεων, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της.

Αναλυτικότερα στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου των μηχανικών ταλαντώσεων μηχανολογικών κατασκευών με κινητά μέρη, αναφέρονται οι συνηθέστερες αιτίες δημιουργίας κραδασμών, τα όρια

---

<sup>1</sup> Εφεξής θα αναφέρεται με τα αρχικά ΔΕ

<sup>2</sup> Εφεξής θα αναφέρεται με τα αρχικά ΕΠΤ-ΕΜΠ

αυτών, όπως και μία πρόταση εξάλειψής των. Επίσης αναφέρονται οι γενικές σχέσεις που διέπουν τα φαινόμενα των απλών αρμονικών ταλαντώσεων. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η πειραματική διάταξη, οι μεταλλάκτες επιτάχυνσης και συχνότητας που χρησιμοποιούνται, όπως και η βαθμονόμησή τους. Ακόμα εξετάζεται και ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας, η ακριβής του συνδεσμολογία, οι μετρητικές διατάξεις που καταλήγουν σε αυτόν και η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε. Το τέταρτο κεφάλαιο πραγματεύεται την συλλογή και καταγραφή των παρατηρούμενων αποτελεσμάτων κατά την πειραματική διαδικασία, και τέλος τα συμπεράσματα, οι επισημάνσεις και οι τυχόν ελλείψεις ή βελτιώσεις συγκεντρώνονται στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο.

## 2. Θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου

### 2.1 Γενικά περί κραδασμών

Ο όρος *κραδασμοί* σε μία μηχανολογική κατασκευή χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ταλάντωση τμήματος ή ολόκληρης της κατασκευής και χαρακτηρίζεται από δύο βασικά μεγέθη τη συχνότητα (ή τις συχνότητες) και το πλάτος της ταλάντωσης.

Τα δεδομένα τα οποία συλλέγονται κατά την παρατήρηση φυσικών φαινομένων και κατ' επέκταση και των κραδασμών μπορούν να διακριθούν σε ντετερμινιστικά και τυχαία. Ως ντετερμινιστικά δεδομένα ορίζονται εκείνα τα οποία μπορούν να περιγραφούν από μία μαθηματική εξίσωση και ως τυχαία εκείνα τα οποία περιγράφονται από στοχαστικά πιθανοσύνολα – χρονοδείγματα με τη βοήθεια της στατιστικής επιστήμης. Συχνά μπορεί να υπάρξει σύγχυση μεταξύ των δύο κατηγοριών κυρίως σε θεωρητική βάση αλλά στην πράξη η απόφαση για το αν τα δεδομένα που περιγράφουν ένα φυσικό φαινόμενο είναι ντετερμινιστικά ή τυχαία βασίζεται στη δυνατότητα να αναπαραχθούν τα δεδομένα αυτά με ένα ελεγχόμενο πείραμα. Δηλαδή εάν ένα πείραμα που παράγει δεδομένα μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές δίνοντας τα ίδια αποτελέσματα εντός των ορίων των πειραματικών σφαλμάτων τότε τα δεδομένα θεωρούνται ντετερμινιστικά. Εάν αυτό δεν είναι δυνατό τότε τα δεδομένα χαρακτηρίζονται ως *τυχαία*.

Τα ντετερμινιστικά δεδομένα, με τα οποία θα ασχοληθούμε στην παρούσα ΔΕ, χαρακτηρίζονται ως *περιοδικά* και *μη περιοδικά*. Τα περιοδικά φαινόμενα κατηγοριοποιούνται περαιτέρω σε *ημιτονοειδή* και σε *σύνθετα περιοδικά*.

Η ταλάντωση στην απλούστερη μορφή, πχ ένα περιστρεφόμενο έκκεντρο ή μία περιοδικά εφαρμοζόμενη δύναμη, μπορεί να θεωρηθεί ως ημιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου με σταθερή συχνότητα. Η συχνότητα της ταλάντωσης εκφράζεται ως το πλήθος των «κύκλων» στη μονάδα του χρόνου και η έντασή της εκφράζεται από το μέτρο του μέγιστου πλάτους της ημιτονοειδούς συνάρτησης. Σε αυτή την περίπτωση η συνάρτηση θεωρείται περιοδική. Στην πράξη οι μηχανικές ταλαντώσεις σπάνια εμφανίζουν μία σταθερή συχνότητα και ένα σταθερό πλάτος. Συνήθως αποτελούνται από σύνθεση πολλών ημιτονοειδών συναρτήσεων με διαφορετικές συχνότητες και πλάτη. Σε περίπτωση όπου ο μέγιστος κοινός διαιρέτης των συνιστωσών συχνοτήτων είναι ακέραιος αριθμός η ταλάντωση θεωρείται *σύνθετη περιοδική (complex periodic)*. Τα *σύνθετα περιοδικά* φαινόμενα εμφανίζονται συχνότατα σε αντίθεση με τα ημιτονοειδή, τα οποία τις περισσότερες φορές ουσιαστικά αποτελούν προσεγγίσεις φαινομένων τα οποία στην πραγματικότητα είναι σύνθετα περιοδικά. Για παράδειγμα το σήμα εξόδου μιας γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος ενδέχεται να περικλείει σε μικρό ποσοστό

αρμονικές υψηλότερων συχνοτήτων όμως πρακτικά προσεγγίζεται μέσω μιας ημιτονοειδούς συνάρτησης και το φαινόμενο θεωρείται περιοδικό. Σε αντίθετη περίπτωση περιοδικά φαινόμενα ενδέχεται να εμφανίζουν έντονες αρμονικές συνιστώσες οι οποίες δεν μπορούν να αμεληθούν, όπως για παράδειγμα οι κραδασμοί από μία πολύ-κύλινδη παλινδρομική μηχανή, παράγοντας *σύνθετα περιοδικά* δεδομένα.

Σύνθεση δύο ή περισσότερων ημιτονοειδών ταλαντώσεων με ανάλογες συχνότητες θα παράγει σύνθετη περιοδική ταλάντωση. Αντίθετα σύνθεση δύο ή περισσότερων ημιτονοειδών ταλαντώσεων με τυχαίες συχνότητες παράγει μη περιοδική ταλάντωση.

Τα ντετερμινιστικά δεδομένα τα οποία χαρακτηρίζονται ως *μη περιοδικά* κατηγοριοποιούνται περαιτέρω σε *σχεδόν περιοδικά* και σε *μεταβατικά*.

Ως *σχεδόν περιοδικά* χαρακτηρίζονται τα δεδομένα ταλαντώσεων τα οποία προέρχονται από σύνθεση ημιτονοειδών ταλαντώσεων των οποίων οι λόγοι των συχνοτήτων είναι ρητοί αριθμοί. Τυπικό παράδειγμα *σχεδόν περιοδικού* φαινομένου χαρακτηρίζονται οι κραδασμοί σε ένα πολύ-κινητήριο ελικοφόρο αεροσκάφος σε περίπτωση όπου οι κινητήρες λειτουργούν ασύγχρονα. Σε κάθε άλλη περίπτωση τα δεδομένα χαρακτηρίζονται ως μεταβατικά.

## 2.2 Στροφικοί κραδασμοί

Οι στροφικοί κραδασμοί που προκαλούνται κατά τη λειτουργία μηχανολογικών κατασκευών με κινητά μέρη αποτελούν μηχανικές ταλαντώσεις, προκαλώντας συστροφή στον άξονά τους. Οι ταλαντώσεις αυτές ανιχνεύονται, μετρώνται και υπολογίζονται δύσκολα, ειδικά χωρίς τον κατάλληλο μετρητικό εξοπλισμό, ενώ το πλάτος τους μπορεί να αποβεί καταστροφικό. Για παράδειγμα σε ένα μειωτήρα στροφών, κατά την μεταβολή της ταχύτητας της μεταδιδόμενης ισχύος, προκαλούνται κραδασμοί, οι οποίοι μεταφέρονται στο πλαίσιο του μηχανισμού. Αναλυτικότερα, οι περιστροφικοί μηχανισμοί όπως για παράδειγμα οι στρόφαλοι σε μηχανές, συμπιεστές κ.α., μετατρέπουν τους κραδασμούς σε ακτινικές δυνάμεις, οι οποίες παρόλο που είναι αντιληπτές από τον άνθρωπο δεν μπορούν να μετρηθούν χωρίς ειδικό μετρητικό εξοπλισμό. Ο δυναμικός έλεγχος που απαιτείται για την μέτρηση των ηλεκτρομηχανολογικών μεγεθών θα πρέπει να έχει μη παρεμβατικό χαρακτήρα και να μην προκαλεί διακοπή λειτουργίας του μηχανισμού και να παρέχει την απαραίτητη μέτρηση και διάγνωση της αρχικής αιτίας. Επιπρόσθετα η αξιόπιστη ερμηνεία του φάσματος των αποτελεσμάτων είναι ιδιαίτερα δύσκολη λόγω παρεμβολών "θορύβου" στις μετρούμενες κυματομορφές δεδομένων.

Οι μηχανικές τάσεις που παράγονται από τους στροφικούς κραδασμούς, επηρεάζουν την ακεραιότητα και τον χρόνο ζωής των επιμέρους εξαρτημάτων αλλά και της μηχανολογικής κατασκευής εξ' ολοκλήρου. Οι τάσεις αυτές, οι οποίες μπορεί να είναι και αντίστροφες της κίνησης, οδηγούν σε μηχανική καταπόνηση. Επιπρόσθετα, οι αντίστροφες τάσεις προκαλούν περισσότερη φθορά από τις σταθερά ομόρροπες, προκαλώντας διαξονική εντατική κατάσταση στην κατασκευή με συνέπεια να αναπτύσσονται τόσο εφελκυστικές, όσο και θλιπτικές αξονικές δυνάμεις.

Κάθε μηχανολογική κατασκευή (βιομηχανική, ενεργειακή, αεροπορική, μέσων επίγειας μεταφοράς, κλπ) αποτελούμενη είτε από παραδοσιακά υλικά όπως χάλυβας, κράματα μετάλλων κ.α. είτε προηγμένα σύνθετα υλικά όπως πολυμερή, κεραμικά κ.α. παρουσιάζει διαφόρους τύπους βλαβών λόγω ποικίλων παραγόντων. Συχνά οι βλάβες παραμένουν για κάποιο διάστημα «κρυμμένες» στο εσωτερικό της κατασκευής, αλλά μπορεί να διαδοθούν ταχύτατα προκαλώντας σοβαρά λειτουργικά προβλήματα ή ακόμα και καταστροφική αστοχία με συνέπεια την απώλεια ή την δυσλειτουργία του εξοπλισμού.

Ειδικότερα βλάβες οι οποίες είναι δύσκολα ανιχνεύσιμες δημιουργούνται από την ύπαρξη κραδασμών στα κινητά μέρη της κάθε μηχανολογικής κατασκευής, οι οποίοι οδηγούν στην δημιουργία μηχανικών καταπονήσεων.

Ο έλεγχος για πιθανές βλάβες και φθορές του εξοπλισμού, λόγω των μηχανικών ταλαντώσεων - κραδασμών είναι απαραίτητο κομμάτι διερεύνησης, όχι μόνο κατά την τακτική και περιοδική συντήρηση του εξοπλισμού, αλλά αποτελεί αντικείμενο συνεχούς παρακολούθησης καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του εξοπλισμού κατά τη διάρκεια ζωής του. Για τον συγκεκριμένο έλεγχο χρειάζεται κατάλληλη μετρητική διάταξη, η οποία αφενός θα χρησιμοποιείται για την επιτόπια παρακολούθηση του εξοπλισμού και την συνεχή ένδειξη λειτουργίας του, και αφετέρου θα παρέχει την δυνατότητα συλλογής και καταγραφής δεδομένων και μετρήσεων για την περαιτέρω επεξεργασία τους για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Για την κατανόηση των προβλημάτων και φθορών που δημιουργούνται από τους κραδασμούς, κρίνεται απαραίτητη μια σύντομη παρουσίαση και προσέγγιση των δημιουργούμενων ταλαντώσεων στις μηχανολογικές κατασκευές.

Οι ταλαντώσεις που προκύπτουν από τους στροφικούς κραδασμούς αποτελούν ένα σύνθετο, πολύπλοκο φαινόμενο, αναλυόμενο σε πολλές διαφορετικές συχνότητες και μπορούν να προκληθούν από διάφορους παράγοντες, όπως η απότομη εκκίνηση της μηχανολογικής κατασκευής, ανακρίβειες γραναζιών, ελαττωματικά ρουλεμάν κ.α.



### 2.3 Ημιτονοειδείς ταλαντώσεις

Στη συνέχεια για λόγους καλύτερης κατανόησης παρουσιάζονται οι μαθηματικές σχέσεις οι οποίες περιγράφουν την απλούστερη μορφή ταλάντωσης η οποία αποτελεί ημιτονοειδή συνάρτηση του χρόνου, με σταθερή συχνότητα.

Έστω ένα σώμα που κινείται παλινδρομικά πάνω σε ένα άξονα, γύρω από την αρχή 0 του άξονα, που είναι το μέσον της τροχιάς του. Αν η απομάκρυνση  $x$  του σώματος από το σημείο 0 είναι αρμονική συνάρτηση του χρόνου  $t$ , δίνεται από την σχέση :

$$\text{Εξίσωση 2-1 : } X = A \sin \varphi$$

Όπου :

$A$  : η μέγιστη απομάκρυνση από το σημείο 0 και λέγεται πλάτος ταλάντωσης,

$\varphi$  :  $\omega t + \varphi_0$  ονομάζεται φάση της ταλάντωσης και καθορίζει την τιμή της απομάκρυνσης  $x$  του σώματος κατά την χρονική στιγμή  $t$

$\varphi_0$  : είναι η φάση της ταλάντωσης για την χρονική στιγμή  $t=0$ , και ονομάζεται αρχική φάση

$\omega$ : είναι η γωνιακή ταχύτητα, η οποία δίνεται από την σχέση :

$$\text{Εξίσωση 2-2 : } \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

Όπου :

$f$  : η συχνότητα η οποία ισούται με το πηλίκο του αριθμού  $N$  των επαναλήψεων σε ορισμένο χρόνο  $t$ , προς τον χρόνο αυτό

$$\text{Εξίσωση 2-3 : } f = \frac{N}{t}$$

$T$  : είναι ο χρόνος που απαιτείται για μια πλήρη επανάληψη ενός περιοδικού φαινομένου και ονομάζεται περίοδος

Η γωνιακή ταχύτητα ισούται με το μέτρο της γωνιακής ταχύτητας στην ομαλή περιστροφική κίνηση και εκφράζει τον αριθμό των επαναλήψεων ενός φαινομένου

Η ταχύτητα του σώματος κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την σχέση

$$\text{Εξίσωση 2-4 : } u = \frac{dx}{dt} = u_{max} \cos(\omega t + \varphi_0)$$

Όπου  $u_{max} = \omega A$ , η μέγιστη τιμή του μέτρου της ταχύτητας. Το σώμα έχει την μέγιστη ταχύτητα όταν περνάει από τη θέση ισορροπίας  $x=0$ .

Η επιτάχυνση του σώματος κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την σχέση:

$$\text{Εξίσωση 2-5 : } a = \frac{dv}{dt} = -a_{max} \sin(\omega t + \varphi_0)$$

Όπου  $a_{max} = \omega^2 A$ , η μέγιστη τιμή του μέτρου της επιτάχυνσης. Το σώμα έχει την μέγιστη επιτάχυνση όταν βρίσκεται στις ακραίες θέσεις της ταλάντωσης,  $x = \pm A$ .

Επιλύοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν οι σχέσεις στιγμιαίας ταχύτητας-θέσης και στιγμιαίας επιτάχυνσης-θέσης για την ταλάντωση, οι οποίες είναι :

$$\text{Εξίσωση 2-6 : } v = \pm \omega \sqrt{A^2 - x^2}$$

$$\text{Εξίσωση 2-7 : } a = -\omega^2 x$$

Οι ημιτονοειδείς ταλαντώσεις όπως αναφέρθηκε παραπάνω αποτελούν την απλούστερη μορφή ταλάντωσης η οποία αποτελεί ημιτονοειδή συνάρτηση του χρόνου, με σταθερή συχνότητα. Στις μηχανικές κατασκευές όμως οι ταλαντώσεις που προκύπτουν αποτελούν ένα σύνθετο, πολύπλοκο φαινόμενο, αναλυόμενο σε πολλές διαφορετικές συχνότητες. Από το φάσμα αυτών των συχνοτήτων, εκείνη που προκαλεί το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, είναι η συχνότητα η οποία έχει την ίδια τιμή με την φυσική ιδιοσυχνότητα της κατασκευής, και οδηγεί σε συντονισμό.

Ιδιοσυχνότητα ενός ταλαντωτή ονομάζεται η συχνότητα με την οποία πρέπει να ταλαντώνεται ο ταλαντωτής έτσι ώστε να παρουσιάζει την ελάχιστη απόσβεση κατά την εξαναγκασμένη ταλάντωση.

Θεωρητικά οι ταλαντώσεις που εκτελούν τα διάφορα σώματα, π.χ. μαθηματικό εκκρεμές ή ο απλός αρμονικός ταλαντωτής δεν παρουσιάζουν εξασθένιση/απόσβεση και διατηρούν το πλάτος ταλάντωσής τους σταθερό. Στην πραγματικότητα αυτό δεν συμβαίνει αλλά τα σώματα παρουσιάζουν μικρή ή μεγαλύτερη απόσβεση με αποτέλεσμα να χρειάζεται να τους δίνουμε τακτικά ενέργεια ίση με αυτή που έχασαν για να διατηρούν σταθερό το πλάτος τους κατά το πέρασμα του χρόνου. Η συχνότητα με την οποία πρέπει να δίνουμε ενέργεια ονομάζεται ιδιοσυχνότητα.

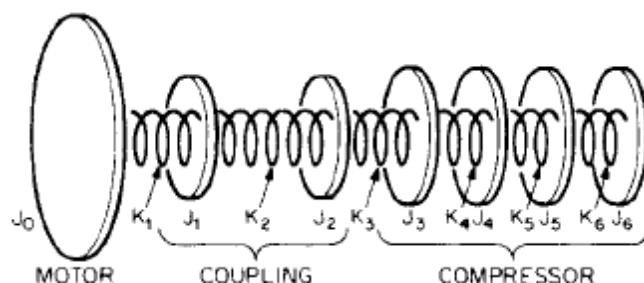
Το φαινόμενο της εξαναγκασμένης ταλάντωσης κατά το οποίο η ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή ταυτίζεται με τη συχνότητα του διεγέρτη ονομάζεται συντονισμός. Κατά το συντονισμό το σύστημα έχει το μέγιστο δυνατό πλάτος και τη μέγιστη δυνατή ενέργεια. Αν δεν υπάρχουν αποσβεστικές δυνάμεις, τότε το πλάτος της ταλάντωσης γίνεται θεωρητικά άπειρο. Έτσι, η ταλάντωση μπορεί να γίνει τόσο έντονη, ώστε να καταστραφεί ο ταλαντωτής.

Η εύρεση της ιδιοσυχνότητας του συστήματος αποτελεί μία επίπονη και σύνθετη εργασία. Ορισμένες μέθοδοι υπολογισμού της είναι η μέθοδος transfer matrix, και

η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Ο προσδιορισμός της ιδιοσυχνότητας ενός συστήματος ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε. Για περισσότερες πληροφορίες προτείνεται η ακόλουθη βιβλιογραφία: (Shock and vibration handbook).

## 2.4 Στροφικές ταλαντώσεις

Συχνά, λόγω της πολυπλοκότητας των μηχανολογικών κατασκευών που εμφανίζουν πρόβλημα κραδασμών η μαθηματική επίλυση του προβλήματος, προσεγγίζεται μέσω ενός μοντέλου, δηλαδή ενός απλούστερου συστήματος ισοδύναμης δυναμικής συμπεριφοράς. Η πολυπλοκότητα μιας μηχανολογικής κατασκευής, όπως για παράδειγμα ενός αεριοστροβίλου, μιας μηχανικής εσωτερικής καύσης, ενός οχήματος ή και επιμέρους τμημάτων όπως πχ ενός στροφαλοφόρου άξονα κίνησης πλοίου, και των ταλαντώσεων που προκύπτουν, δεν επιδέχονται μαθηματικής ανάλυσης, οπότε είναι απαραίτητο το πολύπλοκο σύστημα να αντικατασταθεί από ένα μοντέλο, ένα απλούστερο σύστημα παρόμοιας όμως δυναμικής συμπεριφοράς. Το ισοδύναμο σύστημα συνήθως αποτελείται από συγκεντρωμένες μάζες, οι οποίες συνδέονται με στρεπτικά ελατήρια, τα οποία θεωρούμε ότι δεν έχουν μάζα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-1 (Shock and vibration handbook, 2002)



Σχήμα 2-1: Ισοδύναμο σύστημα-μοντέλο, μηχανολογικής κατασκευής

Στο ισοδύναμο σύστημα και κατά συνέπεια στον υπολογισμό των στρεπτικών ταλαντώσεων, θα πρέπει να συνυπολογίζονται όλα τα επιμέρους τμήματα της μηχανολογικής κατασκευής.

Από τα προαναφερθέντα κρίνεται απαραίτητη η μέτρηση τόσο της φυσικής ιδιοσυχνότητας του συστήματος, όσο και των συχνοτήτων των παραγόμενων ταλαντώσεων. Συγκεκριμένα για τις στροφικές ταλαντώσεις παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 2-2 ένα αξονικά συμμετρικό στερεό σώμα, το οποίο στρέφεται από τη θέση ισορροπίας του κατά γωνία  $\varphi$ . Τότε η ροπή επαναφοράς  $M$  που ασκείται στο σώμα δίνεται από την Εξίσωση 2-8.

$$\text{Εξίσωση 2-8 : } M = -D \varphi$$

Όπου το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η φορά της  $M$  είναι αντίθετη της γωνίας στρέψης  $\varphi$ , και το  $D$  συμβολίζει τη σταθερά επαναφοράς. Αν το σώμα αφεθεί να εκτελέσει ελεύθερες στροφικές ταλαντώσεις, η διαφορική εξίσωση που διέπει αυτές τις ταλαντώσεις θα είναι :

$$\text{Εξίσωση 2-9 : } M = I \frac{d^2\varphi}{dt^2}$$

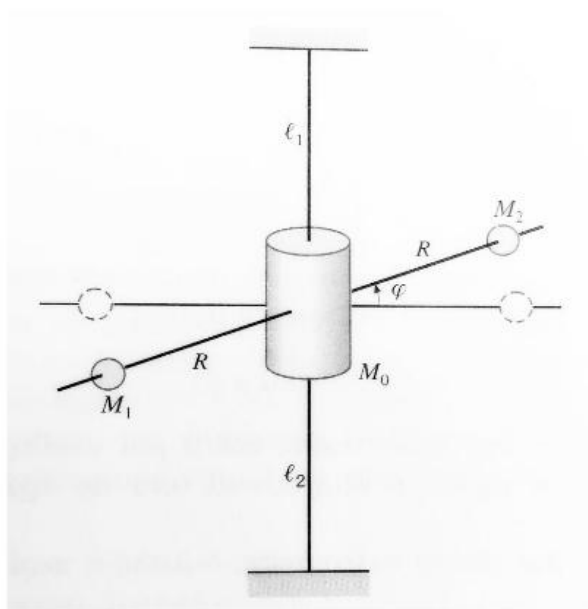
Όπου  $I$  η ροπή αδρανείας του σώματος και το πηλίκο  $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$  αντιπροσωπεύει την γωνιακή επιτάχυνση. Από την Εξίσωση 2-8 και Εξίσωση 2-9 προκύπτει η

$$\text{Εξίσωση 2-10 : } I \frac{d^2\varphi}{dt^2} + D\varphi = 0$$

Η περίοδος  $T$  της ταλάντωσης δίνεται από την Εξίσωση 2-11

$$\text{Εξίσωση 2-11 : } T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{D}}$$

Στην πράξη οι μηχανολογικές κατασκευές έχουν περίπλοκη γεωμετρία και δεν εκτελούν ελεύθερες ή αρμονικές ταλαντώσεις δεχόμενες ποικίλες δυνάμεις και στους τρεις άξονες ισορροπίας τους. Επομένως είναι πολύ δύσκολος τόσο ο υπολογισμός της ροπής αδρανείας του, όσο και των εξισώσεων αναπαράστασης των ταλαντώσεων.



Σχήμα 2-2 : Ισοδύναμο σύστημα μέτρησης στροφικών ταλαντώσεων

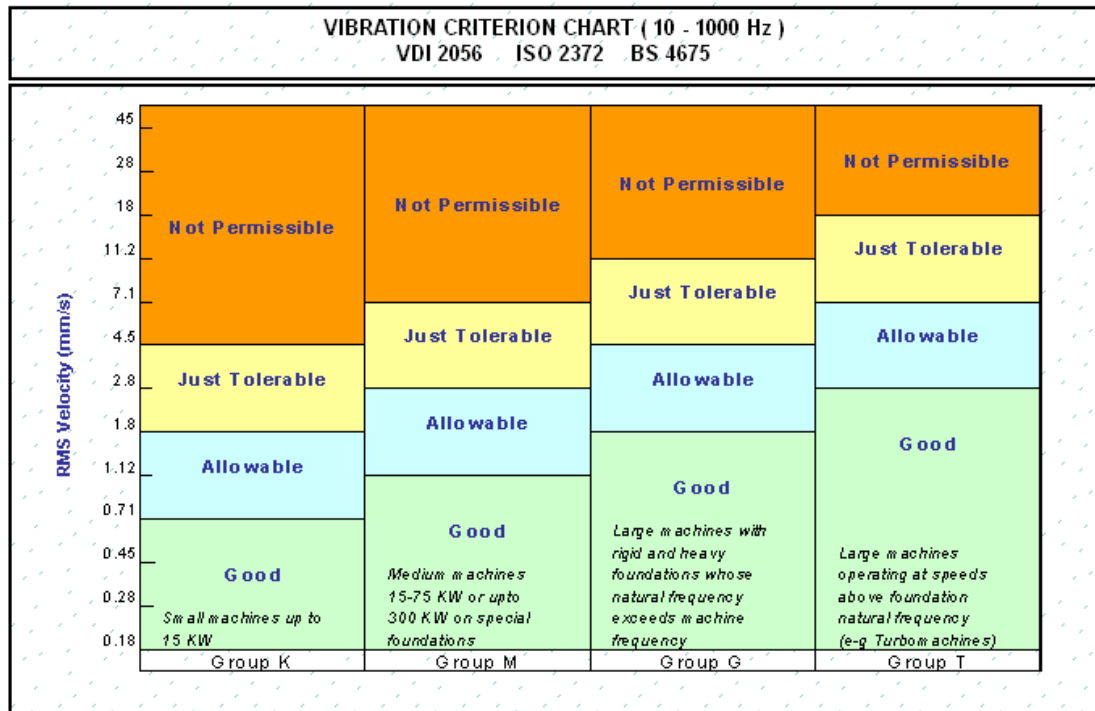
## 2.5 Κριτήρια δριμύτητας ταλαντώσεων

Όπως παρατηρούμε από τις παραπάνω σχέσεις (Εξίσωση 2-1 έως και Εξίσωση 2-7) το πλάτος της ταλάντωσης, το οποίο επηρεάζει τόσο την ταχύτητα όσο και την επιτάχυνσή της, αποτελεί μέτρο σύγκρισης ταλαντώσεων, άρα και μακροπρόθεσμα μέτρο σύγκρισης της σοβαρότητας των δημιουργούμενων φθορών και βλαβών.

Γνωρίζοντας οπότε το πλάτος της κάθε ταλάντωσης, μπορούμε να συλλέξουμε και να απομονώσουμε αυτές με τις υψηλότερες τιμές. Για να μπορούμε όμως να αποφανθούμε ότι οι συγκεκριμένες υψηλές τιμές υπερβαίνουν τα αποδεκτά όρια μηχανικής αντοχής των υλικών της κάθε κατασκευής θα πρέπει να υπάρχει κάποιο συγκρινόμενο μέγεθος.

Είναι κατανοητό ότι απόλυτα όρια μηχανικής αντοχής σε κραδασμούς για την εκάστοτε μηχανή δεν μπορούν να υπάρξουν. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι αδύνατον να ορίσουμε ένα όριο δόνησης, η υπέρβαση του οποίου θα οδηγήσει άμεσα σε αστοχία της μηχανής. Η περιοδικότητα του φαινομένου, οι διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας και η πολυπλοκότητα της μηχανολογικής κατασκευής, δεν μας επιτρέπουν την ασφαλή οριοθέτηση.

Παρ' όλα αυτά υπάρχουν αποδεκτές οδηγίες παγκοσμίως στα όρια δονήσεων, οι οποίες έχουν προκύψει από τα συγκεντρωμένα στοιχεία για κάθε μηχανή σε βάθος χρόνου. Οι σχετικές οδηγίες συνοψίζονται στα πρότυπα ISO 2372 VDI 2056 BS 4675, τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-3 και Σχήμα 2-4 (Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers, 2003).







**Σχήμα 2-3: Κριτήρια δριμύτητας ταλάντωσης, ISO 2372, VDI 2056, BS 4675**

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-3 και Σχήμα 2-4 τα κριτήρια ταλαντώσεων – δονήσεων ομαδοποιούνται σε τέσσερις κατηγορίες (groups) οι οποίες έχουν ως εξής:

- *Group K*: Μικρές μηχανές έως 15kW, μεμονωμένα στοιχεία μηχανών και μηχανές συνδεδεμένες ολοκληρωτικά σε μια κύρια μηχανή σε κανονική κατάσταση λειτουργίας της.
- *Group M*: Μεσαίου μεγέθους μηχανές 15 έως 75kW χωρίς ειδικές βάσεις, στερεά τοποθετημένες μηχανές ή μηχανές με ειδικές βάσεις έως 300kW.
- *Group G*: Μεγάλες κύριες μεταφορικές μηχανές και άλλες μηχανές με περιστρεφόμενες μάζες τοποθετημένες σε στέρεα και βαριά θεμέλια, τα οποία είναι σχετικά δύσκαμπτα στην κατεύθυνση της δόνησης.
- *Group T*: Μεγάλες κύριες μεταφορικές μηχανές και άλλες μηχανές με περιστρεφόμενες μάζες τοποθετημένες σε στέρεα και βαριά θεμέλια, τα οποία είναι σχετικά μαλακά στην κατεύθυνση μέτρησης της δόνησης (π.χ συστήματα στροβιλογγενητριών , ειδικά με ελαφρές υποδομές) (Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance)

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

A – Good	
B – Acceptable	
C – Still acceptable	
D – Not acceptable	

Σχήμα 2-4: Κριτήριο δριμύτητας ταλάντωσης, ISO 2372

Τα παραπάνω όρια δονήσεων αναφέρονται σε όλα τα είδη μηχανικών ταλαντώσεων, οι οποίες μπορούν να διαχωριστούν σε ελεύθερες και εξαναγκασμένες, ανεξάρτητα των βαθμών ελευθερίας τους.

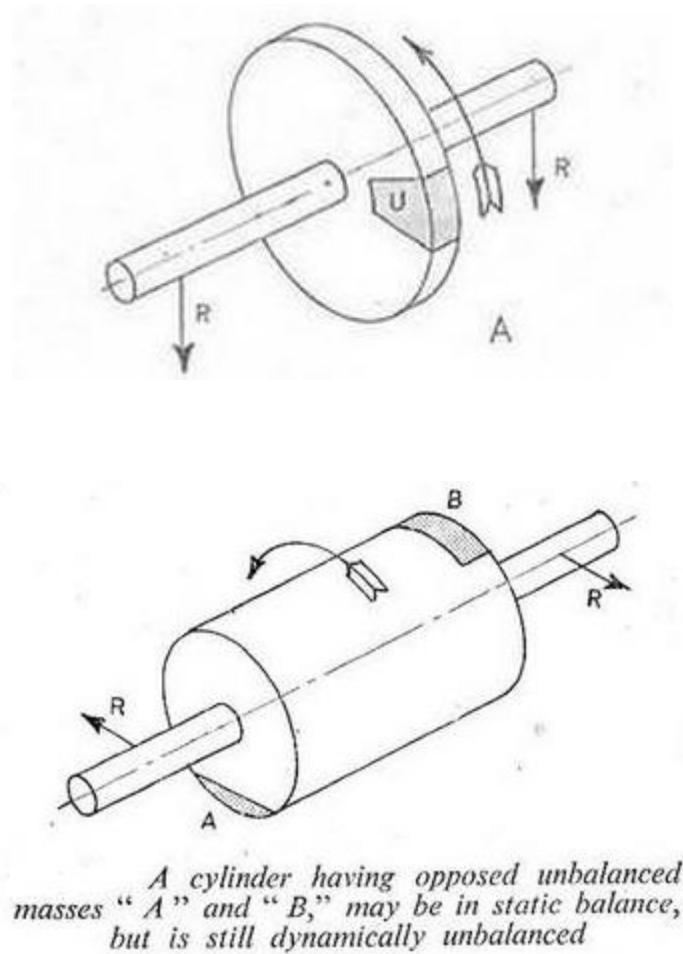
## 2.6 Πηγές κραδασμών

Η θεωρητικά τέλεια μηχανολογική κατασκευή τόσο κατά τον σχεδιασμό της, όσο και κατά την κατασκευή- συναρμολόγησή της και λειτουργία της δεν θα παρήγαγε καμία δόνηση και δεν θα δημιουργούνταν επιζήμιοι κραδασμοί. Οι ατέλειες όμως που αναπόφευκτα υπάρχουν, οδηγούν στην δημιουργία κραδασμών. Οι σημαντικότερες αιτίες κραδασμών είναι οι εξής:

### 2.6.1 Αζυγοσταθμία

Αζυγοσταθμία είναι βασικά ένα απλό πρόβλημα που προκύπτει από την ασύμμετρη κατανομή μάζας σε ένα ρότορα και έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση του κέντρου βάρους του από το νοητό άξονά του, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-5 (Notes on basic principles and practical methods of procedure basic principles).

Η αζυγοσταθμία στρεφόμενων τμημάτων μηχανών είναι από τις πλέον κοινές πηγές υπερβολικών κραδασμών. Χαρακτηρίζεται από υψηλή ακτινική ταλάντωση στη συχνότητα περιστροφής, η οποία μπορεί να συνοδεύεται από επίσης μεγάλο πλάτος ταλάντωσης και στην αξονική διεύθυνση.



**Σχήμα 2-5: Περιπτώσεις αζυγοσταθμίας άξονα**

Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι μια μάζα  $m_e$ , σε απόσταση  $r_e$  από το κέντρο περιστροφής, συμπεριφέρεται έκκεντρα κάτι που προκαλεί την ανάπτυξη μιας φυγόκεντρης δύναμης  $F_r$ , η οποία ισούται με :

$$\text{Εξίσωση 2-12 : } F_r = m_e r_e \omega^2 = M_r \omega^2$$

Όπου η ποσότητα  $M_r$ , καλείται αζυγοστάθμητη ποσότητα.

Η προβολή της ανωτέρω δύναμης, Εξίσωση 2-12, σε κατακόρυφο άξονα δίνει την ακόλουθη συνιστώσα :

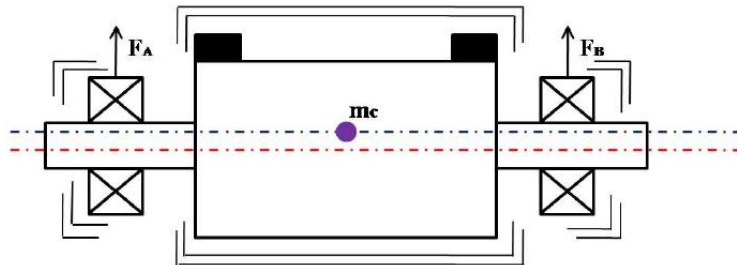
$$\text{Εξίσωση 2-13 : } F_t = M_r \omega^2 \cos(\omega t)$$

Όπου η ποσότητα  $M_r \omega^2$ , εκφράζει το πλάτος της κατακόρυφης δύναμης, ενώ η ποσότητα  $\cos \omega t$ , εκφράζει τη χρονική εξάρτηση. Από την Εξίσωση 2-13 προκύπτει ότι αρμονικές κατακόρυφες δυνάμεις είναι δυνατόν να εμφανιστούν λόγω περιστροφής έκκεντρων μαζών. (Δυναμική Μηχανών Ι).



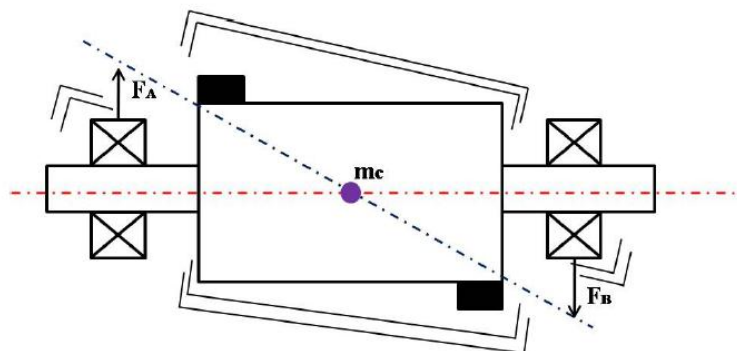
Οι διάφοροι τύποι αζυγοσταθμίας είναι:

- Στατική αζυγοσταθμία, όπου ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος με τον άξονα του κέντρου βάρους της μηχανής.



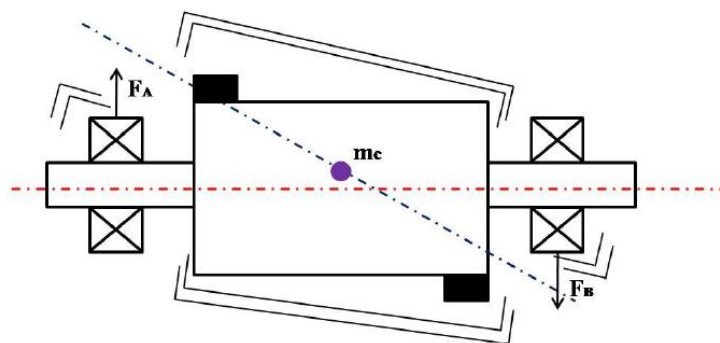
Σχήμα 2-6 : Στατική αζυγοσταθμία

- Αζυγοσταθμία Ροπής, όπου ο άξονας του κέντρου βάρους της μηχανής τέμνει τον άξονα περιστροφής και στο σημείο τομής τους εμφανίζεται το κέντρο βάρους της μηχανής.



Σχήμα 2-7 : Αζυγοσταθμία ροπής

- Δυναμική Αζυγοσταθμία, όπου ο άξονας του κέντρου βάρους της μηχανής τέμνει τον άξονα περιστροφής και το κέντρο βάρους της μηχανής δεν εμφανίζεται στο σημείο τομής.



Σχήμα 2-8 : Δυναμική αζυγοσταθμία

Στις πραγματικές εφαρμογές συναντάται κυρίως η δυναμική αζυγοσταθμία, η οποία είναι συνδυασμός των δύο προηγούμενων τύπων.

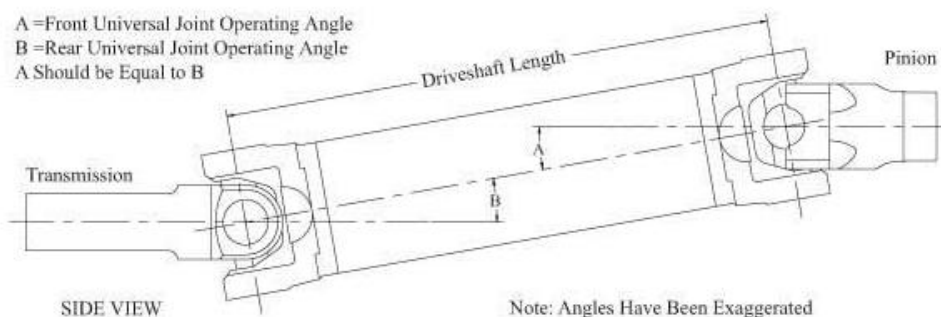
Οι αιτίες που την προκαλούν είναι :

- Η ανομοιόμορφη πυκνότητα του υλικού
- Οι ανοχές στην κατασκευή
- Λανθασμένες ενέργειες συντήρησης
- Συζεύξεις

Πείραμα αζυγοσταθμίας διενεργήθηκε και στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε., το οποίο θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

### 2.6.2 Κακή ευθυγράμμιση

Η κακή ευθυγράμμιση των συνδέσμων της μηχανολογικής κατασκευής, προσδιορίζεται είτε σε κακή ευθυγράμμιση παράλληλων επιπέδων, είτε σε υπό γωνία κακή ευθυγράμμιση, σε οριζόντια ή κάθετη κατεύθυνση. Για την μείωση του συγκεκριμένου προβλήματος χρησιμοποιούνται ευρέως ελαστικοί σύνδεσμοι (couplers), επιτυγχάνοντας έτσι την μικρότερη κατανομή στρεπτικών και καμπτικών φορτίων στους άξονες, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-9.

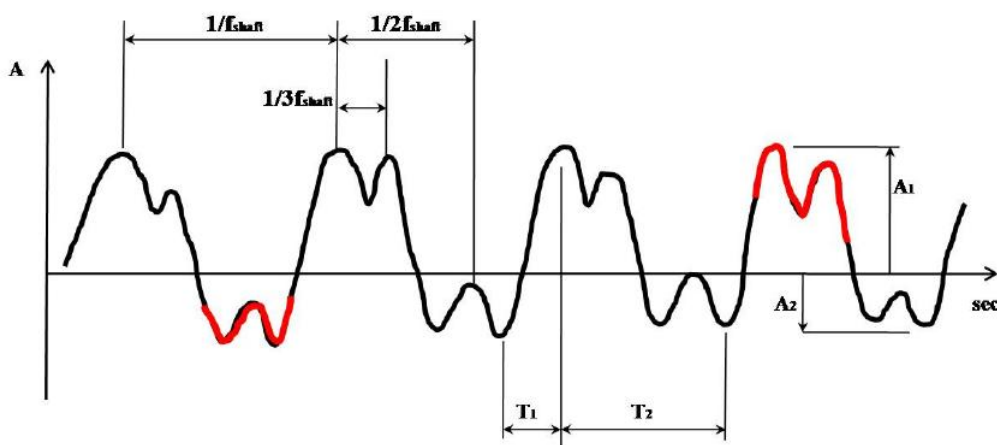


Σχήμα 2-9: Κακή ευθυγράμμιση άξονα

Βασικές αιτίες της κακής ευθυγράμμισης είναι :

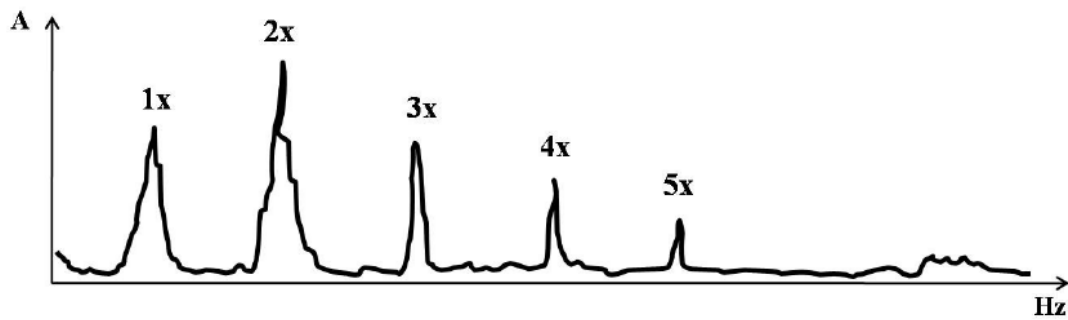
- Η αύξηση της θερμοκρασίας της στρεφόμενης μηχανής και κατ' επέκταση οι θερμικές διαστολές αυτής
- Η εσφαλμένη τοποθέτηση/σύνδεση των αξόνων
- Η υποχώρηση των εδράσεων της μηχανής
- Η εξωτερική φόρτιση

Τα δεδομένα της ταλάντωσης μιας μηχανής σε κακή ευθυγράμμιση εμφανίζουν περιοδικότητες των αρμονικών συνιστωσών της συχνότητας περιστροφής του άξονα  $f_{shaft}$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-10. Ένας κύκλος του χρονικού σήματος αποτελείται από δύο χρονικές περιόδους  $T_1$ ,  $T_2$ : μια ταχέως αύξουσα ταλάντωση στο πρώτο μισό του κύκλου ( $T_1$ ), και μια δεύτερη ταλάντωση μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας στο δεύτερο μισό του κύκλου ( $T_2$ ), η οποία εμφανίζει  $N$  κορυφές. Σε κάθε πλήρη περιστροφή του άξονα, ο μεταλλικός ελαστικός σύνδεσμος (coupler) κάμπτεται στο δεύτερο μισό της περιστροφής λόγω κακής ευθυγράμμισης, με αποτέλεσμα να δυσκολεύεται στην κίνησή του και να προκαλεί νέες ταλαντώσεις με περιοδικότητες της συχνότητας περιστροφής του άξονα. Οι ταλαντώσεις λόγω της κάμψης του συνδέσμου διακρίνονται στο διάγραμμα της χρονικής κυματομορφής του πλάτους ταλάντωσης (Σχήμα 2-10) με την εμφάνιση  $N$  κορυφών. Οι άξονες και το coupler ταλαντώνονται στη συχνότητα περιστροφής τους. Οι παραγόμενες ταλαντώσεις έχουν ίδια φάση με αποτέλεσμα να περιορίζεται το πλάτος της ταλάντωσης στην αρνητική πλευρά του κατακόρυφου άξονα του πλάτους  $A$ , δηλαδή  $A_1 > A_2$  όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-10.



Σχήμα 2-10: Χρονική κυματομορφή απόκρισης μηχανής με κακή ευθυγράμμιση

Αναλύοντας το χρονόδειγμα της μεταβολής του πλάτους ταλάντωσης του συστήματος άξονας - σύνδεσμος στο φάσμα των συχνοτήτων παρατηρούμε ότι εμφανίζεται μια σειρά διακριτών αιχμών, οι οποίες αντιστοιχούν στις κυρίαρχες συχνότητες της ταλάντωσης (Σχήμα 2-11). Η χειρότερη βλάβη προκαλεί αύξηση του πλάτους των αιχμών και του πλήθους των αρμονικών συχνοτήτων της ταχύτητας περιστροφής. Τα πλάτη των αιχμών της  $2^{ns}$  κυρίως και της  $3^{ns}$  αρμονικής είναι συνήθως μεγαλύτερα από το πλάτος της  $1^{ns}$  αρμονικής συνιστώσας όσο η φθορά εξελίσσεται.



**Σχήμα 2-11: Φάσμα απόκρισης μηχανής με κακή ευθυγράμμιση**

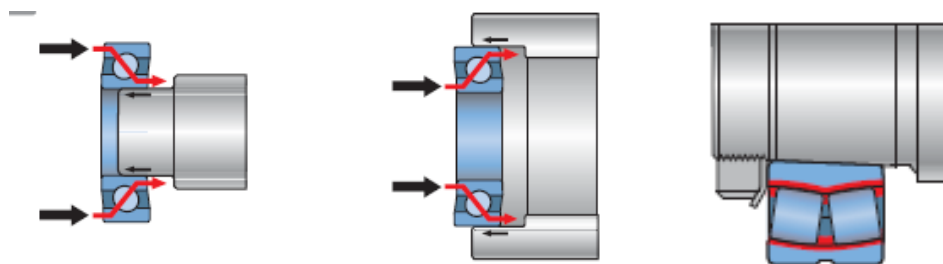
Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αντληθούν από το σύγγραμμα (Διαγνωστική βλαβών στρεφόμενου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού) .

### **2.6.3 Κραδασμοί από ένσφαιρους τριβείς (roulements/ρουλεμάν)**

Τα ρουλεμάν τοποθετούνται στους άξονες περιστροφής των μηχανολογικών κατασκευών έτσι ώστε να μειωθούν οι απώλειες τριβής και οι φθορές στον άξονα και τις εδράσεις. Προκειμένου όμως να επωφεληθούμε της εγκατάστασης των ρουλεμάν θα πρέπει να γίνει προσεκτικός έλεγχος της ευθυγράμμισης του συστήματος άξονας – ρουλεμάν – έδρανα. Σε αντίθετη περίπτωση προκαλούνται πρόσθετα φορτία στο σύστημα, αυξημένες τριβές και δημιουργία κραδασμών με αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου λειτουργίας του ρουλεμάν και των άλλων μηχανικών εξαρτημάτων. Οι αυξημένες δονήσεις και οι τριβές αυξάνουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας και προκαλούν πρόωρη φθορά των εξαρτημάτων και παρουσιάζονται όταν υπάρχει:

- Έλλειψη λίπανσης
- Χρήση σε υψηλότερο από το οριοθετημένο φορτίο
- Λανθασμένη τοποθέτηση
- Λανθασμένος τρόπος εφαρμογής (καταπόνηση κατά την εφαρμογή)
- Ατέλειες κατασκευής
- Φθορά ρουλεμάν και μη έγκαιρη αντικατάστασή του

Ιδιαίτερη έμφαση θα πρέπει να δίνεται κατά την άρμωση του ρουλεμάν προκειμένου να μην υπάρξουν μόνιμες παραμορφώσεις στο ρουλεμάν οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία κραδασμών ακόμα και στην περίπτωση ευθυγραμμισμένων συστημάτων. Στο Σχήμα 2-12 παρουσιάζονται τρεις τυπικές περιπτώσεις λανθασμένης άρμωσης του ρουλεμάν.



**Σχήμα 2-12: Λανθασμένη άρμωση ρουλεμάν**

Συγκεκριμένα στις δύο πρώτες περιπτώσεις κατά την εφαρμογή σε κυλινδρικό άξονα παρατηρείται ότι η δύναμη άρμωσης ασκείται λανθασμένα όχι στο δακτυλίδι της σφιχτής συναρμογής αλλά στο ελεύθερο δακτυλίδι, με αποτέλεσμα την καταπόνηση των στοιχείων κύλισης και των τροχιών τους. Στην τρίτη περίπτωση όπου η εφαρμογή γίνεται σε κωνικό άξονα το ρουλεμάν έχει μετατοπιστεί περισσότερο από το επιτρεπτό μήκος, με αποτέλεσμα τη μείωση του λειτουργικού διακένου η οποία οδηγεί σε πιθανότητα καταστροφής.

Δημιουργία κραδασμών επίσης μπορεί να προκληθεί και από ελαττώματα και δυσλειτουργίες οδοντωτών τροχών, μάντων και τροχαλιών, μηχανικής καταπόνησης των υλικών και του κάθε επιμέρους τμήματος της μηχανολογικής κατασκευής.

## **2.7 Προτάσεις ελάττωσης κραδασμών σε μηχανολογικές κατασκευές**

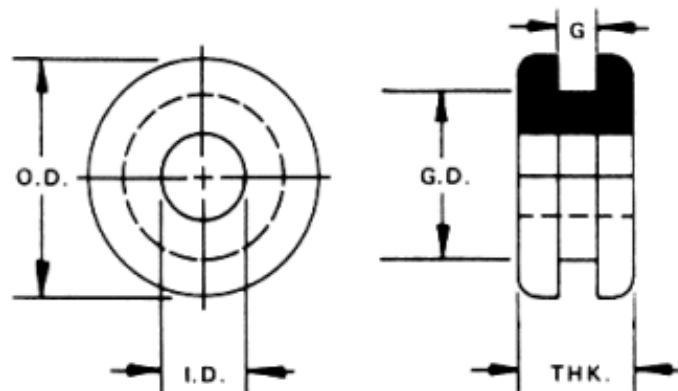
Όπως είναι κατανοητό από τα παραπάνω, οι κραδασμοί και οι μηχανικές ταλαντώσεις που δημιουργούνται, προκαλούν ποικίλα προβλήματα, μηχανική καταπόνηση, υπερβολική φθορά ακόμα και αστοχία της κατασκευής.

Επομένως είναι απαραίτητη η μέγιστη ελάττωσή τους και η προσπάθεια εξάλειψής τους. Οι συνηθέστερες τακτικές, και κατασκευαστικές μέθοδοι αποτελούνται από συσκευές απόσβεσης των κραδασμών, συνήθως κατασκευασμένες από υλικό καουτσούκ, οι οποίες τοποθετούνται μεταξύ του κινητήριου άξονα του κινητήρα και του έκκεντρου άξονα μεταφοράς της κίνησης, εξομαλύνοντας τις δονήσεις και κατ' επέκταση τη μεταφορά των δυνάμεων από τον κινητήρα στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης. Ειδικότερα, οι συγκεκριμένες δυνάμεις απορροφώνται κατά

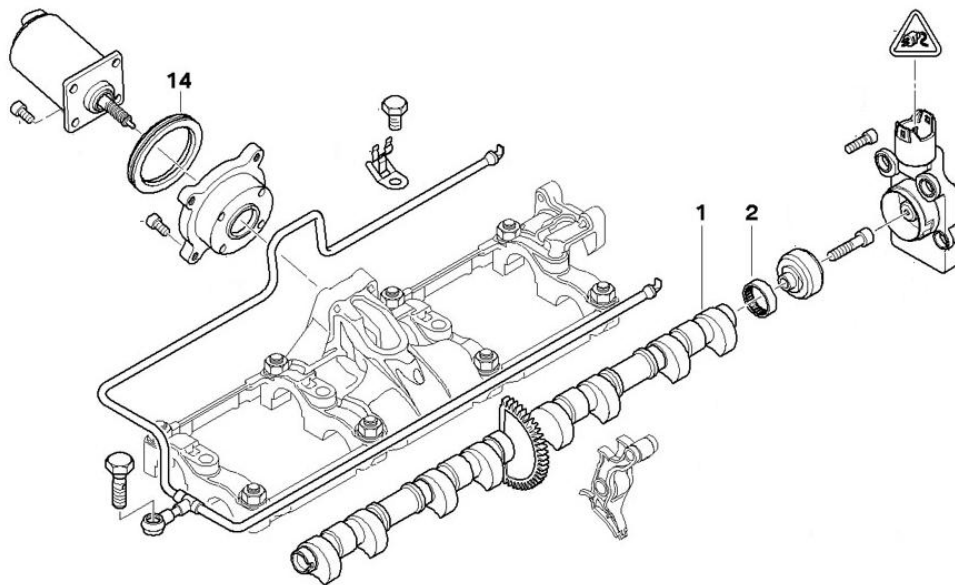
την μεταφορά τους από συστοιχίες τύπου δακτυλίου, ροδέλες από καουτσούκ (rubber grommets), όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-13 και Σχήμα 2-14. Στο Σχήμα 2-15 παρουσιάζονται οι ροδέλες, θέση 2 και 14, ειδικά προσαρμοσμένες σε εκκεντροφόρο άξονα κίνησης στην θέση 1 για την πρόληψη της μετάδοσης των δονήσεων στο περίβλημα του κινητήρα.



Σχήμα 2-13: Ροδέλες από καουτσούκ (rubber grommets)



Σχήμα 2-14: Σκαρίφημα Rubber grommets



Σχήμα 2-15 : Ροδέλες από καουτσούκ (rubber grommets) σε άξονα κίνησης

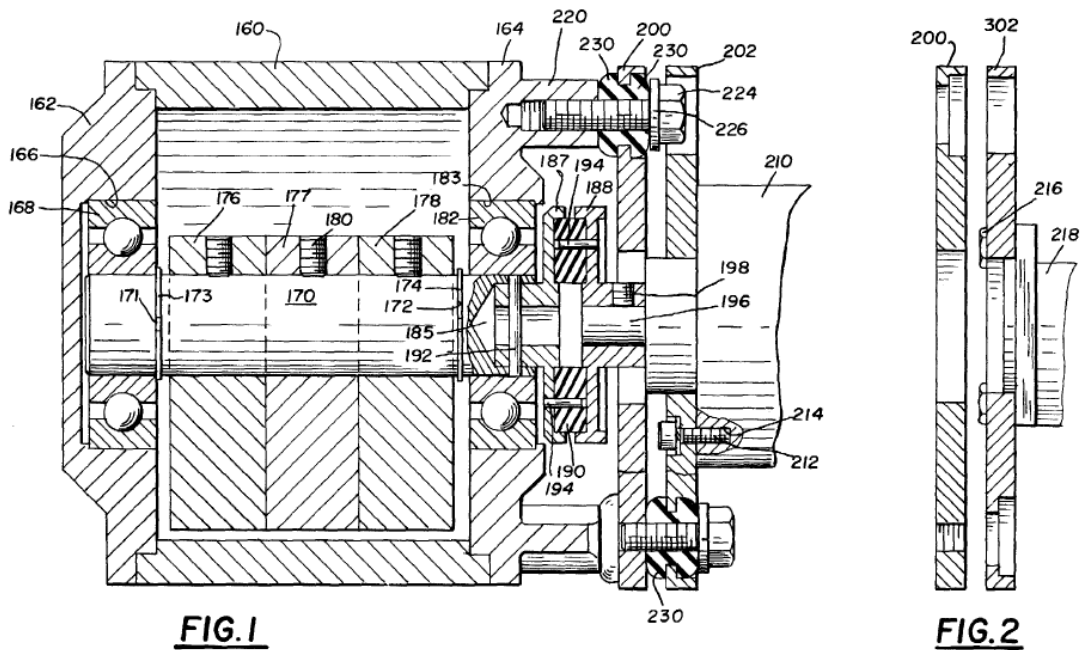
## 2.8 Συσκευή απόσβεσης κραδασμών

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη πρόταση απορρόφησης και εξάλειψης των κραδασμών, κατοχυρωμένη στον Αμερικάνικο Οργανισμό Ευρεσιτεχνιών (United States Patent), ως συσκευή απόσβεσης κραδασμών για μηχανές με έκκεντρες δυνάμεις και με κωδικό αριθμό 4,425,813 (Vibration dampening apparatus for motor actuated eccentric forces) .

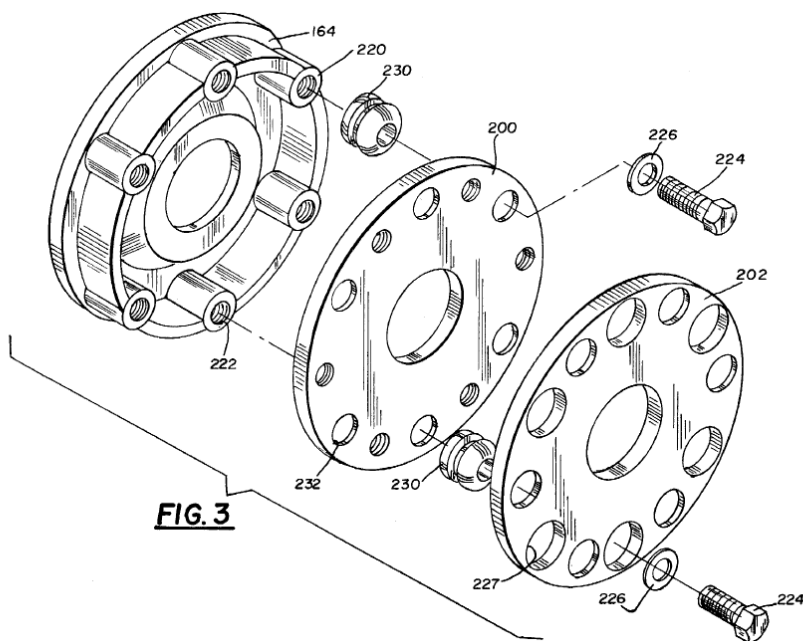
Αντικειμενικός σκοπός της ανωτέρω εφεύρεσης-ευρεσιτεχνίας, (Σχήμα 2-16 και Σχήμα 2-17) αποτελεί η απόσβεση και εξάλειψη των κραδασμών που παράγονται κατά τη λειτουργία κινητήρων. Κατά τη λειτουργία του μηχανισμού, τοποθετείται έκκεντρα ένα βάρος στον άξονα του κινητήρα, που φέρει ένα περίβλημα το οποίο μπορεί να είναι προσωρινά ή μόνιμα στερεωμένο στην συσκευή που πρόκειται να δεχτεί τους κραδασμούς. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται έκκεντρα στον εν λόγω άξονα δεν μεταδίδονται στον κινητήρα, λόγω της απορροφήσεως των κραδασμών από την παραπάνω διάταξη ζεύξης η οποία εξαλείφει τις δονήσεις λόγω εκκεντρότητας του άξονα στον ρότορα του κινητήρα.

Ουσιαστικά, η παραπάνω εφεύρεση παρέχει μία δύναμη κραδασμών που φέρεται επί ενός άξονα σε ένα περίβλημα. Η δύναμη αυτή περιστρέφεται από ένα συνδεδεμένο κινητήρα και ο ρότορας είναι συνδεδεμένος με τον εν λόγω άξονα με ένα ελαστικό σύνδεσμο από καουτσούκ . Ο άξονας που συνδέεται με τον ρότορα φέρει αντι-τριβής έδρανα και είναι συνδεδεμένος με τον άξονα της συσκευής

παραγωγής κραδασμών με ελαστικούς δακτυλίους. Το εξωτερικό περίβλημα του κινητήρα, το οποίο φέρει τον ρότορα επί εδράνων, είναι στερεωμένο στο περίβλημα συγκράτησης και περιέχει το έκκεντρο βάρος των κραδασμών. Η συγκεκριμένη συσκευή πάλλεται και ουσιαστικά εξαλείφει την μεταβίβαση των δονήσεων μέσω του περιβλήματος.



Σχήμα 2-16: Συσκευή απορρόφησης κραδασμών, πλάγια όψη



Σχήμα 2-17: Συσκευή απορρόφησης κραδασμών, ισομετρική διευρυμένη όψη



### 3. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη, η οποία κατασκευάστηκε πλήρως στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε, στο ΕΠΤ-Ε.Μ.Π, θα χρησιμοποιηθεί, τόσο για την διασύνδεση και βαθμονόμηση των μεταλλακτών, επαγωγικού αισθητήρα και επιταχυνσιομέτρου, όσο και για την πειραματική διερεύνηση των μηχανικών ταλαντώσεων σε μηχανολογική κατασκευή, και συγκεκριμένα σε σώμα κινητήρα.

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα :

#### I. Κινητήρας

Ο κινητήρας που χρησιμοποιείται είναι μονοφασικός ασύγχρονος κινητήρας της Γερμανικής εταιρείας HOVELMANN, τύπου R15, με τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά :

- Τροφοδοσία 220 V, 2.75 A
- Συντελεστής ισχύος  $\cos(\phi) = 0.7$
- Κατανάλωση ισχύος 0.245 kW
- Έξοδος, στροφές 1420 rpm

#### II. Σταθεροποιητής τάσης, "βάριακ"

Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα αποτελεί την εξαρτημένη μεταβλητή του πειράματός μας, την οποία και μεταβάλλουμε κατά βούληση μέσω της τάσης τροφοδοσίας. Ο έλεγχος της τάσης τροφοδοσίας γίνεται με τη χρήση ενός σταθεροποιητή τάσης, ή αλλιώς βάριακ, ο οποίος τροφοδοτείται στην είσοδό του με σταθερή τάση 220 V, 50 Hz, από το δίκτυο και μεταβάλλει την έξοδό του στην περιοχή 0 έως 220 V, 50 Hz. Ο σταθεροποιητής τάσης που επιλέχθηκε είναι της εταιρείας NIGBO G.S ELECTORIC GROUP , τύπου TDGC2, Σχήμα 3-1 και έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Τροφοδοσία 220 V
- Τάση εξόδου 0 έως 250 V



Σχήμα 3-1: σταθεροποιητής τάσης, “βάριακ”

### III. Αναλογοψηφιακός μετατροπέας (ADC)

Ο ADC που χρησιμοποιούμε στην εγκατάσταση είναι τύπου PCI της εταιρίας Advantech (Σχήμα 3-2) με εμπορική ονομασία PCI 1710/L. Έχει την μορφή καρτέλας (board) και τοποθετείται απ’ ευθείας στο PCI bus του Η/Υ (User's manual PCI-1710L Multifunction card w/o analog output) .

### IV. Επαγωγικός αισθητήρας

Ο αισθητήρας είναι της Γερμανικής εταιρίας Pepperl+Fuchs, με εμπορική ονομασία NBN 8-18GM50-E2 (User's manual Inductive sensor NBN 8-18GM50-E2), (Installation conditions for inductive sensors).

### V. Επιταχυνσιόμετρο

Ο αισθητήρας είναι της Γερμανικής εταιρίας SCHMIDT Feintechnik, τύπου BS 10.022 (User's manual acceleration sensor BS 10.022) .

### VI. Υπολογιστής

Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής (Η/Υ) είναι τύπου TURBO-X, DUAL CORE και συνοδεύεται από την 32-bit έκδοση λειτουργικού συστήματος Windows XP Professional.

Τα επιμέρους τμήματα, αναλογοψηφιακός μετατροπέας, επαγωγικός αισθητήρας και επιταχυνσιόμετρο, παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω στα εδάφια 3.1, 3.2 και 3.6 αντίστοιχα.

### 3.1 Αναλογοψηφιακός μετατροπέας (ADC)

Για την επεξεργασία των σημάτων των μεταλλακτών της πειραματικής διάταξης γίνεται απ' ευθείας διασύνδεσή τους σε Η/Υ ο οποίος διαθέτει κατάλληλη μονάδα αναλογοψηφιακού μετατροπέα (ADC). Τα βασικά χαρακτηριστικά της μονάδας, οι ρυθμίσεις που πραγματοποιήθηκαν καθώς και η ακριβής συνδεσμολογία των καναλιών αναλογικής εισόδου θα αναλυθούν παρακάτω.

Οι ADC που χρησιμοποιούνται ως μονάδες προσαρμογής των μεταλλακτών σε Η/Υ, συνήθως διαθέτουν εσωτερικό επιλογέα ή πολυπλέκτη, ο οποίος δέχεται αναλογικά σήματα από περισσότερες της μίας πηγές σε ξεχωριστές θέσεις (κανάλια), ψηφιοποιώντας κάθε φορά το επιλεγόμενο κανάλι, μέσω του λογισμικού που ελέγχει τον μετατροπέα. Η επιλογή γίνεται από το λογισμικό οδήγησης (driver) μέσω των καταχωρητών ελέγχου (control registers) του μετατροπέα.

Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός ADC είναι:

- Η Διακριτική Ικανότητα
- Η περιοχή λειτουργίας
- Χρόνος δειγματοληψίας



Σχήμα 3-2: Αναλογοψηφιακός μετατροπέας (ADC), Advantech PCI-1710/L

Ο ADC που χρησιμοποιείται στην εγκατάσταση είναι τύπου PCI-1710/L της εταιρίας Advantech (Σχήμα 3-2) και έχει την μορφή καρτέλας (board), κατάλληλης για άμεση τοποθετείται απ' ευθείας στο PCI bus του Η/Υ. Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του έχουν ως εξής:

- Διακριτική ικανότητα : 12 bit
- Μέγιστη ταχύτητα αναλογοψηφιακής μετατροπής 100 kHz με μέθοδο άμεσης προσπέλασης στη μνήμη
- Κανάλια εσωτερικού πολυπλέκτη: επιλογή 16 απλών (single-ended) ή 8 διαφορικών (differential). Η διαφορά των απλών με τα διαφορικά κανάλια είναι ότι τα πρώτα επιτρέπουν τη μέτρηση του δυναμικού ενός ακροδέκτη ως προς τη γη ενώ τα δεύτερα τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ δύο ακροδεκτών.
- Περιοχή λειτουργίας : δυνατότητα επιλογής μέσω προγραμματισμού της κάρτας σε διπολική ή μονοπολική τάση λειτουργίας στις εξής περιοχές:
  - διπολική :  $\pm 0.625, \pm 1.25, \pm 2.5, \pm 5, \pm 10$
  - μονοπολική : 0-1.25, 0-2.5, 0-5, 0-10

Ο ADC που χρησιμοποιήθηκε διαθέτει τη δυνατότητα επιλογής διαφορετικού εύρους είτε μονοπολικού είτε διπολικού σε κάθε κανάλι ξεχωριστά. Το βασικό αυτό πλεονέκτημα, το οποίο δεν υπήρχε σε παλαιότερους αναλογοψηφιακούς μετατροπείς δίνει τη δυνατότητα ανάγνωσης αναλογικών σημάτων εισόδου διαφορετικού εύρους με τη μέγιστη δυνατή διακριτική ικανότητα κάθε φορά.

- Ρυθμός δειγματοληψίας : από 50 έως 100kHz
- Κέρδος που ρυθμίζεται για κάθε κανάλι ξεχωριστά με χρήση καταχωρητών από το λογισμικό ελέγχου της μονάδας και κυμαίνεται μεταξύ 0.5 - 8 με συγκεκριμένες τιμές : 0.5, 1, 2, 4, 8.
- Δυνατότητα ψηφιοαναλογικής μετατροπής (ύπαρξη ψηφιοαναλογικού μετατροπέα-DAC) με εύρος τουλάχιστον 0 - 5 V

Εναλλακτικές μορφές έναρξης (σκανδαλισμού) της αναλογοψηφιακής μετατροπής, ή από πρόγραμμα, ή με ρυθμοδότη, εσωτερικό ή εξωτερικό.

Πριν την έναρξη των πειραμάτων των μηχανικών ταλαντώσεων είναι απαραίτητος ο έλεγχος της βαθμονόμησης των μεταλλακτών και των συσκευών καταγραφής που θα χρησιμοποιηθούν. Με τη διαδικασία ελέγχου της βαθμονόμησης ελέγχουμε αφενός μεν εάν τα μετρητικά όργανα δίνουν ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις αφετέρου δε εάν αυτές οι μετρήσεις καταγράφονται αξιόπιστα από τον Η/Υ.

Στην παρούσα Δ.Ε. θα πραγματοποιηθεί έλεγχος της βαθμονόμησης του μετρητή μηχανικών ταλαντώσεων (επιταχυνσιομέτρου) και του μετρητή συχνότητας.

### 3.2 Επαγωγικός μεταλλάκτης

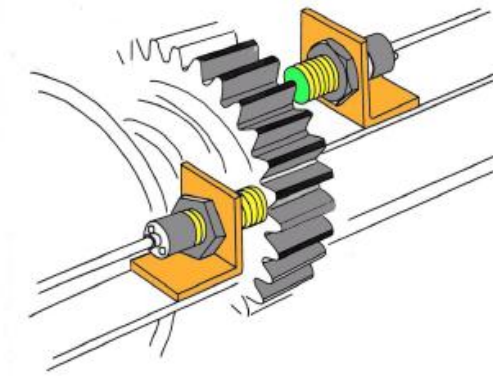
Ως μεταλλάκτες μετρήσεως εννοούμε τις διατάξεις εκείνες οι οποίες ευαισθητοποιούνται από το μετρούμενο μέγεθος και εφόσον το μετατρέψουν παρέχουν στην έξοδό τους άλλο προσφορότερο να αξιοποιηθεί στη συνέχεια φυσικό μέγεθος. Σχεδόν πάντα το ιδανικότερο φυσικό μέγεθος στην έξοδο είναι κάποιο ηλεκτρικό σήμα τάσεως ή εντάσεως.

Για την ένδειξη και καταγραφή των στροφών του κινητήρα χρησιμοποιείται επαγωγικός αισθητήρας (inductive sensor) και ελεγκτής (controller) συνδεδεμένος με τον Η/Υ της εγκατάστασης.

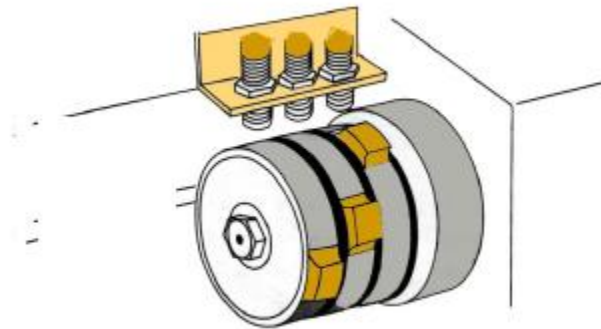
Ο επαγωγικός αισθητήρας αποτελεί έναν ηλεκτρικό αισθητήρα ανίχνευσης μεταλλικών αντικειμένων χωρίς να έρχεται σε άμεση επαφή με το αντικείμενο που ανιχνεύει. Η συγκεκριμένη ιδιότητα, ανίχνευσης δηλαδή από απόσταση παρέχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Η διάρκεια λειτουργίας του είναι μεγάλη, επειδή δεν έχει επαφές και κινούμενα μέρη τα οποία συνήθως φθείρονται εύκολα.
- Ο χρόνος από τη μια κατάσταση στην άλλη (ON/OFF) είναι πολύ μικρός, γι' αυτό και η συχνότητα λειτουργίας τους μπορεί να είναι μεγάλη.
- Δεν παρουσιάζει τα μειονεκτήματα σπινθηρισμών των επαφών, ούτε άλλα παρόμοια μειονεκτήματα που συνήθως προκύπτουν από τις μηχανικές ατέλειες στα σημεία επαφών.

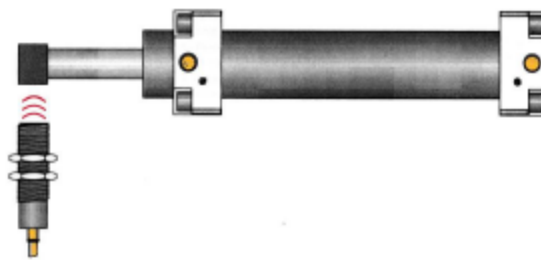
Τυπικά παραδείγματα εφαρμογών επαγωγικών αισθητηρίων παρουσιάζονται παρακάτω στα Σχήμα 3-3 έως Σχήμα 3-5. (Πιλοτικός Εξυπηρετητής της Μέσης Τεχνικής Επαγγελματικής Εκπαίδευσης Υ.Π.Π. Κύπρος)



Σχήμα 3-3: Έλεγχος ταχύτητας οδοντωτού τροχού και φοράς περιστροφής



Σχήμα 3-4 : Έλεγχος έκκεντρων ρύθμισης



Σχήμα 3-5: Ανίχνευση της θέσης του εμβόλου σε ένα υδραυλικό ή πνευματικό κύλινδρο

### 3.2.1 Αρχή λειτουργίας

Όταν τροφοδοτηθεί με ρεύμα ο επαγωγικός αισθητήρας, τότε δημιουργείται εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, μπροστά από την ενεργό επιφάνειά του. Αν εισέλθει μέσα στο μαγνητικό αυτό πεδίο, κάποιο μεταλλικό αντικείμενο (σίδηρο,

αλουμίνιο, χαλκός κτλ), τότε προκαλείται ισχυρή απόσβεση της ταλάντωσης, αντιστρέφεται η έξοδος του κυκλώματος σκανδάλης και αλλάζει η κατάσταση της εξόδου του αισθητήρα. Αντίστοιχα ο χωρητικός αισθητήρας προσέγγισης, βασίζει την αρχή λειτουργίας του, στην αλλαγή της χωρητικότητας πυκνωτή σε ένα κύκλωμα ταλάντωσης RC, όταν πλησιάζει την ενεργή επιφάνεια του αισθητήρα οποιοδήποτε αντικείμενο. Οι χωρητικοί αισθητήρες προσέγγισης χρησιμεύουν και αυτοί για την ανίχνευση αντικειμένων εξ αποστάσεως. Αντίθετα από τους επαγωγικούς, που αναγνωρίζουν μόνο μεταλλικά αντικείμενα, οι χωρητικοί αισθητήρες ανιχνεύουν και τα μη μεταλλικά. Το βασικό τους όμως μειονέκτημα είναι το μικρότερο εύρος της απόστασης ανίχνευσης - αίσθησης και η μικρότερη εμβέλεια μέτρησης.

Πιο κάτω αναφέρονται ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των επαγωγικών αισθητήρων, τα οποία πρέπει να γνωρίζουμε, για να επιλέξουμε τον κατάλληλο αισθητήρα για κάθε περίπτωση:

- Τάση λειτουργίας
- Απόσταση αίσθησης, δηλαδή την ελάχιστη και μέγιστη απαιτούμενη απόσταση της ενεργής επιφάνειας του αισθητήρα από την επιφάνεια του αντικειμένου παρακολούθησης (Σχήμα 3-3 έως Σχήμα 3-5), εντός της οποίας προκαλείται διέγερση, ο αισθητήρας αντιλαμβάνεται την ύπαρξη αντικειμένου και παράγει σήμα εξόδου.
- Διαστάσεις
- Κατάσταση σήματος εξόδου στη θέση ηρεμίας.

Επιπρόσθετα, το κύκλωμα του επαγωγικού αισθητήρα μπορεί να παρουσιάζει τις ακόλουθες θετικές ιδιότητες:

- Προστασία από ανάστροφη πόλωση, δηλαδή από εμφάνιση αρνητικής τάσης και κατά συνέπεια την διακοπή του κυκλώματος μέτρησης
- Προστασία από βραχυκύκλωμα
- Προστασία από στιγμιαίες υπερτάσεις.

Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι επαγωγικοί αισθητήρες, εκτός της μεγάλης διάρκειας ζωής τους και την ελάχιστη απαιτούμενη συντήρηση μπορούν να τοποθετηθούν και σε αντίξοες συνθήκες λειτουργίας, όπως η παρουσία υγρών, σκόνης, δονήσεων κ.τ.λ.

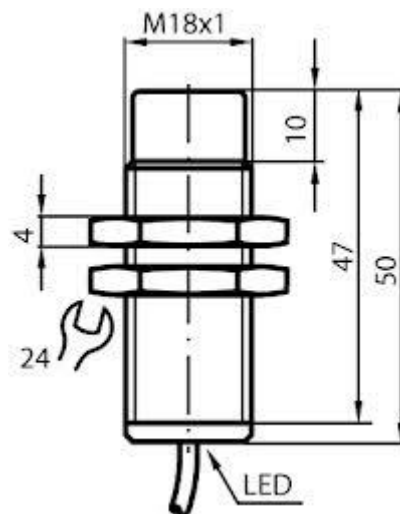
### 3.2.2 Ο επαγωγικός αισθητήρας NBN 8-18GM50-E2

Ο αισθητήρας είναι της Γερμανικής εταιρίας Pepperl+Fuchs, τύπου NBN 8-18GM50-E2 (Σχήμα 3-6)



Σχήμα 3-6: Επαγωγικός αισθητήρας τύπου NBN 8-18GM50-E2

Οι ακριβείς του διαστάσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-7



Σχήμα 3-7: Επαγωγικός αισθητήρας τύπου NBN 8-18GM50-E2, διαστάσεις

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του συνοψίζονται ως εξής:

- Μέγιστη απόσταση λειτουργίας : 8mm
- Ορθή απόσταση λειτουργίας : 0 έως 6,48mm
- Πολικότητα εξόδου : DC
- Τροφοδοσία : 10 έως 30V



- Έξοδος: Ηλεκτρικό σήμα εντάσεως 0 – 20 mA
- Υστέρηση : 5%
- Πτώση τάσης :  $\leq 3V$
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος εργασίας : -25 έως +75 °C

Επίσης ο επαγωγικός αισθητήρας διαθέτει λυχνία τύπου LED, η οποία φωτίζεται κατά τη διέγερση του μαγνητικού πεδίου του μεταλλάκτη. Η οπτική αυτή ένδειξη αποτελεί σημαντικό βοήθημα στον χρήστη – εφαρμοστή προκειμένου ο αισθητήρας να βρίσκεται εντός των ορίων απόστασης λειτουργίας, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο εδάφιο 3.2

Λεπτομερέστερες πληροφορίες παρέχονται στο εγχειρίδιο του οργάνου (User's manual Inductive sensor NBN 8-18GM50-E2)

### 3.3 Ελεγκτής/μετατροπέας συχνότητας WEM/Ex-FSU

Για την τροφοδοσία αλλά και την εκμετάλλευση του ηλεκτρικού σήματος του επαγωγικού αισθητήρα χρησιμοποιείται κατάλληλος ελεγκτής (controller), ο οποίος εν συνεχεία παρέχει αναλογικό σήμα εντάσεως στην περιοχή 0 έως 20 mA ανάλογο της ενδείξεως του αισθητήρα.

Ο controller είναι και αυτός της Γερμανικής εταιρείας Pepperl+Fuchs με την εμπορική ονομασία WEM/Ex-FSU, ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 3-8.



Σχήμα 3-8: Ελεγκτής/μετατροπέας συχνότητας WEM Ex-FSU

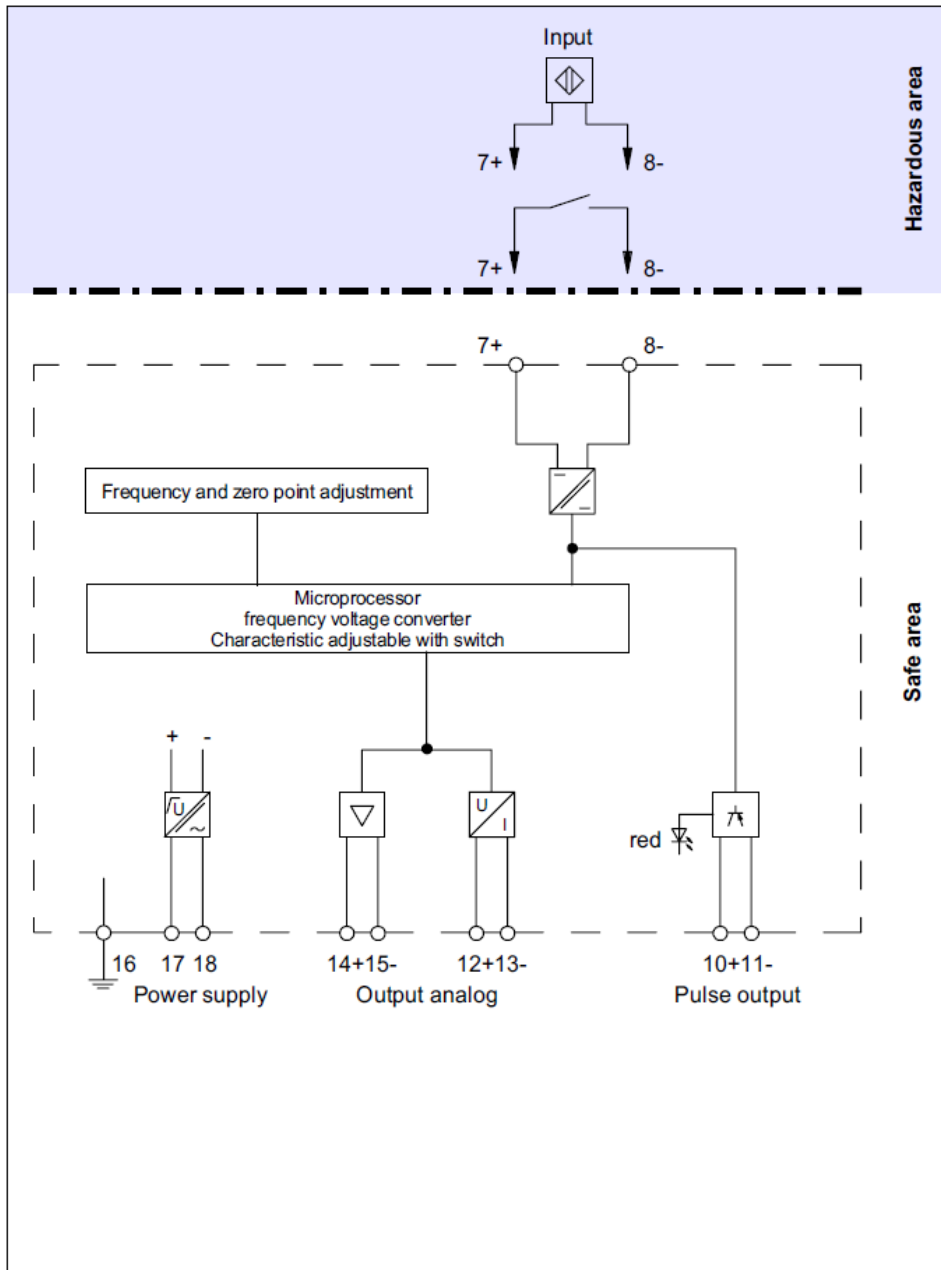
Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του έχουν ως εξής (User's manual logic control units, frequency current converter WEM Ex-FSU)[14]:

- Είσοδος: Ηλεκτρικό σήμα συχνότητας 0.001 – 999 Hz (δύο καλωδίων)
- Έξοδος: Ηλεκτρικό σήμα τάσεως 0 –20 mA (δύο καλωδίων) γραμμικής αντιστοιχίας με το μετρούμενο μέγεθος, ή 4-20mA σε φόρτιση 0-1000 Ohm.
- Τροφοδοσία: 115-230 V AC

Ο ψηφιακός ελεγκτής ή μετατροπέας συχνότητας χρησιμοποιείται τόσο για την προσαρμογή του εύρους της μετρούμενης συχνότητας, όσο και για την υπέρθεση του αναλογικού σήματος εξόδου του επαγωγικού αισθητήρα.

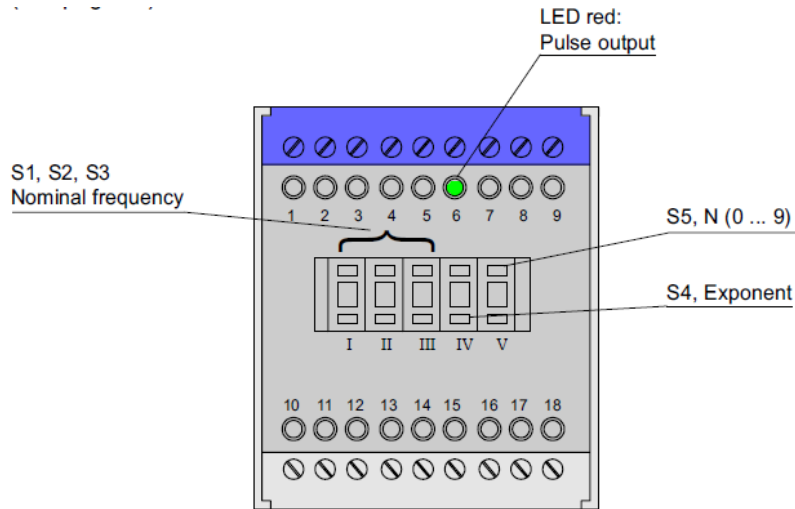
Η ηλεκτρική τροφοδοσία του επαγωγικού αισθητήρα παρέχεται από τον ψηφιακό ελεγκτή (Controller), στον οποίο επιστρέφει το σήμα εξόδου. Η συνδεσμολογία του οργάνου φαίνεται στο Σχήμα 3-9

Η τροφοδοσία των 220 V AC γίνεται στις θέσεις 16-17-18, όπου η θέση 16 αντιστοιχεί στην γείωση της συσκευής. Η ηλεκτρική τροφοδοσία του αισθητήρα και η υπέρθεση του σήματος εξόδου του γίνεται στις θέσεις 6-8-9. Το σήμα εξόδου του μεταλλάκτη είναι διαθέσιμο στο χρήστη με τη μορφή σήματος εντάσεως μέσω των επαφών 12-13 του ελεγκτή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-9.



**Σχήμα 3-9: Συνδεσμολογία επαγωγικού αισθητήρα**

Εκτός όμως από την σωστή συνδεσμολογία είναι απαραίτητος και ο σωστός προγραμματισμός του οργάνου για το επιθυμητό αποτέλεσμα. Για να κατανοηθεί με μεγαλύτερη ευκολία ο προγραμματισμός του ελεγκτή, παρουσιάζεται η εμπρόσθια όψη του και οι δυνατότητες προγραμματισμού στο Σχήμα 3-10.



Σχήμα 3-10: Εμπρόσθια όψη ελεγκτή επαγωγικού αισθητήρα

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-10, τα βασικά εργαλεία προγραμματισμού είναι οι διακόπτες S1, S2, S3, S4 και S5 τα οποία παρέχουν την δυνατότητα ρύθμισης του εύρους μέτρησης συχνότητας και του εύρους αναλογικού σήματος εξόδου όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1.

Οι διακόπτες S1 έως S4 ρυθμίζονται μέσω δύο πλήκτρων για την μοναδιαία αύξηση και μείωση της τιμής τους. Κάθε διακόπτης δέχεται τις ακόλουθες τιμές:

- Το πλήκτρο S1 παίρνει τις τιμές : (0 έως 9) x 100
- Το πλήκτρο S2 παίρνει τις τιμές : (0 έως 9) x 10
- Το πλήκτρο S3 παίρνει τις τιμές : (0 έως 9) x 1
- Το πλήκτρο S4 παίρνει τις τιμές : (0 έως 7) x  $10^{-(0S1+S2+S3)}$
- Το πλήκτρο S5 παίρνει τις τιμές : (0 έως 9)

Πίνακας 3.1 : Ρύθμιση εύρους μέτρησης συχνότητας ελεγκτή

Switch S4 in Pos.	Nominal freq. $f_n$ (S1 + S2 + S3)	0-Point of the Output Characteristic
0	$x 10^0$ Hz	0 mA
1	$x 10^{-1}$ Hz	0 mA
2	$x 10^{-2}$ Hz	0 mA
3	$x 10^{-3}$ Hz	0 mA
4	$x 10^0$ Hz	4 mA
5	$x 10^{-1}$ Hz	4 mA
6	$x 10^{-2}$ Hz	4 mA
7	$x 10^{-3}$ Hz	4 mA

Ο ορισμός του ενεργού εύρους συχνοτήτων το οποίο θα προσαρμοστεί αναλογικά στο σήμα εξόδου του controller καθορίζεται μέσω της επιλογής της μέγιστης συχνότητας  $f_n$ . Η συχνότητα  $f_n$  καθορίζεται από τους διακόπτες S1 έως και S4 ως εξής:

Αθροίζονται οι τιμές των διακοπών S1 έως και S3 και το άθροισμά τους πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή ο οποίος παίρνει τιμές από 1 έως  $10^{-3}$  ανάλογα με την επιλογή του διακόπτη S4. Η αντιστοιχία των τιμών του πολλαπλασιαστή σε σχέση με την τιμή του διακόπτη S4 φαίνεται στον Πίνακα 3.1.

Για καλύτερη κατανόηση της μεθόδου ρύθμισης του ενεργού εύρους συχνοτήτων παρατίθεται το ακόλουθο παράδειγμα:

Έστω ότι οι διακόπτες S1 έως S4 έχουν τις ακόλουθες τιμές:

- S1 : 3
- S2 : 5
- S3 : 7
- S4 : 6

Σύμφωνα με την ακόλουθη Εξίσωση 3-1 η οποία ρυθμίζει το εύρος συχνοτήτων :

$$\text{Εξίσωση 3-1 : } f_n = (S1 + S2 + S3) \times S4$$

Το εύρος συχνοτήτων που έχει επιλεγεί είναι  $f_n : 357 \times 10^{-2} \text{ Hz} = 3,57\text{Hz}$

Αντίστοιχα αν ο διακόπτης S4 είχε την ρύθμιση 2 θα είχαμε το ίδιο εύρος συχνοτήτων με την διαφορά ότι το σήμα εξόδου θα ήταν 0-20mA και όχι 4-20mA.

Ο ελεγκτής WEM Ex-FSU παρέχει επίσης τη δυνατότητα ρύθμισης του χρονικού ορίου απόκρισης του σήματος εξόδου,  $\tau$ , κατά την μεταβολή του σήματος εισόδου. Το χρονικό όριο ρυθμίζεται από τον διακόπτη S5 σύμφωνα με την παρακάτω Εξίσωση 3-2:

$$\text{Εξίσωση 3-2 : } \tau = \frac{2^{N+1}}{f_n}$$

όπου N η τιμή που έχει επιλεγεί μέσω του διακόπτη S5.

Το συγκεκριμένο όργανο, όπως και ο επαγωγικός αισθητήρας διαθέτει λυχνία τύπου LED, η οποία φωτίζεται κατά τη διέγερση του μαγνητικού πεδίου του μεταλλάκτη.

### 3.4 Ψηφιακό ενδεικτικό όργανο

Ο ελεγκτής δεν διαθέτει ενδεικτική οθόνη για την άμεση ανάγνωση πληροφορίας του συνδεδεμένου μεταλλάκτη, δηλαδή στην παρούσα εφαρμογή της τιμής της συχνότητας διέγερσης του επαγωγικού αισθητήρα NBN 8-18GM50-E2. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό ενδεικτικό όργανο, το οποίο επεξεργάζεται το αναλογικό σήμα εντάσεως του ελεγκτή, το οποίο είναι διαθέσιμο μέσω των επαφών 12 – 13 όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-9

Το ψηφιακό ενδεικτικό είναι της Γερμανικής εταιρίας JUMO, τύπου PD4e-48/M (Σχήμα 3-11), το οποίο μετατρέπει το αναλογικό σήμα εισόδου εντάσεως 0 έως 20 mA σε ποσοστιαία ψηφιακή ένδειξη στην περιοχή 0 έως 100%. Στην παρούσα εφαρμογή και σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο εδάφιο 3.2.3 το σήμα εντάσεως που δέχεται το ενδεικτικό είναι ανάλογο της συχνότητας διέγερσης του μεταλλάκτη. Κατά συνέπεια το ενδεικτικό ποσοτικοποιεί το ενεργό εύρος συχνοτήτων στην περιοχή 0 έως 100%.



Σχήμα 3-11: Ψηφιακό ενδεικτικό JUMO, τύπου PD4e-48/M

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου συνοψίζονται ως εξής (Digital indicator with linearisation and alarm contacts):

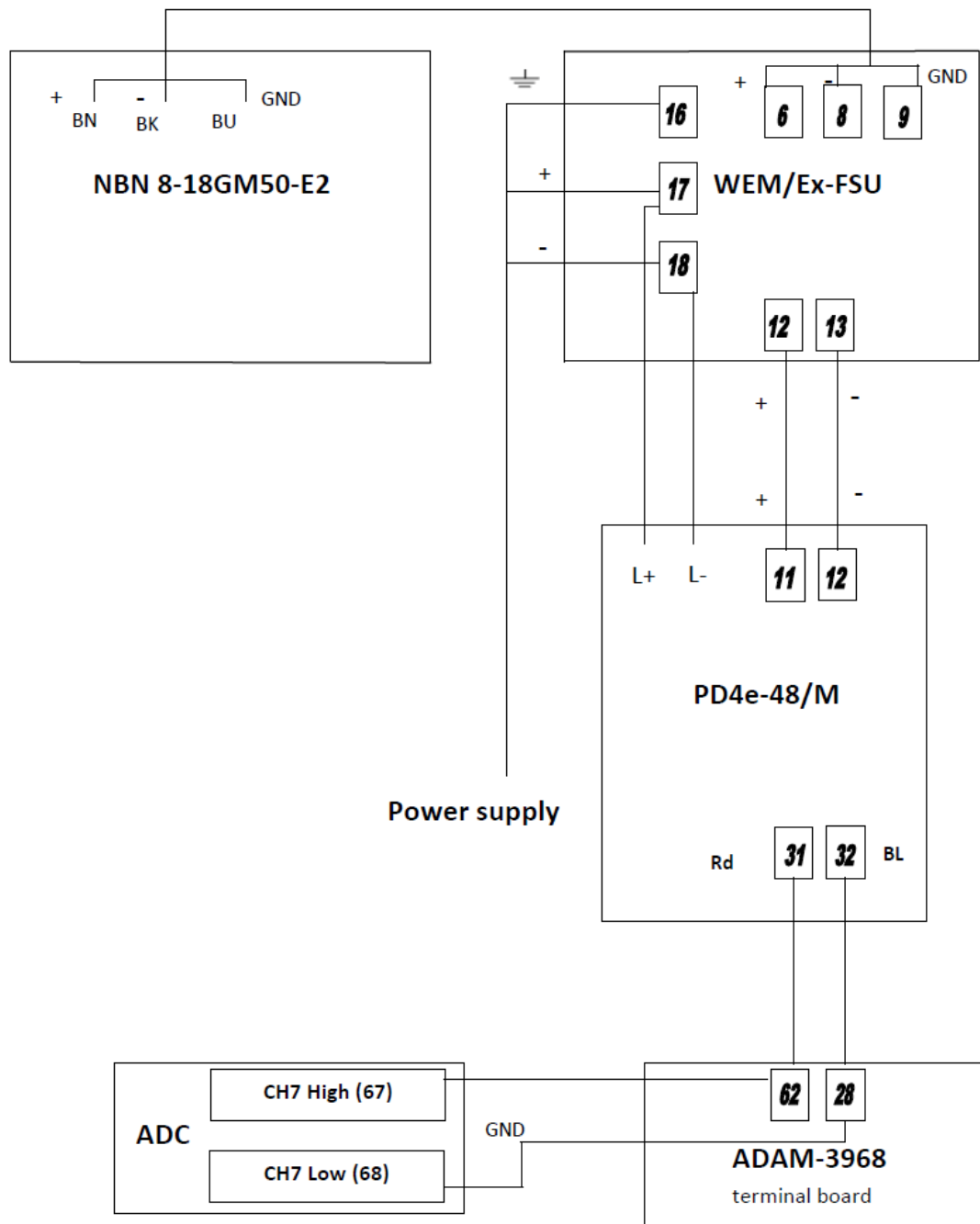
- Είσοδος: Ηλεκτρικό σήμα εντάσεως 0 – 20 mA (δύο καλωδίων)
- Έξοδος: Ηλεκτρικό σήμα τάσεως 0 –10 V (δύο καλωδίων) γραμμικής αντιστοιχίας με το μετρούμενο σήμα
- Τροφοδοσία: 110-240 V AC

Η τροφοδοσία των 220 V AC γίνεται στις θέσεις L+, L- , το σήμα του μετατροπέα μεταφέρεται στις θέσεις 11-12 και το ηλεκτρικό σήμα εξόδου μετράται στις θέσεις 31-32 (Σχήμα 3-12).

Επιπλέον πέραν της συνεχούς ένδειξης το όργανο παρέχει και αναλογικό σήμα εξόδου στην περιοχή 0 έως 20 mA. Το σήμα αυτό μέσω μίας ωμικής αντίστασης 472

Οhm μετατρέπεται σε σήμα τάσεως το οποίο καταλήγει στο κανάλι 7 της αναλογικής εισόδου του ADC.

Η συνολική συνδεσμολογία μεταξύ του επαγωγικού αισθητήρα, του ελεγκτή, του ενδεικτικού οργάνου και του ADC παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-12.



Σχήμα 3-12 : Μονογραμμικό διάγραμμα διασύνδεσης κυκλώματος επαγωγικού αισθητήρα

Όπως επεξηγήθηκε και για τον μετατροπέα, εκτός της σωστής συνδεσμολογίας είναι απαραίτητος και ο σωστός προγραμματισμός του οργάνου για το επιθυμητό αποτέλεσμα. Οι δυνατότητες προγραμματισμού του εσωτερικού σήματος του ενδείκτη παρουσιάζονται στον Πίνακας 3.2:

**Πίνακας 3.2 : Δυνατότητες προγραμματισμού του εσωτερικού σήματος του ενδείκτη**

Input signal	Switch setting		
	S1	S2	S3
0 - 10 V	off	off	a
0 - 20 mA	on	on	a
4 - 20 mA	on	on	b
Range span	S4	S5	
1000 digit	off	off	
2000 digit	on	off	
3000 digit	off	on	
4000 digit	on	on	
Range shift	S6	S7	
-2000 to -1000 digit	off	off	
-1000 to 0 digit	on	off	
0 to 1000 digit	off	on	
1000 to 2000 digit	on	on	

Κατά την παραγγελία του συγκεκριμένου καταγραφικού, επιλέγησαν σαν προεπιλεγμένη τιμή εύρους σήματος εντάσεως 0-20mA τόσο για την είσοδο, όσο και για την έξοδό του.

### 3.5 Βαθμονόμηση του μεταλλάκτη NBN 8-18GM50-E2

Στο παρόν εδάφιο θα πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση του επαγωγικού αισθητήρα, η οποία αποσκοπεί στην διερεύνηση της ορθής του λειτουργίας και πραγματοποιείται συγκρίνοντας τις μετρήσεις του με αυτές ενός οργάνου μεγαλύτερης ακρίβειας, ή χρησιμοποιώντας ένα πρότυπο αναφοράς οι ιδιότητες του οποίου έχουν προσδιοριστεί με ακρίβεια.

Για την βαθμονόμηση του επαγωγικού αισθητήρα χρησιμοποιήθηκε πειραματική διάταξη, η οποία κατασκευάστηκε εξ' ολοκλήρου στα πλαίσια της παρούσας Δ.Ε και πραγματοποιήθηκε οπτικά αξιοποιώντας το στροβοσκοπικό φαινόμενο μέσω ενός στροβοσκοπικού δίσκου.

Η επιλογή βαθμονόμησης μέσω του στροβοσκοπικού δίσκου έγκειται στην δυνατότητα οπτικής μέτρησης των στροφών του κινητήρα και επομένως της



συχνότητας περιστροφής του, χωρίς παρέμβαση στην περιστροφή του κινούμενου άξονά του.

Το στροβοσκοπικό φαινόμενο είναι ένα οπτικό φαινόμενο επαλληλίας που προκαλείται όταν συνεχής κίνηση αντιπροσωπεύεται από μία σειρά σύντομων στιγμιαίων δειγμάτων. Αυτό συμβαίνει όταν η προβολή ενός κινούμενου αντικείμενου αντιπροσωπεύεται από μια σειρά σύντομων δειγμάτων και το κινούμενο αντικείμενο βρίσκεται σε περιστροφική ή άλλη κυκλική κίνηση, σε ρυθμό πλησίον του ρυθμού λήψης των δειγμάτων αυτών. (δειγματοληψίας των διακριτών στιγμιότυπων – δειγμάτων της κίνησης). Για μεγαλύτερη κατανόηση παρατίθεται σαν παράδειγμα στροβοσκοπικού φαινομένου το "wagon-wheel effect", κατά το οποίο στην παρακολούθηση βιντεοσκόπησης φαίνονται οι ρόδες των τροχών οχημάτων να στρέφονται σε φορά αντίθετη της κίνησης του οχήματος.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σημαντική παράμετρος στο στροβοσκοπικό φαινόμενο είναι ο ρυθμός της κίνησης, και ο ρυθμός δειγματοληψίας. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι ένα αντικείμενο περιστρέφεται με 30 στροφές ανά δευτερόλεπτο. Αν παρακολουθήσουμε την κίνησή του με παλλόμενο φως, δηλαδή με μια σειρά σύντομων αναλαμπών σε αντίστοιχες αναλαμπές το δευτερόλεπτο, κάθε αναλαμπή φωτίζει το αντικείμενο στην ίδια θέση στον περιστροφικό του κύκλο, έτσι ώστε το αντικείμενο φαίνεται να είναι στάσιμο. Επιπλέον, στην συχνότητα των ανωτέρω αναλαμπών ανά δευτερόλεπτο, η όραση εξομαλύνει την ακολουθία των αναλαμπών, με αποτέλεσμα η εικόνα που αντιλαμβανόμαστε να είναι συνεχής.

Αν το ίδιο περιστρεφόμενο αντικείμενο (30 rpm) προβάλλεται με 31 αναλαμπές ανά δευτερόλεπτο, τότε κάθε αναλαμπή θα βρίσκεται σε διαφορετικό σημείο του κύκλου περιστροφής. Οπότε θα υπάρχουν 31, και όχι 30, αναλαμπές έως το αντικείμενο βρεθεί στην αρχική του θέση, με αποτέλεσμα να προκληθεί το φαινόμενο το αντικείμενο να φαίνεται να περιστρέφεται προς τα πίσω, με συχνότητα μία στροφή το δευτερόλεπτο.

Το ίδιο αποτέλεσμα, αλλά με αντίθετη φορά, προκύπτει αν το αντικείμενο προβάλλεται με 29 στροφές ανά δευτερόλεπτο. Τότε, κάθε αναλαμπή θα βρίσκεται λίγο αργότερα στον περιστροφικό του κύκλο, και θα φαίνεται να περιστρέφεται αργά προς τα εμπρός.

Για να αξιοποιήσουμε το στροβοσκοπικό φαινόμενο στην βαθμονόμηση του επαγωγικού αισθητήρα, θα χρειαστούμε έναν στροβοσκοπικό δίσκο.

Ο στροβοσκοπικός δίσκος είναι ένας τυπωμένος δίσκος ο οποίος διαθέτει έναν αριθμό ομόκεντρων δακτυλίων που περιέχουν ο καθένας διαφορετικό αριθμό λευκών και μαύρων τμημάτων. Όταν ο δίσκος τοποθετείται σε περιστρεφόμενο

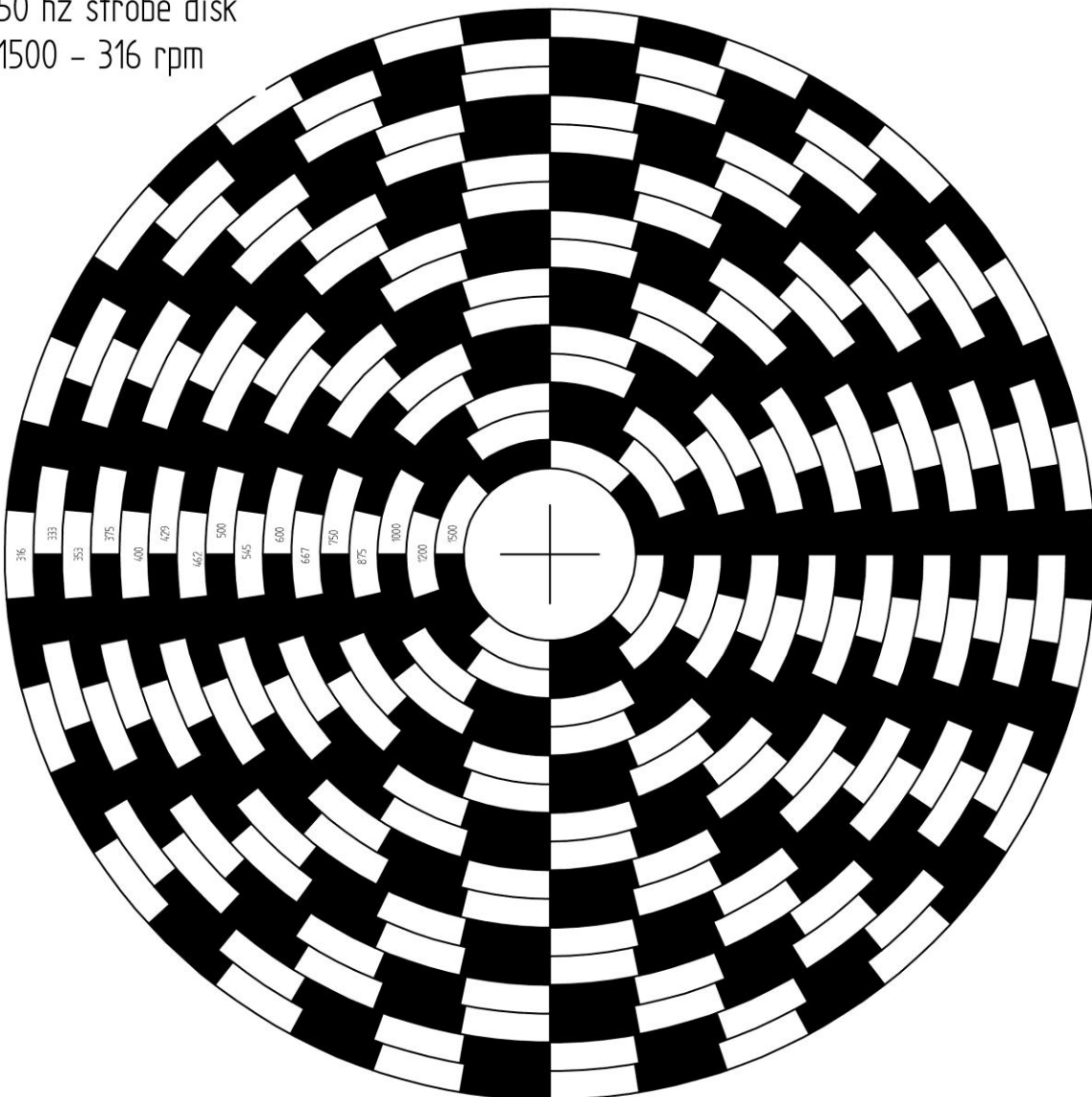
άξονα και φωτίζεται σε μια γνωστή συχνότητα, η ταχύτητα περιστροφής του μπορεί να προσδιοριστεί σημειώνοντας ποιος ομόκεντρος δακτύλιος παρουσιάζεται οπτικά να παραμένει σε ακινησία, ή να περιστρέφεται πολύ αργά, ώστε πρακτικά να θεωρείται ακίνητος.

### 3.5.1 Διαδικασία βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση του αισθητήρα επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί στην περιοχή στροφών από 300 έως 1300rpm, εφόσον αυτές είναι οι συνθήκες λειτουργίας ενός ηλεκτρικού κινητήρα.

Ο στροβοσκοπικός δίσκος που επιλέχθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-13.

50 hz strobe disk  
1500 – 316 rpm



Σχήμα 3-13: Στροβοσκοπικός δίσκος, για φωτισμό συχνότητας 50 Hz

Ο συγκεκριμένος δίσκος αρχικά τοποθετήθηκε ομόκεντρα σε δίσκο από υλικό Plexiglas και στη συνέχεια προσαρτήθηκε επίσης ομόκεντρα στον άξονα περιστροφής του ηλεκτρικού ασύγχρονου κινητήρα της πειραματικής διάταξης. Ο ηλεκτρικός κινητήρας συνδέθηκε με ένα μονοφασικό σταθεροποιητή τάσης (βάριακ), ώστε να επιλέγεται η επιθυμητή τάση τροφοδοσίας, άρα και συχνότητα περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα.

Η διάταξη της πειραματικής εγκατάστασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-14

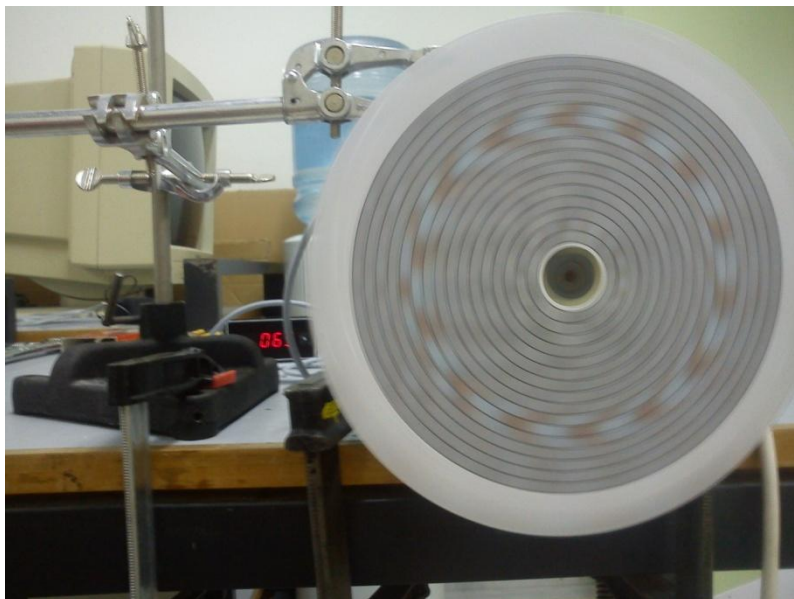


**Σχήμα 3-14: Πειραματική εγκατάσταση βαθμονόμησης επαγωγικού αισθητήρα**

Όπως φαίνεται ο επαγωγικός αισθητήρας έχει τοποθετηθεί στην ορθή απόσταση σωστής λειτουργίας του, ενώ στον στροβοσκοπικό δίσκο έχουν προσαρτηθεί δύο εξαγωνικοί κοχλίες διάστασης M9, οι οποίοι λειτουργούν ως διεγέρτες του επαγωγικού αισθητήρα. Οι κοχλίες έχουν τοποθετηθεί στην εξωτερική περιφέρεια του Plexiglas δίσκου και σε αντιδιαμετρικές μεταξύ τους θέσεις έτσι ώστε να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή της μάζας επί του δίσκου και να μη δημιουργούνται ταλαντώσεις λόγω έκκεντρων φορτίων περιστροφής. Ο αισθητήρας, ο controller και το ενδεικτικό έχουν συνδεσμοποιηθεί σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο εδάφιο §3.4.

Στο Σχήμα 3-15 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη σε κατάσταση λειτουργίας. Παρατηρούμε ότι ενώ ο δίσκος περιστρέφεται οι τομείς ενός κυκλικού δακτύλιου διακρίνονται με ευκρίνεια καθώς οπτικά παραμένουν σταθεροί. Αντίστοιχα οι τομείς των δύο δακτύλιων εκατέροθεν αυτού διακρίνονται αλλά όχι τόσο ευκρινώς καθώς αντιστοιχούν σε παραπλήσιο αριθμό στροφών. Τέλος οι τομείς των

υπόλοιπων δακτυλίων δεν διακρίνονται καθώς αντιστοιχούν σε ρυθμό περιστροφής σημαντικά διάφορο με το ρυθμό περιστροφής του δίσκου.



**Σχήμα 3-15: Λειτουργία του στροβοσκοπικού δίσκου**

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι για να λειτουργήσει το στροβοσκοπικό φαινόμενο το οποίο περιγράφηκε παραπάνω ο δίσκος θα πρέπει να παρατηρείται υπό φωτισμό συχνότητας 50 Hz. Για το σκοπό αυτό η πειραματική διαδικασία βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε σε χώρο με αποκλειστικά τεχνητό φωτισμό από λάμπες φθορισμού.

Γνωρίζοντας λοιπόν τις συγκεκριμένες στροφές που αντιστοιχούν στον εκάστοτε δακτύλιο που παραμένει οπτικά σταθερός, και έχοντας ταυτόχρονα την ένδειξη του αισθητήρα στο ενδεικτικό όργανο, μπορούμε να προχωρήσουμε στην επιβεβαίωση της βαθμονόμησης του.

### **3.5.2 Επεξεργασία μετρήσεων**

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για ρυθμό περιστροφής από 350 έως 1250 στροφές ανά λεπτό οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 3.3.

**Πίνακας 3.3 : Βαθμονόμηση επαγωγικού αισθητήρα**

<b><u>Βαθμονόμηση επαγωγικού αισθητήρα</u></b>			
<b>Περιοχή μετρήσεων 316 έως 1000 στροφές</b>			
<b>Στροβοσκοπικός δίσκος (rpm)</b>	<b>Ένδειξη καταγραφικού (%)</b>	<b>Ρύθμιση κλίμακας (Hz)</b>	<b>Ένδειξη επαγωγικού αισθητήρα (rpm)</b>
320	26,0	0-40	347
330	29,9	0-40	399
375	32,0	0-40	427
400	32,4	0-40	432
462	38,0	0-40	507
475	39,0	0-40	520
480	40,0	0-40	533
500	42,3	0-40	564
543	43,1	0-40	575
560	46,3	0-40	617
600	50,7	0-40	676
750	63,6	0-40	848
800	65,8	0-40	877
875	72,1	0-40	961
880	73,4	0-40	979
920	76,0	0-40	1013
950	78,5	0-40	1047
990	81,1	0-40	1081
1000	84,4	0-40	1125
1080	89,2	0-40	1189
1170	94,3	0-40	1257

Βασικός σκοπός του ελέγχου της βαθμονόμησης του επαγωγικού αισθητήρα είναι να διαπιστώσουμε αν ο ρυθμός περιστροφής ο οποίος ανιχνεύεται προσεγγίζει ικανοποιητικά τον πραγματικό αριθμό περιστροφής. Για το σκοπό αυτό από τα πειραματικά δεδομένα του Πίνακα 3.3 εκτιμούμε την ευθεία αναδρομής:

$$\text{Εξίσωση 3-3 : } f_{\pi} = \alpha_0 + \alpha_1 \times f_m$$

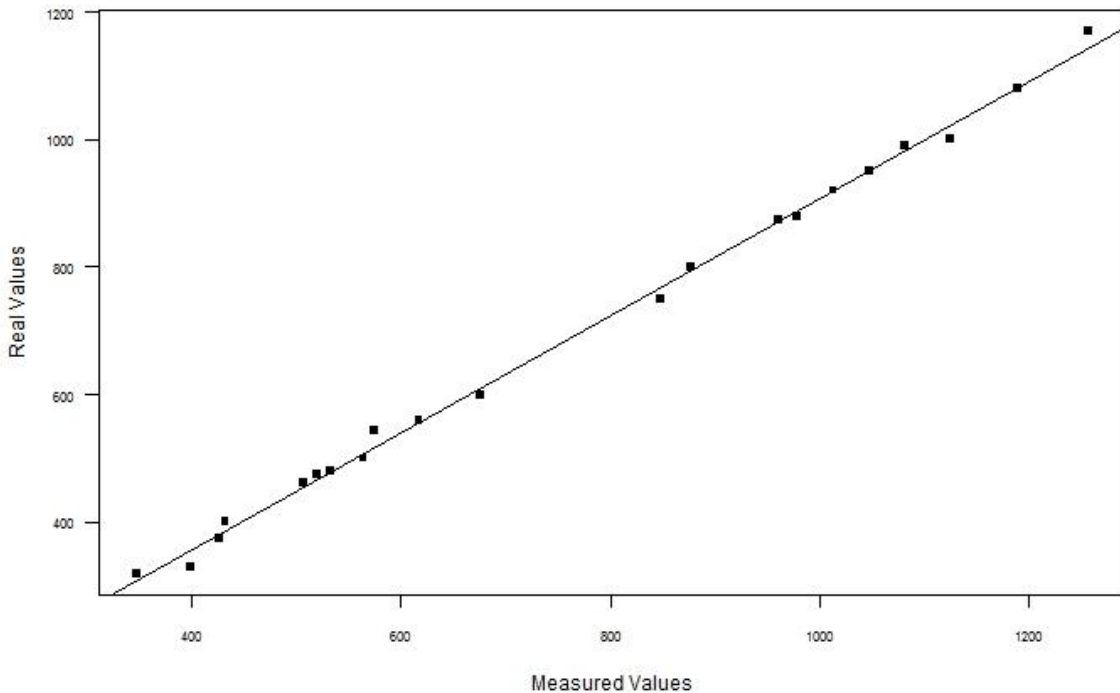
Όπου:

- $f_{\pi}$ : η πραγματική συχνότητα περιστροφής
- $f_m$ : η μετρούμενη συχνότητα περιστροφής
- $\alpha_0, \alpha_1$ : οι παράμετροι της αναδρομής.

Η προσαρμογή έγινε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων με χρήση του στατιστικού πακέτου R και της συνάρτησης fit, η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια της Δ.Ε (Γ.Μυλωνάκης, 2011) και οι παράμετροι  $\alpha_0, \alpha_1$  υπολογίσθηκαν ως -9.727 και 0.918 αντίστοιχα. Κατά συνέπεια η Εξίσωση 3-3 διαμορφώνεται ως εξής:

$$\text{Εξίσωση 3-4 : } f_{\pi} = -9.727 + 0.918 \times f_m$$

Τα πειραματικά δεδομένα της βαθμονόμησης και η συνάρτηση αναδρομής απεικονίζονται στο Σχήμα 3-16 . Οι ελλείψεις εμπιστοσύνης των παραμέτρων της αναδρομής σε επίπεδα σημαντικότητας 5% και 1% παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-17.



**Σχήμα 3-16: Βαθμονόμηση επαγωγικού αισθητήρα, Περιοχή λειτουργίας 300 έως 1200rpm**

Κατά τον έλεγχο βαθμονόμησης υπολογίσθηκαν επίσης οι τιμές των δεικτών R και RMS. Ο δείκτης R, συντελεστής πολλαπλής συσχέτισης, υπολογίσθηκε  $0.9987 \approx 1$ , φανερώνοντας υψηλή γραμμική συσχέτιση, ενώ ο δείκτης RMS, μέση τετραγωνική απόκλιση, υπολογίσθηκε 2.669.

Τα εκτιμώμενα τυπικά σφάλματα της κλίσεως  $\alpha_1$ , και του όρου  $\alpha_0$  της ευθείας αναδρομής υπολογίζονται και οι τιμές τους είναι:

- $se(\alpha_0) = 8.63$
- $se(\alpha_1) = 0.01062$

Κατόπιν οι παράμετροι  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  της αναδρομής υποβάλλονται σε στατιστικούς ελέγχους, ώστε να εξακριβωθεί αν στατιστικά ισχύει  $\alpha_0 = 0$  και  $\alpha_1 = 1$ .

- Στατιστικός έλεγχος παραμέτρου  $\alpha_0$

Οι υποθέσεις που εξετάζονται είναι οι εξής:

- $H_0: \alpha_0 = 0$  (μηδενική υπόθεση)
- $H_1: \alpha_0 \neq 0$  (εναλλακτική υπόθεση)

Τιμή σύγκρισης  $t_0 = (\alpha_0 - 0) / se(\alpha_0)$

- Στατιστικός έλεγχος παραμέτρου  $\alpha_1$

Οι υποθέσεις που εξετάζονται είναι οι εξής:

- $H_0: \alpha_1 = 1$  (μηδενική υπόθεση)
- $H_1: \alpha_1 \neq 1$  (εναλλακτική υπόθεση)

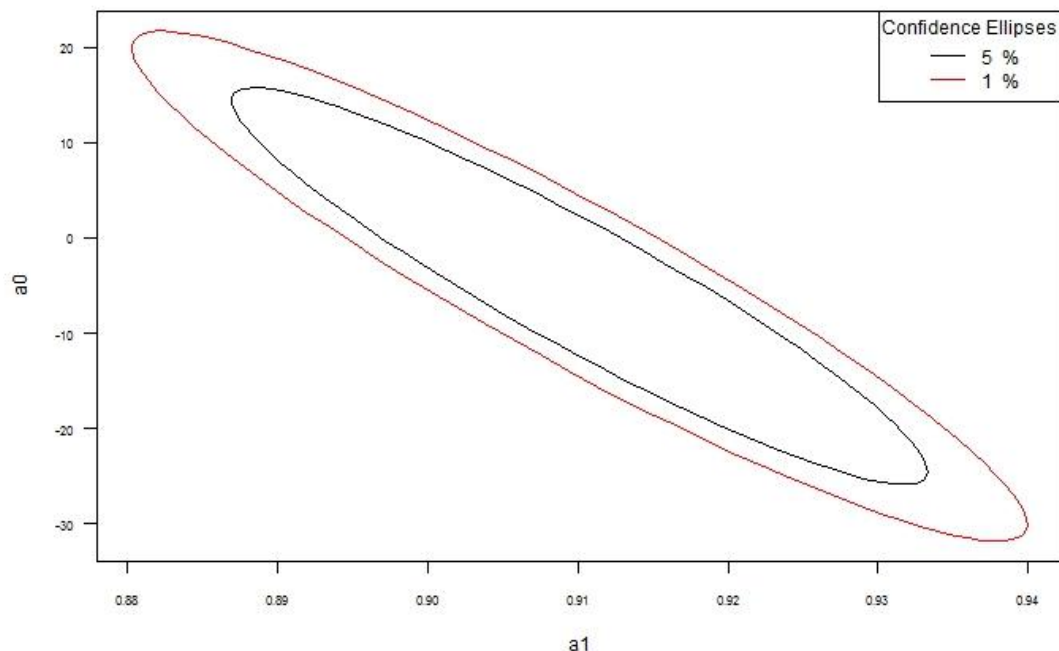
Τιμή σύγκρισης  $t_0 = (\alpha_1 - 0) / se(\alpha_1)$

Επιλέγουμε δύο επίπεδα σημαντικότητας,  $\alpha=5\%$  για αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης και  $\alpha=1\%$  για απόρριψη αυτής.

Οι τιμές συγκρίσεως και ελέγχου είναι οι παρακάτω:

- $t\alpha_1 = -7.721$
- $t\alpha_0 = -1.127$
- $t_{c0.95} = 2.093$
- $t_{c0.99} = 2.861$

Συμπεραίνουμε ότι για την παράμετρο  $\alpha_0$  ικανοποιείται ο στατιστικός έλεγχος σε επίπεδο σημαντικότητας 5%, ενώ για την παράμετρο  $\alpha_1$  η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται και σε επίπεδο σημαντικότητας 1% και κατά συνέπεια απορρίπτεται οριστικά, όπως προκύπτει και από τις ελλείψεις εμπιστοσύνης του Σχήμα 3-17.



**Σχήμα 3-17: Βαθμονόμηση επαγωγικού αισθητήρα, ελλείψεις εμπιστοσύνης, Περιοχή λειτουργίας 300 έως 1200rpm**



Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης με τον στροβοσκοπικό δίσκο συμπεραίνεται ότι ο επαγωγικός αισθητήρας μέτρησης συχνότητας περιστροφής εμφανίζει μία στατιστικά σημαντική διαφορά (περίπου 10%) από τις ενδείξεις του δίσκου. Εντούτοις δεδομένου ότι η συγκεκριμένη μέθοδος ενδέχεται να εμπεριέχει σημαντικό σφάλμα κατά την ανάγνωση του στροβοσκοπικού δίσκου αποφασίσθηκε να γίνει και δεύτερος έλεγχος της βαθμονόμησης με χρήση στροφόμετρου χειρός.

### 3.5.3 Βαθμονόμηση του μεταλλάκτη με στροφόμετρο

Κατά την συγκεκριμένη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκε στροφόμετρο χειρός της εταιρείας smiths (Σχήμα 3-18), το οποίο τοποθετήθηκε σε επαφή με τον άξονα στροφής του κινητήρα, παίρνοντας τιμές περιστροφής του. Γνωρίζοντας την διάμετρο του άξονα του κινητήρα, η οποία είναι 7,45cm, μπορούμε να υπολογίσουμε την περίμετρό του, η οποία προκύπτει ίση με 0,234m.



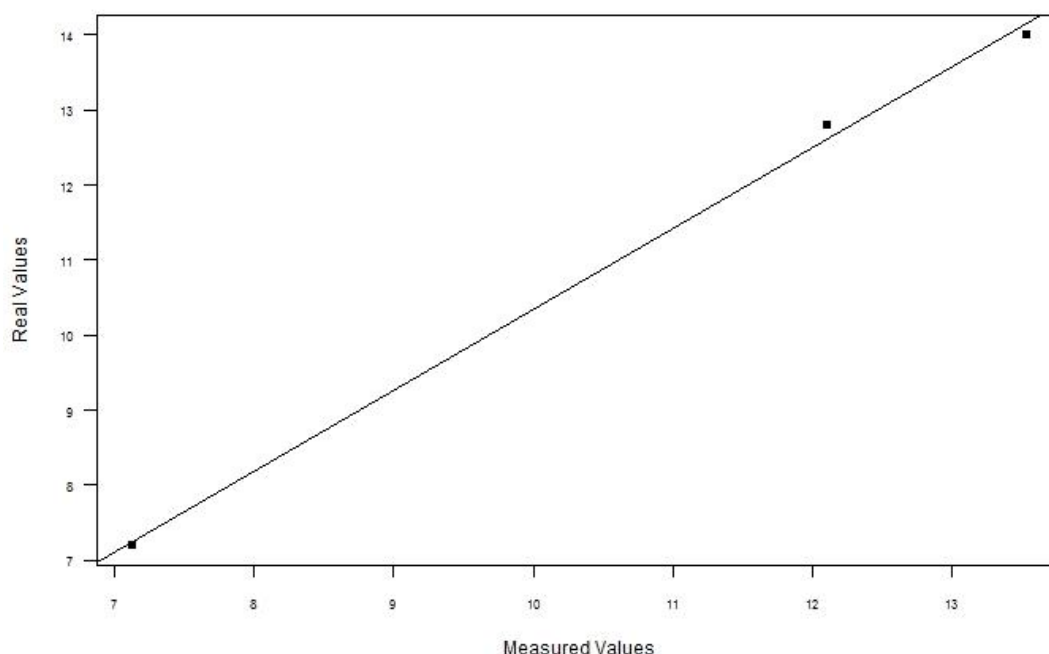
Σχήμα 3-18 : Στροφόμετρο χειρός της εταιρείας Smiths

Αξιοποιώντας την περίμετρο του άξονα, για την επεξεργασία των μετρήσεων προκύπτει ο παρακάτω Πίνακας 3.4, και το διάγραμμα στο Σχήμα 3-19:

Στο σημείο αυτό χρειάζεται να επισημανθεί ότι το περιορισμένο πλήθος μετρήσεων οφείλεται στο γεγονός ότι το φορτίο το οποίο επιβάλλεται στον κινητήρα λόγω της επαφής του στροφομέτρου έχει ως άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής του. Η αδυναμία διατήρησης σταθερού ρυθμού περιστροφής για το απαραίτητο χρονικό διάστημα μίας μέτρησης έχει ως αποτέλεσμα οι αξιόπιστες μετρήσεις με χρήση στροφομέτρου να είναι περιορισμένες.

**Πίνακας 3.4 : Βαθμονόμηση επαγωγικού αισθητήρα με στροφόμετρο χειρός**

<b><u>Βαθμονόμηση επαγωγικού αισθητήρα με στροφόμετρο χειρός</u></b>			
Περιοχή μετρήσεων 400 έως 1000 στροφές			
<b>Στροφόμετρο χειρός (Hz)</b>	<b>Ένδειξη καταγραφικού (%)</b>	<b>Ρύθμιση κλίμακας (Hz)</b>	<b>Ένδειξη επαγωγικού αισθητήρα (Hz)</b>
7,125	18	0-30	7,2
12,11	32	0-30	12,8
13,54	35	0-30	14



**Σχήμα 3-19: Βαθμονόμηση επαγωγικού αισθητήρα με στροφόμετρο χειρός**

Παρατηρούμε ότι σε αυτή την περίπτωση οι μετρήσεις του στροφομέτρου χειρός και οι ενδείξεις του επαγωγικού αισθητήρα πρακτικά ταυτίζονται ενώ η στατιστική επεξεργασία κατέδειξε αποδοχή των μηδενικών υποθέσεων για τις παραμέτρους  $\alpha_0$  και  $\alpha_1$  της αναδρομής.

Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα από τον έλεγχο της βαθμονόμησης και με τις δύο μεθοδολογίες αποφασίστηκε να μην εφαρμοσθεί νέα βαθμονόμηση. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η πρώτη μέθοδος ενδέχεται να εμπεριέχει σημαντικό σφάλμα κατά την ανάγνωση του στροβοσκοπικού δίσκου. Για τον λόγο αυτό παρακάμπτουμε το αποτέλεσμα του στατιστικού ελέγχου της παραμέτρου  $\alpha_1$  και θεωρούμε ότι ο αισθητήρας λειτουργεί ικανοποιητικά και παρέχει ορθές ενδείξεις.

### 3.6 Μεταλλάκτης μετατοπίσεως – επιταχυνσιόμετρο.

Για την ένδειξη και καταγραφή των μηχανικών ταλαντώσεων που παράγονται κατά τη λειτουργία του κινητήρα χρησιμοποιείται επιταχυνσιόμετρο (vibration transducer) απ' ευθείας συνδεδεμένο με τον Η/Υ της πειραματικής διάταξης.

Το Επιταχυνσιόμετρο είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή που έχει την ικανότητα να μετρά δυνάμεις επιτάχυνσης. Αυτές οι δυνάμεις μπορεί να είναι στατικές, όπως είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, η δυναμικές όταν προκαλούνται – προέρχονται από αλλαγές στην ταχύτητα ή στη διεύθυνση της κίνησης (επιταχύνσεις, επιβραδύνσεις, στροφές).

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των επιταχυνσιομέτρων είναι τα εξής:

- Ευαισθησία, η σχέση ανάμεσα στη αλλαγή της τάσης του σήματος εισόδου και την αντίστοιχη του σήματος εξόδου, δηλαδή  $\frac{d(I_{out})}{d(I_{in})}$ , συνηθέστερες τιμές 1-100mV/g
- Ακρίβεια της τάξης του 1%
- Εγκάρσια ευαισθησία, συνηθέστερες τιμές 5%
- Πλάτος γραμμικότητας, η οποία ορίζεται ως το εύρος του σήματος για το οποίο η ευαισθησία του οργάνου παραμένει σταθερή
- Όρια λειτουργίας
- Εύρος συχνοτήτων

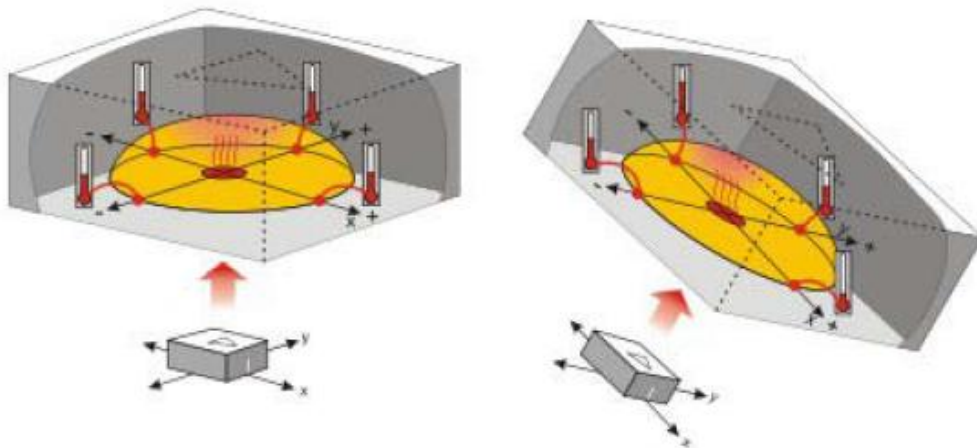
### 3.6.1 Αρχή λειτουργίας – γενικά στοιχεία

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να υλοποιηθεί ένα επιταχυνσιόμετρο. Ένας τρόπος είναι η αξιοποίηση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, χρησιμοποιώντας πιεζοκρύσταλο ο οποίος πιέζεται από μάζα ανάλογα της επιτάχυνσης που δέχεται αυτή και παράγει τάση λόγω πιεζοηλεκτρικού φαινομένου ανάλογη της πίεσης της οποίας δέχεται.

Ένας άλλος τρόπος είναι η μέτρηση αλλαγών στην χωρητικότητα ενός πυκνωτή. Η γεωμετρία του πυκνωτή μεταβάλλεται υπό την επίδραση δυνάμεων επιτάχυνσης με άμεσο αποτέλεσμα τη μεταβολή της χωρητικότητάς του. Μέτρηση της μεταβολής της χωρητικότητας του πυκνωτή παρέχει εκτίμηση για την επιβαλλόμενη επιτάχυνση.

Υπάρχουν και άλλοι τρόποι όπως η χρήση της αλλαγής της αντίστασης κάποιου υλικού ανάλογη της πίεσης που δέχεται, η χρήση φυσαλίδας ζεστού αέρα, και η χρήση των ιδιοτήτων του φωτός.

Το επιταχυνσιόμετρο φυσαλίδας ζεστού αέρα (Σχήμα 3-20) περιέχει έναν σφραγισμένο θάλαμο ο οποίος περιέχει την φυσαλίδα και ακριβώς από κάτω βρίσκεται ένα θερμαντικό στοιχείο. Στις τέσσερις διευθύνσεις υπάρχουν αισθητήρες θερμοκρασίας. Όταν ο αισθητήρας βρίσκεται σε επίπεδη επιφάνεια η ζεστή φυσαλίδα εισέρχεται στην κορυφή του θαλάμου χωρίς να επηρεάζει τους αισθητήρες θερμοκρασίας. Όταν ο αισθητήρας στραφεί προς μία κατεύθυνση τότε η φυσαλίδα μετακινείται προς την αντίθετη επηρεάζοντας και αυξάνοντας την τιμή του αντίστοιχου αισθητήρα. Οι τιμές των τεσσάρων αισθητήρων μετατρέπονται σε παλμούς, οι οποίοι αποκωδικοποιούνται από έναν μικροελεγκτή, παρέχοντας την τιμή της επιτάχυνσης για κάθε άξονα.



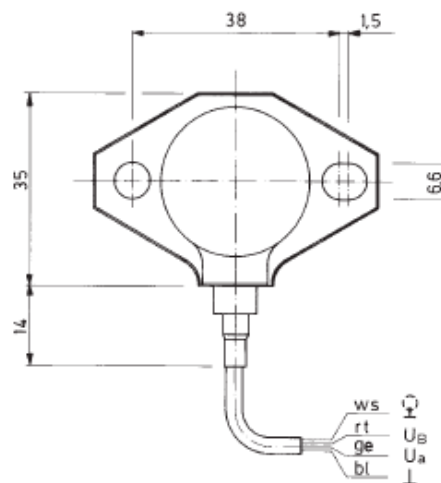
Σχήμα 3-20 : Επιταχυνσιόμετρο φυσαλίδας ζεστού αέρα

### 3.6.2 Ο μεταλλάκτης BS 10.022

Ο αισθητήρας είναι της Γερμανικής εταιρίας SCHMIDT Feintechnik, τύπου BS 10.022 (Σχήμα 3-21).



Σχήμα 3-21: Επιταχυνσιόμετρο της Γερμανικής εταιρίας SCHMIDT Feintechnik, τύπου BS 10.022



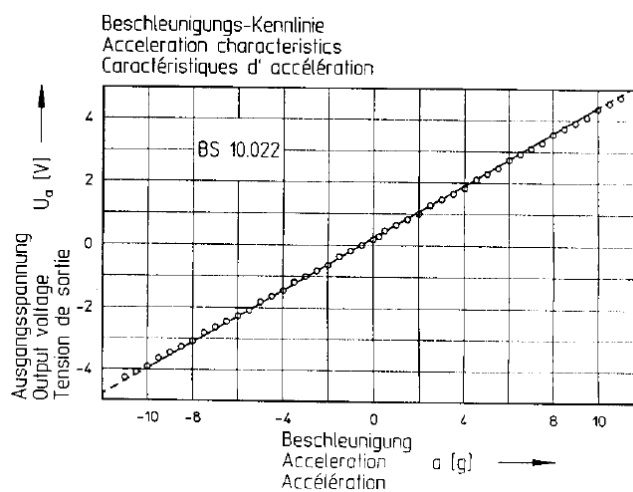
Σχήμα 3-22: Επιταχυνσιόμετρο της Γερμανικής εταιρίας SCHMIDT Feintechnik, τύπου BS 10.022, διαστάσεις.

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του συνοψίζονται ως εξής:

- Εύρος λειτουργίας : 0 έως  $\pm 10g$
- Ευαισθησία : 400 mV/g
- Εύρος συχνοτήτων : 2....15,000Hz
- Τροφοδοσία : 11 έως 26VDC
- Έξοδος: Ηλεκτρικό σήμα εντάσεως 0 –  $\pm 4V$

- Όριο ανίχνευσης : 0,0075g
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος εργασίας : -40 έως +85 °C
- Συσχέτιση μεταξύ του σήματος εξόδου σε V , και της επιταχύνσεως της βαρύτητας, g, όπως προκύπτει από την γραμμή τάσης του Σχήμα 3-23 ως εξής :

**Εξίσωση 3-5 :  $\gamma(g) = 2,5x(V)$ .**



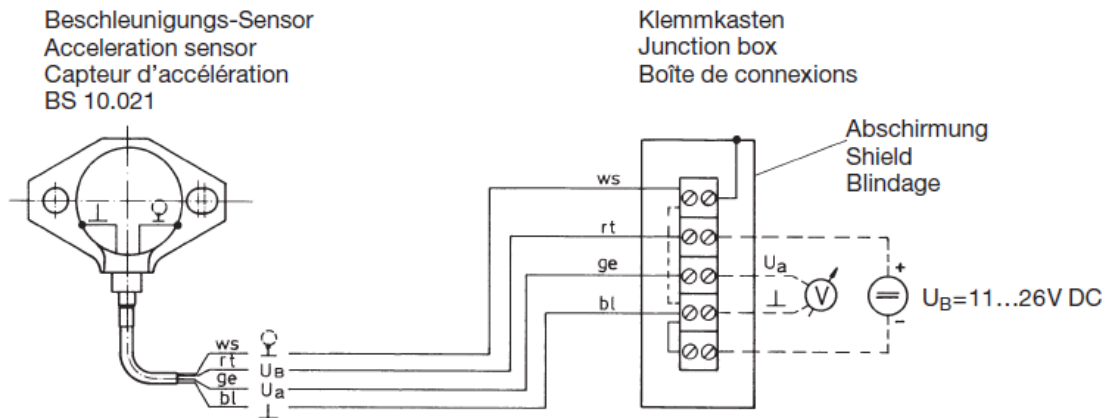
**Σχήμα 3-23: Συσχέτιση σήματος εξόδου τάσης (V) επιταχυνσιόμετρου με την επιτάχυνση της βαρύτητας (g)**

Λεπτομερέστατες πληροφορίες παρέχονται στο εγχειρίδιο του οργάνου BS\_10\_022.

### 3.6.3 Διασύνδεση μεταλλάκτη

Η διασύνδεση του μεταλλάκτη γίνεται αφενός με τροφοδοτικό, ώστε να παρέχουμε την απαιτούμενη και αναγκαία τάση λειτουργίας, και αφετέρου απευθείας στον Η/Υ, από τον οποίο χρησιμοποιώντας το κατάλληλο λογισμικό συλλέγονται τα αποτελέσματα μετρήσεων.

Η συγκεκριμένη συνδεσμολογία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-24 :

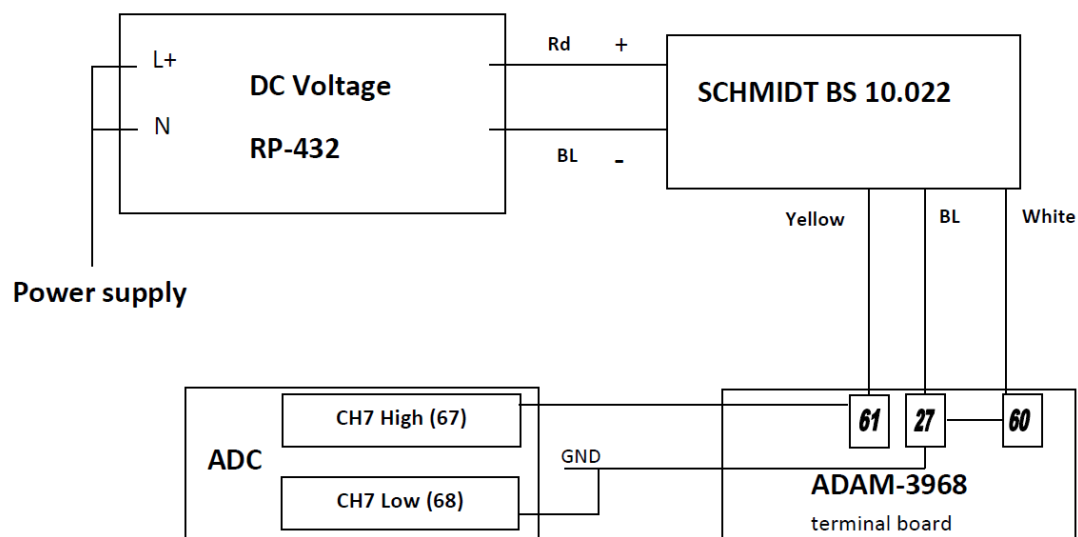


**Σχήμα 3-24: Συνδεσμολογία επιταχυνσιομέτρου**

Παρατηρούμε ότι η τροφοδοσία του επιταχυνσιομέτρου παρέχεται μέσω ενός τροφοδοτικού συνεχής τάσης από 11 έως 26V στις θέσεις 2 και 4 μέσω των καλωδίων χρώματος bl (αρνητικός πόλος) και rt (θετικός πόλος). Το σήμα εξόδου του επιταχυνσιομέτρου αντίστοιχα είναι διαθέσιμο μέσω τριών καλωδίων χρώματος bl, ge και ws. Το καλώδιο χρώματος ws επιπρόσθετα παρέχει και την απαραίτητη γείωση του μεταλλάκτη. Η ανάλυση του χρωματικού κώδικα των καλωδίων έχει ως εξής:

- bl : μπλε
- ws : άσπρο
- rt : κόκκινο
- ge : κίτρινο

Αναλυτικότερα η συνολική συνδεσμολογία του επιταχυνσιομέτρου BS 10.022 απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 3-25.



**Σχήμα 3-25: Μονογραμμικό διάγραμμα διασύνδεσης κυκλώματος επιταχυνσιομέτρου**

### 3.6.4 Βαθμονόμηση του επιταχυνσιομέτρου

Σκοπός της βαθμονόμησης του μεταλλάκτη είναι να διαπιστώσουμε αν οι τιμές της επιτάχυνσης τις οποίες καταγράφει είναι σημαντικά διαφορετικές από τις τιμές των πραγματικών επιταχύνσεων τις οποίες δέχεται.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε συσκευή ανάλυσης κοκκομετρίας η οποία έχει τη δυνατότητα ρύθμισης της επιτάχυνσης με την οποία πάλλεται. Η συσκευή η οποία χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρείας Retch με την εμπορική ονομασία AS 200 και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-26. (Operating Instructions for sieving machine type AS 200 control)



**Σχήμα 3-26 : Συσκευή ανάλυσης κοκκομετρίας Retch AS200**

Η συσκευή φέρει πλατφόρμα η οποία δονείται και στις τρεις διευθύνσεις με κύρια όμως διεύθυνση την κατακόρυφη. Για το σκοπό αυτό προσαρμόσθηκε κατάλληλα ο μεταλλάκτης επιταχύνσεως έτσι ώστε η ενεργός διεύθυνσή του να ταυτίζεται με τη διεύθυνση της μέγιστης δόνησης.

Ο μεταλλάκτης τοποθετήθηκε επί ειδικά διαμορφωμένης κοιλοδοκού στον κατακόρυφο άξονα της συσκευής, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-27.





**Σχήμα 3-27 : Τοποθέτηση του επιταχυνσιομέτρου στη συσκευή ανάλυσης κοκκομετρίας**

Η συσκευή ανάλυσης κοκκομετρίας διαθέτει στο κάτω μέρος της ενσωματωμένα πλήκτρα επιλογής επιτάχυνσης  $g$  ή πλάτους εφαρμοζόμενης ταλάντωσης. Επιλέχθηκε η ρύθμιση της επιτάχυνσης  $g$  σε τιμές 1 έως 10, όπως θα παρουσιασθεί παρακάτω στην διαδικασία βαθμονόμησης.

Για την καταγραφή του σήματος του μεταλλάκτη χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού LabVIEW και αναπτύχθηκε κατάλληλη εφαρμογή η οποία έχει ως σκοπό:

- Την ένδειξη και καταγραφή των τιμών του μεταλλάκτη
- Την εκτίμηση της επιτάχυνσης και της ταχύτητας του διεγέρτη
- Την επεξεργασία των τιμών της επιτάχυνσης μέσω ανάλυσης Fourier προκειμένου να αναλυθεί το φάσμα των συχνοτήτων του διεγέρτη

Αναλυτική παρουσίαση της δομής του προγράμματος και των λειτουργιών αυτού γίνεται στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας ΔΕ.

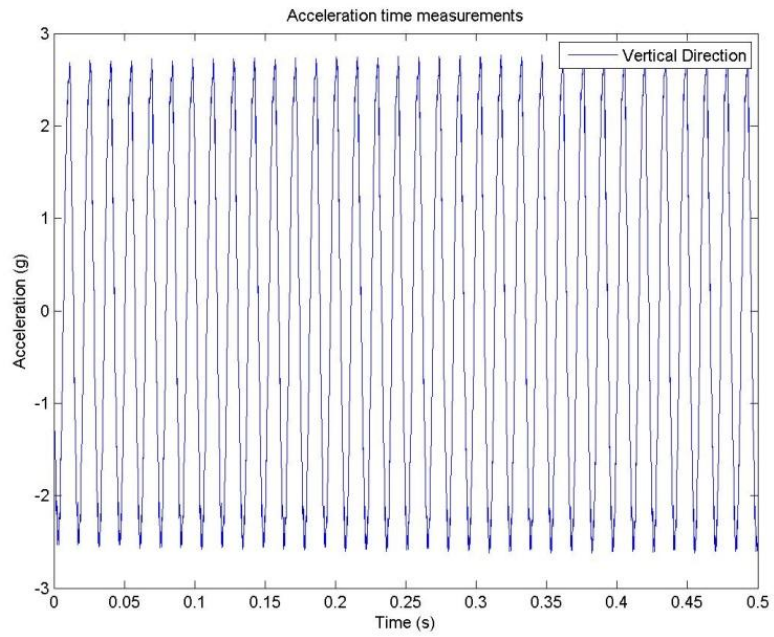
Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε σε τιμές επιτάχυνσης 2 έως 10g.

Προέκυψαν οι ακόλουθες τιμές, οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 3.5:

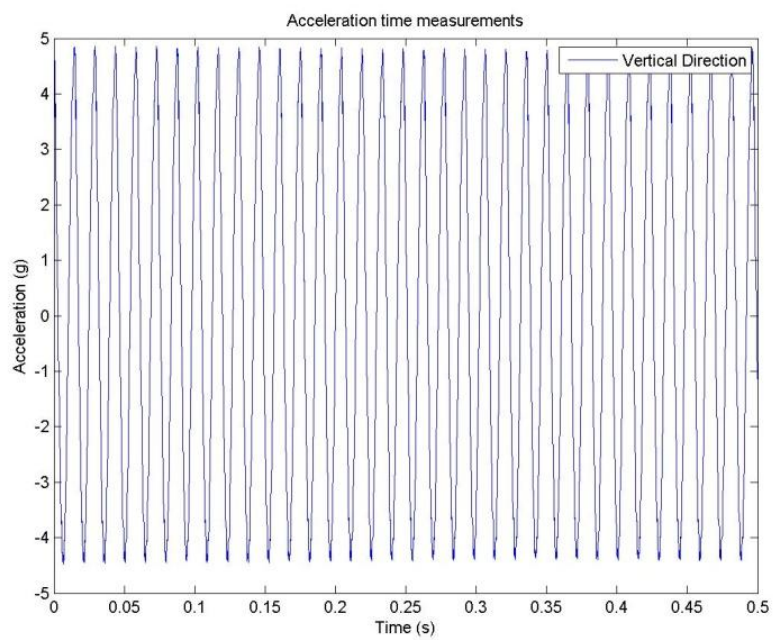
Πίνακας 3.5 : Βαθμονόμηση επιταχυνσιόμετρου, κατακόρυφος άξονας

<b>Βαθμονόμηση επιταχυνσιόμετρου (κατακόρυφος άξονας)</b>			
<u>Περιοχή μετρήσεων 2 έως 10 g</u>			
<b>Συσκευή ανάλυσης κοκκομετρίας</b>	<b>Ένδειξη επιταχυνσιόμετρου  (V)</b>	<b>Προσαρμογή δεδομένων  (g)</b>	<b>Απόκλιση</b>
2	0,69	1,701	17,5%
3	1,06	2,88	4,16%
4	1,56	3,9	2,5%
5	1,94	4,85	3,1%
6	2,37	5,92	1,35%
7	2,54	6,35	10,1%
8	2,85	7,21	10,9%
9	3,29	8,23	9,3%
10	3,92	9,8	2,05%

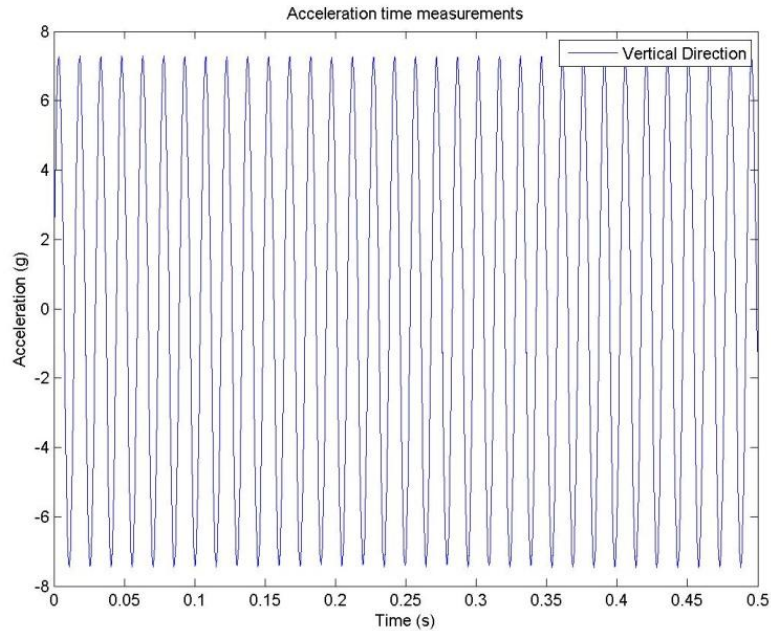
Συμπληρωματικά του παραπάνω πίνακα παρατίθενται επίσης ενδεικτικά και τρία διαγράμματα μετρήσεων των κραδασμών του επιταχυνσιόμετρου σε τρεις αντίστοιχα ρυθμιζόμενες συχνότητες της συσκευής ανάλυσης κοκκομετρίας, για χρονικό διάστημα μισού δευτερολέπτου.



Σχήμα 3-28: Ένδειξη επιταχυνσιόμετρου για ρύθμιση 3g



Σχήμα 3-29: Ένδειξη επιταχυνσιόμετρου για ρύθμιση 5g



**Σχήμα 3-30: Ένδειξη επιταχυνσιόμετρου για ρύθμιση 8g**

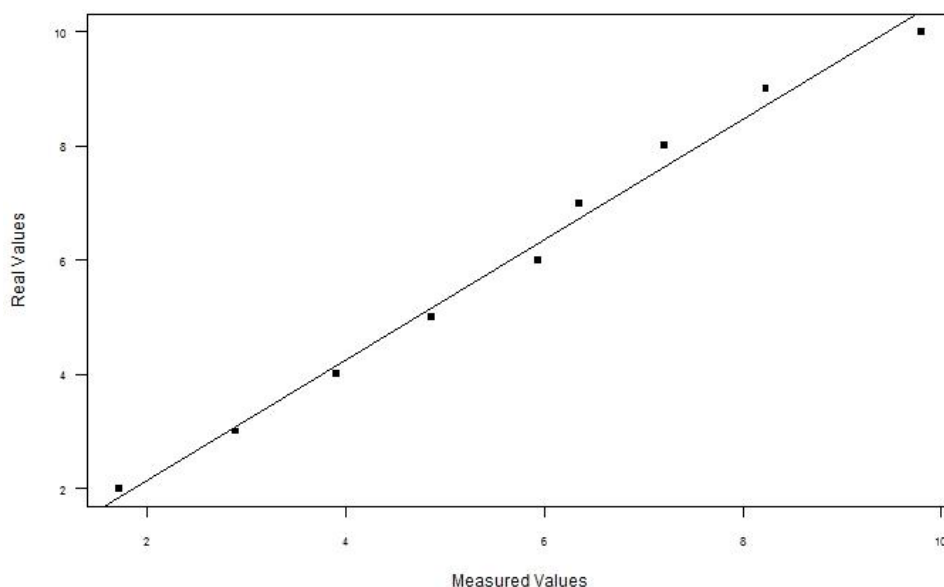
Από τον Πίνακα 3.5, παρατηρούμε ότι στις χαμηλές επιταχύνσεις καταγράφονται ιδιαίτερα χαμηλές αποκλίσεις της τάξης του 3% , ενώ στις υψηλότερες καταγραφές, εμφανίζεται υψηλότερη απόκλιση της τάξης του 7%. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αδυναμίας της συσκευής ανάλυσης κοκκομετρίας, στις υψηλές επιταχύνσεις, να διατηρήσει για ικανοποιητικό χρονικό διάστημα την απαιτούμενη τιμή, παρουσιάζοντας συνεχείς διακυμάνσεις γύρω από αυτήν.

Βασικός σκοπός του ελέγχου της βαθμονόμησης του επιταχυνσιόμετρου είναι να διαπιστώσουμε αν οι τιμές της επιτάχυνσης οι οποίες ανιχνεύονται προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις πραγματικά ρυθμιζόμενες μέσω της συσκευής ανάλυσης κοκκομετρίας. Για το σκοπό αυτό από τα πειραματικά δεδομένα του Πίνακα 3.5 εκτιμούμε την ευθεία αναδρομής, όπως παρουσιάσθηκε κατά την βαθμονόμηση του επαγωγικού αισθητήρα στο εδάφιο 3.5.

Οι παράμετροι  $\alpha_0$  ,  $\alpha_1$  υπολογίσθηκαν ως 0.05194 και 1.052 αντίστοιχα. Κατά συνέπεια η Εξίσωση 3-3 διαμορφώνεται ως εξής:

$$\text{Εξίσωση 3-6 : } f_{\pi} = 0.05194 + 1.052 \times f_m$$

Τα πειραματικά δεδομένα της βαθμονόμησης και η συνάρτηση αναδρομής απεικονίζονται στο Σχήμα 3-31.



**Σχήμα 3-31: Βαθμονόμηση επιταχυνσιόμετρου με χρήση συσκευής ανάλυσης κοκκομετρίας**

Κατά τον έλεγχο βαθμονόμησης υπολογίσθηκαν επίσης οι τιμές των δεικτών R και RMS. Ο δείκτης R, συντελεστής πολλαπλής συσχέτισης, υπολογίσθηκε  $0.9951 \approx 1$ , φανερώνοντας υψηλή γραμμική συσχέτιση, ενώ ο δείκτης RMS, μέση τετραγωνική απόκλιση, υπολογίσθηκε 5.104.

Τα εκτιμώμενα τυπικά σφάλματα της κλίσεως  $\alpha_1$ , και του όρου  $\alpha_0$  της ευθείας αναδρομής υπολογίζονται και οι τιμές τους είναι:

- $se(\alpha_0) = 0.2432$
- $se(\alpha_1) = 0.013948$

Κατόπιν οι παράμετροι  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  της αναδρομής υποβάλλονται σε στατιστικούς ελέγχους, ώστε να εξακριβωθεί αν στατιστικά ισχύει  $\alpha_0 = 0$  και  $\alpha_1 = 1$ .

- Στατιστικός έλεγχος παραμέτρου  $\alpha_0$

Οι υποθέσεις που εξετάζονται είναι οι εξής:

- $H_0: \alpha_0 = 0$  (μηδενική υπόθεση)
- $H_1: \alpha_0 \neq 0$  (εναλλακτική υπόθεση)

Τιμή σύγκρισης  $t_0 = (\alpha_0 - 0) / se(\alpha_0)$

- Στατιστικός έλεγχος παραμέτρου  $\alpha_1$

Οι υποθέσεις που εξετάζονται είναι οι εξής:

- $H_0: \alpha_1 = 1$  (μηδενική υπόθεση)
- $H_1: \alpha_1 \neq 1$  (εναλλακτική υπόθεση)

Τιμή σύγκρισης  $t_0 = (\alpha_1 - 0) / se(\alpha_1)$

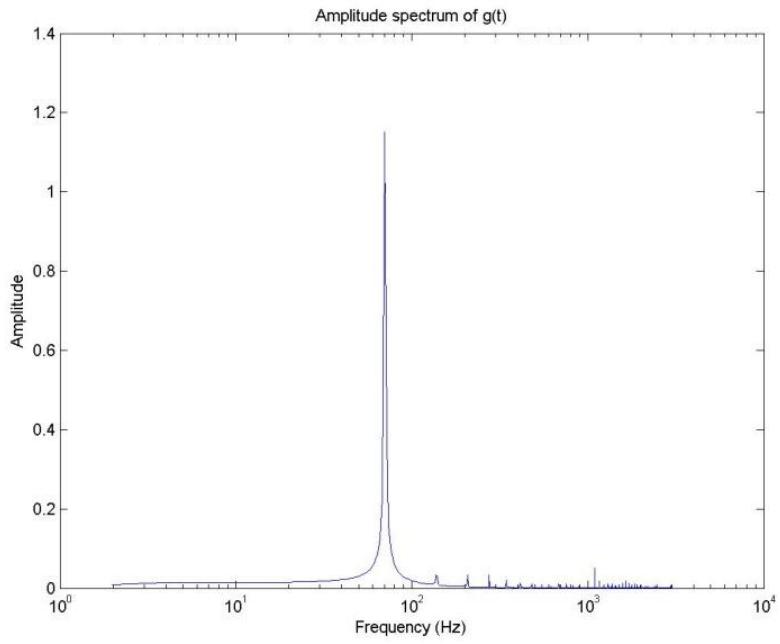
Επιλέγουμε δύο επίπεδα σημαντικότητας,  $\alpha=5\%$  για αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης και  $\alpha=1\%$  για απόρριψη αυτής.

Οι τιμές συγκρίσεως και ελέγχου είναι οι παρακάτω:

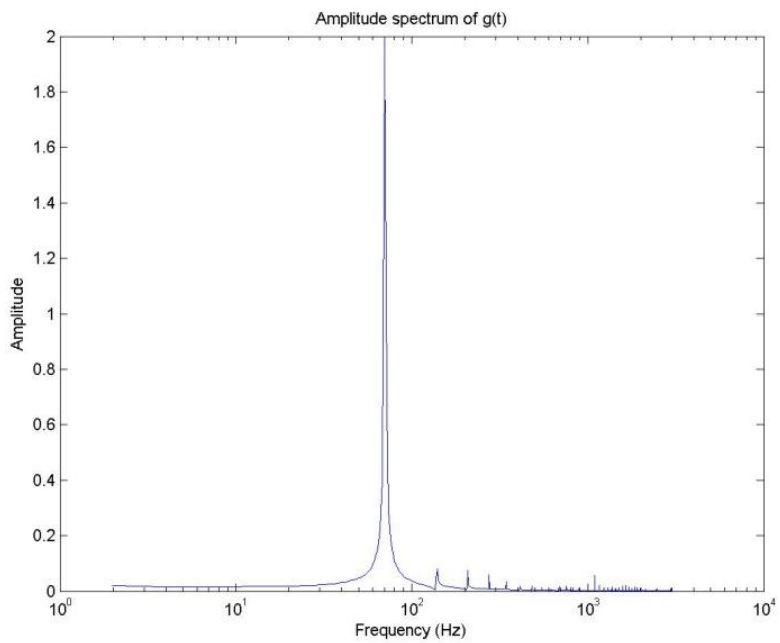
- $t_{\alpha_1} = 1.307$
- $t_{\alpha_0} = 0.2135$
- $t_{c0.95} = 2.365$

Στην περίπτωση βαθμονόμησης του επιταχυνσιόμετρου BS 10.022 τα πειραματικά δεδομένα έχουν πολύ υψηλή γραμμική συσχέτιση όπως φανερώνει ο δείκτης R, ενώ και η τιμή του δείκτη RMS δείχνει την καλή προσαρμογή της ευθείας αναδρομής στα πειραματικά σημεία. Επίσης οι έλεγχοι των παραμέτρων  $\alpha_0$  και  $\alpha_1$  καθιστούν αποδεκτές τις μηδενικές υποθέσεις και συνεπώς καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το επιταχυνσιόμετρο δεν χρειάζεται εκ νέου βαθμονόμηση.

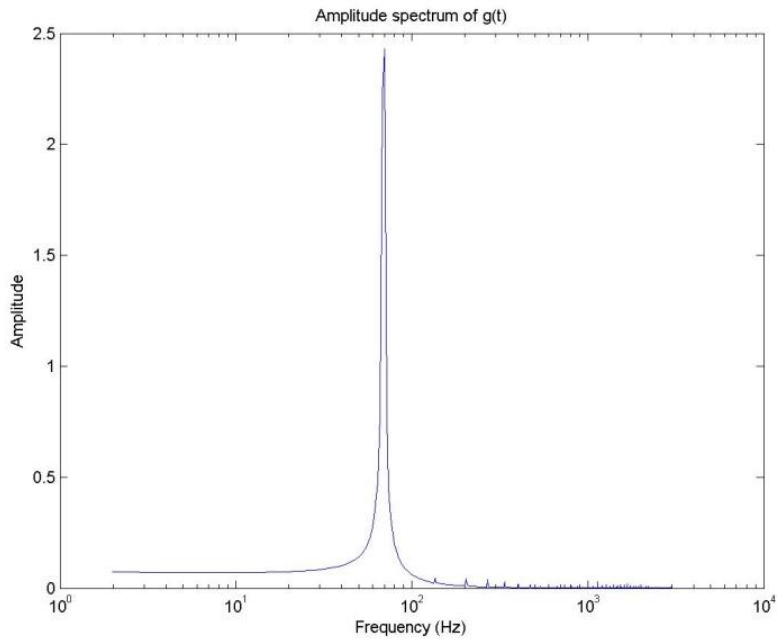
Για τον προσδιορισμό της συχνότητας γίνεται ανάλυση Fourier των καταγραφών της επιτάχυνσης με χρήση του εμπορικού μαθηματικού πακέτου MatLab και προκύπτουν τα αντίστοιχα διαγράμματα.



Σχήμα 3-32: Ανάλυση Fourier για ρύθμιση 3g



Σχήμα 3-33: Ανάλυση Fourier για ρύθμιση 5g



**Σχήμα 3-34: Ανάλυση Fourier για ρύθμιση 8g**

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι σε όλο το φάσμα των επιταχύνσεων από 1 έως 10 g, η κυρίαρχη συχνότητα του φαινομένου παραμένει σταθερή και ίση με 70 Hz. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο εδάφιο 2.3 και θεωρώντας την κίνηση της πλατφόρμας της συσκευής ανάλυσης κοκκομετρίας ως απλή αρμονική ταλάντωση από την Εξίσωση 2-6, το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 2-5 και γνωρίζουμε ότι το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης εμφανίζεται στις τιμές της μέγιστης επιτάχυνσης,  $a_{max} = \omega^2 A$ . Συγκεντρώνοντας τις τιμές παρουσιάζεται ο παρακάτω Πίνακας 3.6. Χρειάζεται να επισημανθεί ότι οι τιμές του μέγιστου πλάτους που υπολογίσθηκαν βρίσκονται εντός των ρυθμιζόμενων ορίων πλάτους ταλάντωσης της συσκευής ανάλυσης κοκκομετρίας. Συγκεκριμένα σύμφωνα με το εγχειρίδιο του κατασκευαστή της συσκευής το πλάτος της εφαρμοζόμενης ταλάντωσης ρυθμίζεται από 0.2 έως 3.00mm.

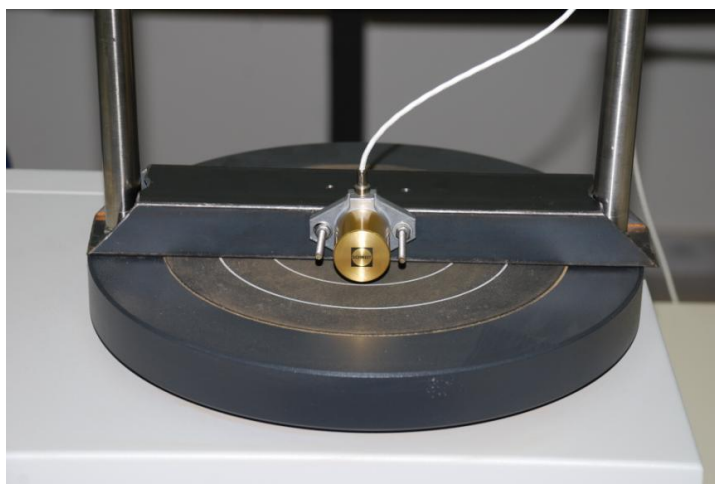


Πίνακας 3.6 : Μέγιστες τιμές πλάτους ταλάντωσης

<u>Μέγιστες τιμές πλάτους ταλάντωσης (κατακόρυφος άξονας)</u>				
Περιοχή μετρήσεων 0 έως 10 g				
Συσκευή ανάλυσης κοκκομετρίας	Τιμές επιταχυνσιόμετρου  (g)	Προσαρμογή δεδομένων  (ω)	Συχνότητα ταλάντωσης  (Hz)	$A = \frac{\alpha_{max}}{(2\pi f)^2}$ (mm)
2	0,69	16,68	70	0,086
3	1,06	28,24	70	0,146
4	1,56	38,24	70	0,198
5	1,94	47,56	70	0,246
6	2,37	58,05	70	0,300
7	2,54	62,27	70	0,322
8	2,85	70,70	70	0,366
9	3,29	80,70	70	0,418
10	3,92	96,10	70	0,497

Επειδή η συχνότητα των 70 Hz παραμένει σταθερή σε όλο το φάσμα των μετρήσεων, εξάγουμε το συμπέρασμα ότι αποτελεί την ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης της συσκευής ανάλυσης κοκκομετρίας.

Παρατηρώντας τον Πίνακα 3.5 διαπιστώνεται ότι οι πειραματικές μετρήσεις είναι συστηματικά ελάχιστα χαμηλότερες από τις ονομαστικές τιμές ρύθμισης της συσκευής. Το φαινόμενο αυτό ενδέχεται να οφείλεται στο ότι η κίνηση της δονούμενης πλατφόρμας, σύμφωνα με το εγχειρίδιο του κατασκευαστή, είναι τρισδιάστατη και κατά συνέπεια η μέγιστη ονομαστική επιτάχυνση προκύπτει από τη σύνθεση των επιταχύνσεων και στις τρεις διευθύνσεις. Έπειτα το επιταχυνσιόμετρο τοποθετείται στην πλατφόρμα της συσκευής ανάλυσης κοκκομετρίας, στον οριζόντιο άξονα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-35, και η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε σε τιμές επιτάχυνσης 2 έως 10g.



Σχήμα 3-35 : Τοποθέτηση επιταχυνσιόμετρου στον οριζόντιο άξονα της συσκευής ανάλυσης κοκκομετρίας

Προέκυψαν οι ακόλουθες τιμές, οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 3.7

Πίνακας 3.7 : Βαθμονόμηση επιταχυνσιόμετρου, οριζόντιος άξονας

<b><u>Βαθμονόμηση επιταχυνσιόμετρου (οριζόντιος άξονας)</u></b>		
<u>Περιοχή μετρήσεων 0 έως 10 g</u>		
<b>Συσκευή ανάλυσης κοκκομετρίας</b>	<b>Ένδειξη επιταχυνσιόμετρου (V)</b>	<b>Προσαρμογή δεδομένων (g)</b>
2	0,07	0,178
3	0,09	0,235
4	0,11	0,279
5	0,13	0,327
6	0,16	0,391
7	0,08	0,194
8	0,08	0,212
9	0,09	0,223
10	0,09	0,233

Το συγκεκριμένο πείραμα πραγματοποιήθηκε , ώστε να αναλυθεί η πιθανότητα η μέτρηση του οργάνου, που προσεγγίζει την δεδομένη τιμή της επιτάχυνσης συσκευής ανάλυσης κοκκομετρίας, να είναι η συνισταμένη επιτάχυνση από τους άξονες X και Y. Ως γνωστό η διανυσματική άθροιση δυνάμεων, οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους, γίνεται βρίσκοντας την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων τους.

$$\text{Εξίσωση 3-7 : } Y = \sqrt{X_1^2 + X_2^2}$$

Αξιοποιώντας την παραπάνω εξίσωση για τα δεδομένα τα οποία προέκυψαν από τις μετρήσεις και στους δύο άξονες, κατακόρυφο και οριζόντιο, προκύπτουν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακας 3.8

**Πίνακας 3.8 : Βαθμονόμηση επιταχυνσιομέτρου (κατακόρυφος + οριζόντιος άξονας)**

<b><u>Βαθμονόμηση επιταχυνσιομέτρου (κατακόρυφος + οριζόντιος άξονας)</u></b>			
<u>Περιοχή μετρήσεων 0 έως 10 g</u>			
<b>Συσκευή ανάλυσης κοκκομετρίας</b>	<b>Ένδειξη επιταχυνσιομέτρου κατακόρυφου &amp; οριζόντιου άξονα (g)</b>	<b>Προσαρμογή δεδομένων <math>Y = \sqrt{X_{κατ.}^2 + X_{οριζ.}^2}</math> (g)</b>	<b>Απόκλιση</b>
2	1,701 & 0,178	1,7103	16,94%
3	2,88 & 0,235	2,8896	3,82%
4	3,9 & 0,279	3,9100	2,30%
5	4,85 & 0,327	4,8610	2,86%
6	5,92 & 0,391	5,9329	1,13%
7	6,35 & 0,194	6,3530	10,18%
8	7,21 & 0,212	7,2131	10,91%
9	8,23 & 0,223	8,2330	9,32%
10	9,8 & 0,233	9,8028	2,01%

Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά από τις τιμές που προέκυψαν από τις μετρήσεις μόνο στον κατακόρυφο άξονα και παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 3.5.

Συγκρίνοντας επομένως τις τιμές που παρουσιάζονται στους Πίνακα 3.5 και Πίνακα 3.8, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η συμμετοχή της συνιστώσας του οριζόντιου άξονα κρίνεται αμελητέα και επιβεβαιώνεται η αρχική μας υπόθεση ότι η κύρια διεύθυνση ταλάντωσης της συσκευής είναι ο κατακόρυφος άξονας της πλατφόρμας.

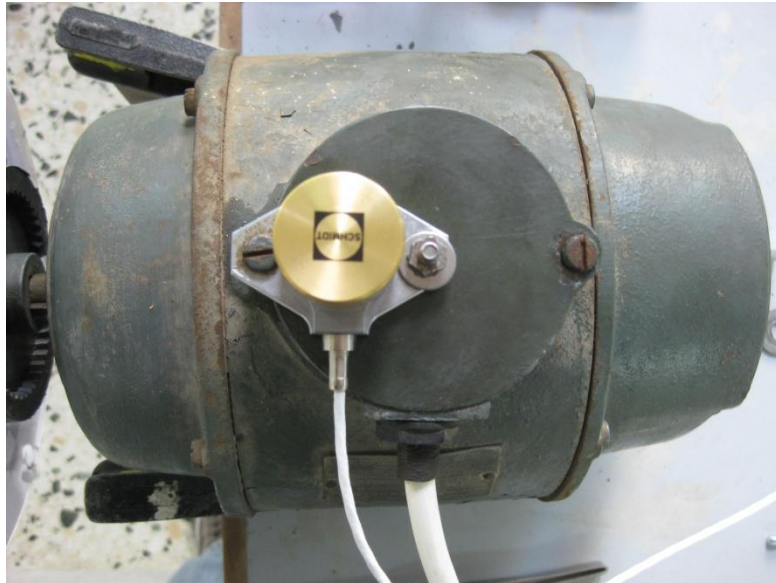
### 3.7 Διάταξη μηχανικών ταλαντώσεων

Όπως έχει αναφερθεί για την διερεύνηση της δημιουργίας μηχανικών ταλαντώσεων σε μηχανολογικές κατασκευές με κινητά μέρη θα χρησιμοποιηθούν τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας, επαγωγικός αισθητήρας και επιταχυνσιόμετρο.

Κατόπιν της βαθμονόμησης των δύο μεταλλακτών και της δοκιμής λειτουργίας του κινητήρα, και πριν πραγματοποιηθεί το τελικό πείραμα, κρίνεται απαραίτητη η δοκιμή λειτουργίας του επιταχυνσιομέτρου στο σώμα του κινητήρα.

Κατά την δοκιμή λειτουργίας του επιταχυνσιομέτρου θα πρέπει να ακολουθηθούν οι υποδείξεις οι οποίες αναφέρονται στο εγχειρίδιο χρήσης του κατασκευαστή. Οι οδηγίες του κατασκευαστή αναφέρονται στην κάλυψη των απαιτήσεων επαφής του αισθητήρα με την προς μέτρηση επιφάνεια, η οποία θα πρέπει να είναι επίπεδη και να εφάπτεται με την επιφάνεια του αισθητήρα. Για την επίτευξη της απαίτησης αυτής το επιταχυνσιόμετρο τοποθετήθηκε στο καπάκι του κλωβού ηλεκτρικής σύνδεσης του κινητήρα και μεταξύ των δύο επιφανειών χρησιμοποιήθηκε μικρή ποσότητα λιπαντικού μέσου.

Το επιταχυνσιόμετρο τοποθετείται στο άνω μέρος του κινητήρα, ώστε να είναι δυνατόν να ανιχνεύσει και να μετρήσει τις κατακόρυφες δονήσεις και συνεπακόλουθα ταλαντώσεις που δημιουργούνται κατά την λειτουργία του. Η ακριβής τοποθέτησή του παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-36.



**Σχήμα 3-36: Τοποθέτηση επιταχυνσιόμετρου στο σώμα κινητήρα**

Για την δημιουργία κραδασμών είναι απαραίτητη η ύπαρξη έκκεντρου φορτίου στον κινητήρα. Για την αρχική δοκιμή λειτουργίας χρησιμοποιήθηκε ο ήδη υπάρχον στροβοσκοπικός δίσκος, ο οποίος έχει πακτωθεί στον άξονα περιστροφής του κινητήρα. Σε δύο αντιδιαμετρικά σημεία του δίσκου, ανοίγονται δύο οπές, στις οποίες προσαρμόζονται δύο πανομοιότυποι κοχλίες αντίστοιχα. Για την δημιουργία έκκεντρου φορτίου όμως, χρειάζεται η διαφοροποίηση των βαρών των δύο κοχλίων, η οποία επιτυγχάνεται με την προσθήκη δύο μεταλλικών ροδέλων στον ένα κοχλία.

Κατά την λειτουργία του κινητήρα με τις παραπάνω συνθήκες αναφοράς τέθηκαν σε λειτουργία και οι δύο αισθητήρες επιτάχυνσης και περιστροφής, οι οποίοι όπως έχει ήδη αναφερθεί στα εδάφια §3.5 και §3.6.4 αντίστοιχα παρέχουν ανεξάρτητο σήμα εξόδου. Οι δύο ανεξάρτητες μετρήσεις κατόπιν επεξεργασίας των δεδομένων παρήγαγαν ισοδύναμο αποτέλεσμα συχνότητα ταλάντωσης του κινητήρα, οδηγώντας μας στο συμπέρασμα ότι η δοκιμή ήταν άκρως επιτυχημένη και μπορούμε να προχωρήσουμε στο τελικό πείραμα διερεύνησης

### **3.8 Γλώσσα προγραμματισμού LabVIEW.**

Το LabVIEW<sup>3</sup> είναι μία γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου η οποία αναπτύχθηκε από τη National Instruments<sup>4</sup>. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτής της γλώσσας προγραμματισμού, το οποίο τη διαφοροποιεί σημαντικά από τις άλλες

<sup>3</sup> Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench

<sup>4</sup> <http://www.ni.com/>

συμβατικές γλώσσες όπως η C κ.α. είναι ότι ο κώδικας αναπτύσσεται μέσω γραφικού κυρίως σχεδιασμού. Γι' αυτό και το LabVIEW χαρακτηρίζεται ως graphically-based γλώσσα προγραμματισμού. Η έμφαση στη γραφική απεικόνιση καθιστά το LabVIEW ιδανική λύση ανάπτυξης εφαρμογών ελέγχου και μετρήσεων (T&M, Test and Measurement), διαχείρισης αυτοματισμών και οργάνων καθώς και συστημάτων συλλογής δεδομένων (DAS, Data Acquisition Systems).

Το περιβάλλον προγραμματισμού του LabVIEW αποτελείται από το front panel (πρόσοψη), το block diagram (διάγραμμα ροής) και τα icons (εικονίδια) τα οποία αντιστοιχούν στον υπολογιστικό κώδικα. Τα τρία αυτά στοιχεία συνδυαζόμενα δημιουργούν τα Virtual Instruments (VI) τα οποία λειτουργούν όπως οι συναρτήσεις και οι υπο-ρουτίνες στις συμβατικές γλώσσες προγραμματισμού.

Η πρόσοψη των VI χρησιμοποιείται κυρίως για τις αρχικές τιμές των μεταβλητών, τις παραμέτρους ελέγχου, και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού κώδικα. Αποτελεί το περιβάλλον λειτουργίας του τελικού χρήστη και σχεδιάζεται με γνώμονα την εργονομία και ευκολία – φιλικότητα ως προς το χρήστη. Το περιβάλλον διαγράμματος ροής χρησιμοποιείται για τον κύριο σχεδιασμό του τρόπου λειτουργίας της εφαρμογής. Δεν είναι ορατό στον τελικό χρήστη αλλά ο σχεδιασμός του θα πρέπει να στηρίζεται στις αρχές του δομημένου προγραμματισμού, προκειμένου να μπορεί αφενός να γίνει αποσφαλμάτωση (debugging) αφετέρου να μπορεί εύκολα να επεκταθεί προκειμένου να καλύψει μελλοντικές ανάγκες.

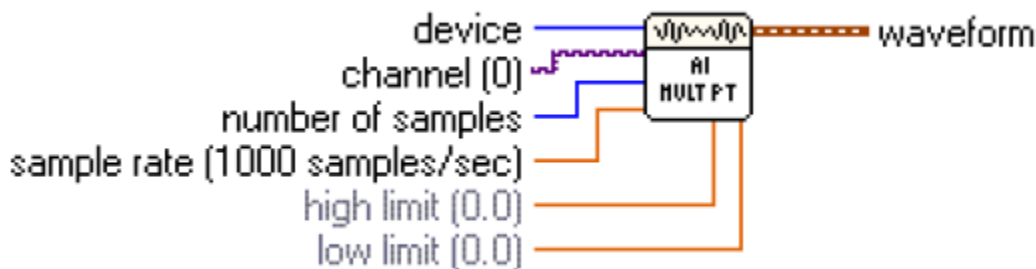
### 3.8.1 Υπορουτίνες - Virtual Instruments

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικές από τις κύριες υπορουτίνες που χρησιμοποιήθηκαν από τη βιβλιοθήκη του LabVIEW κατά την ανάπτυξη της υπολογιστικής εφαρμογής.

Για την επικοινωνία συσκευών και οργάνων, όπως πχ οι αναλογοψηφιακοί μετατροπείς με το LabVIEW οι κατασκευάστριες εταιρείες αναπτύσσουν πλήθος οδηγών προγραμμάτων (VIs) τα οποία και διαθέτουν δωρεάν. Τα προγράμματα αυτά προστίθενται στις υπάρχουσες βιβλιοθήκες του LabVIEW και εν συνεχεία εισάγονται στο block diagram των εφαρμογών.

#### *ADV AI Acquire Waveform.vi*

Για την επικοινωνία του αναλογοψηφιακού μετατροπέα PCI 1710/L της εφαρμογής μας με το LabVIEW εγκαταστάθηκαν οι σχετικές βιβλιοθήκες της Advantech και χρησιμοποιήθηκε το VI με τίτλο: *ADV AI Acquire Waveform.vi* (Σχήμα 3-37)



Σχήμα 3-37:Υπορουτίνα *ADV AI Acquire Waveform.vi*

Η υπορουτίνα αυτή λαμβάνει ένα συγκεκριμένο αριθμό δειγμάτων με μία συγκεκριμένη συχνότητα δειγματοληψίας από ένα μόνο κανάλι αναλογικής εισόδου του αναλογοψηφιακού μετατροπέα και επιστρέφει τις εγγραφές.

Οι παράμετροι εισόδου και εξόδου του *ADV AI Acquire Waveform.vi* έχουν ως εξής:

- *device*: Είναι ακέραιος αριθμός ο οποίος αντιστοιχεί στην κάρτα του αναλογοψηφιακού μετατροπέα, έτσι όπως έχει οριστεί κατά την εγκατάσταση και παραμετροποίηση της κάρτας. Ο αριθμός αυτός είναι μοναδικός για κάθε ADC και ορίζει ποια συσκευή θα εκτελέσει κάθε φορά τη μετατροπή.
- *channel*: Ακέραιος αριθμός ο οποίος ορίζει το αναλογικό κανάλι εισόδου για το οποίο θα γίνει η μετατροπή. Προεπιλεγμένη τιμή κανάλι 0.
- *number of samples*: Ακέραιος αριθμός ο οποίος ορίζει το πλήθος των τιμών που θα συλλέξει ο ADC από το κανάλι που ορίζει η μεταβλητή *channel*. Προεπιλεγμένη τιμή 1000 δείγματα.
- *sample rate*: Ακέραιος αριθμός ο οποίος ορίζει το πλήθος δεδομένων δειγματοληψίας εντός χρονικού διαστήματος 1 s. Προεπιλεγμένη τιμή 1000 samples/s.
- *high limit*: Μεταβλητή η οποία ορίζει το άνω όριο αναλογικής εισόδου του καναλιού που θα γίνει η μετατροπή. Για τιμή της παραμέτρου ίση με 0 το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέγιστη τιμή που υποστηρίζει το hardware του ADC. Προεπιλεγμένη τιμή 0.
- *low limit*: Μεταβλητή η οποία ορίζει το κάτω όριο αναλογικής εισόδου του καναλιού που θα γίνει η μετατροπή. Για τιμή της παραμέτρου ίση με 0 το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την ελάχιστη τιμή που υποστηρίζει το hardware του ADC. Προεπιλεγμένη τιμή 0.
- *waveform*: Μεταβλητή η οποία περιέχει με χρονικά αύξουσα σειρά τα αποτελέσματα της αναλογοψηφιακής μετατροπής.

## Statistics Express VI

Για τον άμεσο και γρήγορο υπολογισμό βασικών στατιστικών μεγεθών, όπως η μέση τιμή και τυπική απόκλιση των μετρήσεων χρησιμοποιείται η υπορουτίνα *statistics express.vi* η οποία έχει τη δυνατότητα των εξής στατιστικών υπολογισμών:

- Αριθμητικός μέσος
- Διάμεσος (*median*)
- *Mode*: Εντοπίζει την τιμή με την υψηλότερη συχνότητα εμφάνισης στα δεδομένα
- Άθροισμα
- Τυπική απόκλιση
- Μεταβλητότητα
- Κεντρικές ροπές 3<sup>ης</sup> και 4<sup>ης</sup> τάξης (*skewness, kurtosis*)
- Μέγιστο
- Χρονικός προσδιορισμός μεγίστου
- Προσδιορισμός αύξοντος αριθμού μεγίστου
- Χρονικός προσδιορισμός ελαχίστου
- Προσδιορισμός αύξοντος αριθμού ελαχίστου
- Εύρος τιμών (*Μέγιστο – Ελάχιστο*)
- Πρώτη εγγραφή
- Χρονικός προσδιορισμός πρώτης εγγραφής
- Τελευταία εγγραφή
- Χρονικός προσδιορισμός τελευταίας εγγραφής
- Συνολικός αριθμός δειγμάτων
- Χρονική απόσταση μεταξύ δύο δειγμάτων (*χρόνος δειγματοληψίας*)

## Spectral Measurements Express VI

Προκειμένου να ανιχνευθεί άμεσα τυχόν υπάρχουσα κυρίαρχη συχνότητα η οποία διέπει το υπό μελέτη φαινόμενο και κατ' επέκταση τα δεδομένα τα οποία συλλέγουμε εφαρμόζεται γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT) από την υπορουτίνα της βιβλιοθήκης ανάλυσης σήματος του LabVIEW με όνομα *spectral measurements express.vi*. Η υπορουτίνα διαθέτει τις ακόλουθες επιλογές:

- *Magnitude (peak)*: Υπολογίζει το φάσμα των συχνοτήτων και επιστρέφει το αποτέλεσμα ανάλογα του μεγίστου πλάτους που ανιχνεύεται
- *Magnitude (RMS)*: Υπολογίζει το φάσμα των συχνοτήτων και επιστρέφει το αποτέλεσμα ανάλογα του μέσου αθροίσματος των τετραγώνων που προκύπτει



- *Power spectrum (Φάσμα ισχύος)*: Υπολογίζει και φάσμα των συχνοτήτων και επιστρέφει το αποτέλεσμα σε όρους ισχύος. Πρακτικά χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των διαφορετικών συχνοτήτων που συνθέτουν το σήμα.
- *Power spectral density (Φασματική πυκνότητα ισχύος)*: Υπολογίζει το φάσμα των συχνοτήτων και επιστρέφει το αποτέλεσμα σε όρους φασματικής πυκνότητας ισχύος. Αποτελεί αντίστοιχη επιλογή του Φάσματος ισχύος, με τη διαφορά ότι οι τιμές ισχύος κανονικοποιούνται βάση των ορίων συχνοτήτων στα οποία εμφανίζονται. Και σε αυτή την περίπτωση η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των διαφορετικών συχνοτήτων που συνθέτουν το σήμα.

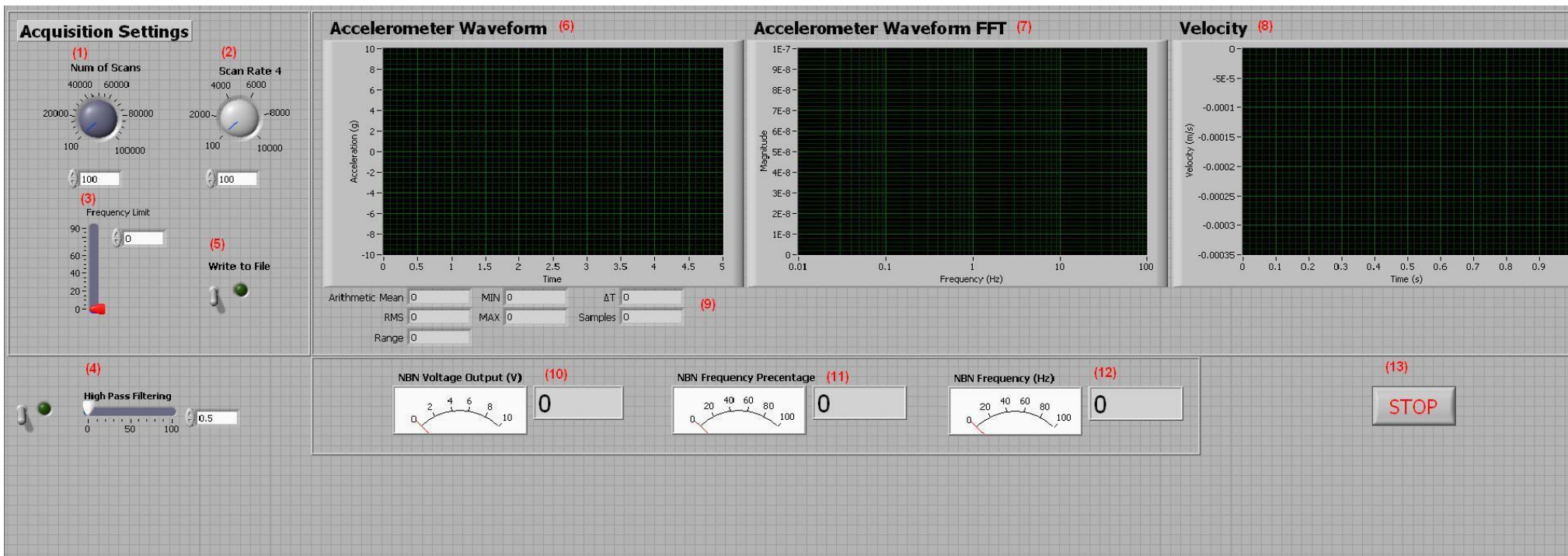
### 3.9 Η εφαρμογή *vibrations.vi*

Για την καταγραφή, επεξεργασία και εκμετάλλευση των σημάτων από τους μεταλλάκτες επιτάχυνσης (§3.6) και συχνότητας (§3.5) της ελεγχόμενης διάταξης αναπτύχθηκε η εφαρμογή LabVIEW με όνομα *vibrations.vi*.

Η εφαρμογή αυτή συλλέγει με συγκεκριμένη συχνότητα δειγματοληψίας ίδιο ή διαφορετικό (ανάλογα την επιλογή του χρήστη) πλήθος δεδομένων από τους δύο μεταλλάκτες και εν συνεχεία επεξεργάζεται τα δεδομένα. Για το μεταλλάκτη συχνότητας (NBN) το πρόγραμμα επιστρέφει στην οθόνη του χρήστη (front panel) την τιμή της τάσης, την τιμή της συχνότητας εκφρασμένη σε ποσοστό % και την τιμή της συχνότητας σε Hz. Για το μεταλλάκτη επιτάχυνσης το πρόγραμμα εμφανίζει στην οθόνη του χρήστη τα εξής γραφήματα:

- Το χρονόδειγμα της μεταβολής της επιτάχυνσης  $g(t)$
- Τη φασματική πυκνότητα ισχύος του  $g(t)$  μέσω FFT
- Το χρονικό ολοκλήρωμα της  $g(t)$  από το οποίο εκτιμούνται οι ταχύτητες που αναπτύσσονται από το δονούμενο κινητήρα.

Αναλυτικότερα το περιβάλλον του χρήστη (front panel) το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 3-38 περιλαμβάνει τα εξής:



Σχήμα 3-38: Κεντρική οθόνη, "πρόσοψη", γλώσσας προγραμματισμού LabVIEW

Στις θέσεις 1,2 δίνονται οι αρχικοί παράμετροι συλλογής δεδομένων, και συγκεκριμένα

- Θέση1: ο συνολικός αριθμός των μετρήσεων για τον μεταλλάκτη επιταχύνσεως.  
Το πλήθος των δεδομένων για το μεταλλάκτη συχνότητας καθορίζεται από το block diagram και ισούται με 100
- Θέση 2 : ο ρυθμός συλλογής μετρήσεων σε Hz.

Κατά την πειραματική διαδικασία επιλέχθηκαν οι τιμές 1.500 και 6.000 αντίστοιχα.

Κάτω από τις θέσεις 1 και 2 υπάρχουν τα φίλτρα συχνοτήτων frequency limit και high pass filtering , στις θέσεις (3) και (4).

- Θέση 3 : επιλέγεται το εύρος της μετρούμενης συχνότητας του επαγωγικού αισθητήρα, το οποίο θα πρέπει να συμφωνεί με το αντίστοιχο που έχει ρυθμιστεί στον ελεγκτή (WEM Ex-FSU) σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο εδάφιο § 3.3.

- Θέση 4: Ρύθμιση φίλτρου αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων.  
Το φίλτρο αυτό εφαρμόζεται στα δεδομένα μεταβολή της επιτάχυνσης κατ' επιλογή του χρήστη. Η ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του φίλτρου γίνεται μέσω ενός ON – OFF διακόπτη. Ο σκοπός ύπαρξης αυτού του φίλτρου είναι να απορρίψει τυχαίο θόρυβο ο οποίος μπορεί να εμπεριέχεται στα δεδομένα της επιτάχυνσης και ο οποίος κατά την ολοκλήρωση του χρονοδείγματος για τον υπολογισμό της ταχύτητας οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα.

Ειδικότερα ας υποθέσουμε ότι κατά την μέτρηση της επιτάχυνσης από τον μεταλλάκτη υπεισέρχεται μία θετική τιμή τάσης της μορφής  $y(t) = k \cdot t$ . Κατά την ολοκλήρωση της τιμής της επιτάχυνσης για την εύρεση της ταχύτητας, το αόριστο ολοκλήρωμα της τιμής της τάσης "θορύβου" θα είναι  $\int y(t) \cdot dt = c + kt$ , η οποία αποτελεί διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης. Η παρουσία της τιμής αυτής κατά την μέτρηση, ακόμα και χαμηλού μέτρου, μπορεί να αλλοιώσει ολοκληρωτικά το διάγραμμα, παρέχοντας λανθασμένα αποτελέσματα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-39. Στην περίπτωση του σχήματος χωρίς την επιλογή του φίλτρου αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων, το διάγραμμα της ταχύτητας εμφανίζει μία μεγάλη αύξηση, η οποία δεν δικαιολογείται εφόσον δεν μεταβάλλεται η συχνότητα.

- Θέση 5 : απεικονίζεται η επιλογή εγγραφής σε αρχείο των μετρούμενων δεδομένων και η οπτική ένδειξη καταγραφής. Ο χρήστης επιλέγει αν επιθυμεί η όχι να εγγράψει τα δεδομένα σε ηλεκτρονικό αρχείο.

Θέσεις 6,7,8 : απεικονίζονται τα διαγράμματα κυματομορφών (waveform)

- Θέση 6 : απεικονίζεται η συνεχής ροή δεδομένων από το επιταχυνσιόμετρο. Όπως έχει αναφερθεί η έξοδος του επιταχυνσιομέτρου, είναι ηλεκτρικό σήμα εντάσεως  $0 - \pm 4V$ , το οποίο μετασχηματίζεται ακολουθώντας την Εξίσωση 3-5 σε μετρούμενη επιτάχυνση της βαρύτητας  $0 - \pm 10g$ . Επομένως ο άξονας Y, ρυθμίζεται σε κλίμακα  $0 - \pm 10$ , ενώ ο άξονας X, αποτελεί την χρονική καταμέτρηση, από την στιγμή της έναρξης του προγράμματος, έως το πέρας της λειτουργίας του. Η χρονική καταμέτρηση μπορεί να ρυθμιστεί είτε συνεχόμενα είτε να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο χρονικό περιθώριο.
- Θέση 7 : ο άξονας X αντιπροσωπεύει τις διάφορες μετρούμενες συχνότητες, και ο άξονας Y, το πλάτος των αντίστοιχων μετρούμενων ταλαντώσεων. Ειδικότερα, στο συγκεκριμένο διάγραμμα διοχετεύονται τα ίδια δεδομένα, αλλά μέσω του μετασχηματισμού Fourier, εμφανίζονται οι κυρίαρχες συχνότητες των ταλαντώσεων.
- Θέση 8 : απεικονίζεται η συνεχής ροή δεδομένων μετρούμενης ταχύτητας του επιταχυνσιομέτρου.

Ο όρος Μετασχηματισμός Φουριέ (ΜΦ) αναφέρεται σε μία αυστηρώς ορισμένη μαθηματική διεργασία η οποία αποσυνθέτει μία συνάρτηση σε άθροισμα απείρων περιοδικών ημιτονοειδών και συνημιτονοειδών συναρτήσεων. Το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού είναι μία νέα συνάρτηση με διαφορετικό πεδίο ορισμού, επίσης γνωστή ως Μετασχηματισμός Φουριέ ή ως φάσμα, η οποία περιγράφει το κατά πόσο συμμετέχει κάθε στοιχειώδες ημίτονο στον σχηματισμό της αρχικής συνάρτησης. Όταν επεξεργαζόμαστε σήματα, όπως ήχο, ραδιοκύματα, η ανάλυση Φουριέ μπορεί να απομονώσει μεμονωμένους συντελεστές από μια σύνθετη κυματομορφή, συγκεντρώνοντάς τους για ευκολότερη ανίχνευση και/ή αφαίρεση (LabVIEW Advanced Programming Technics).

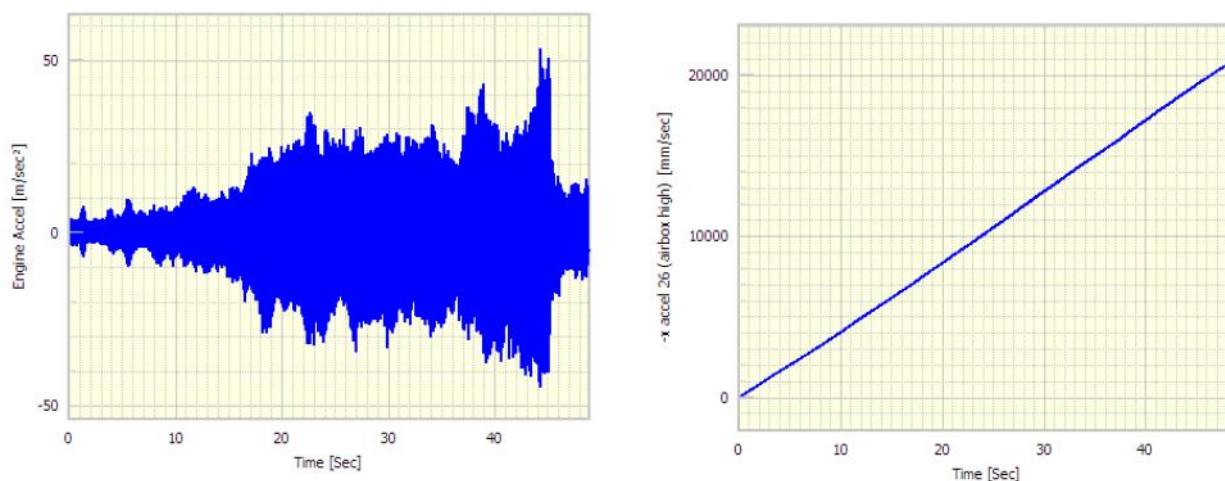
Κατά την βαθμονόμηση του επιταχυνσιομέτρου, όπως επίσης και την τελική πειραματική διαδικασία, είναι απαραίτητη η χρήση του μετασχηματισμού Φουριέ, και για την απάλειψη του "θορύβου", για να αφαιρεθεί δηλαδή ο «ήσυχος» θόρυβος του παρασκήνιου με την εξάλειψη των συντελεστών Φουριέ που δεν υπερβαίνουν ένα καθορισμένο εύρος.

- Θέση 9 : απεικονίζονται οι ψηφιακοί μετρητές του σήματος εξόδου του επιταχυνσιομέτρου, από "κορυφή" σε "κορυφή", το εύρος μέτρησης, ο δείκτης μέσης τετραγωνικής απόκλισης RMS, ο αριθμός των μετρήσεων και ο απαιτούμενος για αυτές χρόνος και η μετατροπή του σε μονάδα μέτρησης επιτάχυνσεως της βαρύτητας, g.

Θέσεις 10,11,12 : εμφανίζονται οι αναλογικοί δείκτες μετρήσεως των μετρούμενων μεγεθών της συνδέσεως του επαγωγικού αισθητήρα στο LabVIEW.

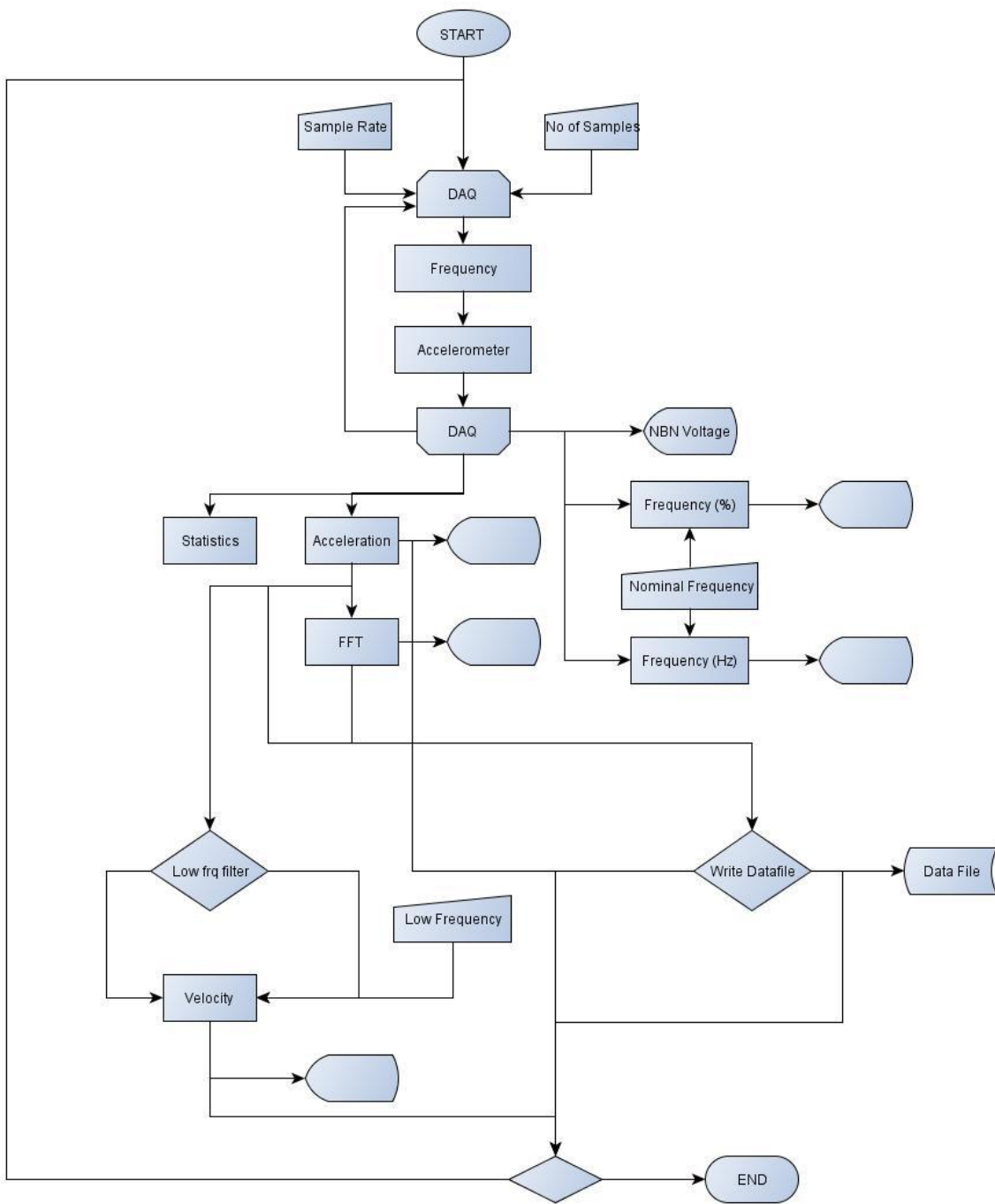
Συγκεκριμένα, όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο §3.2.2 το σήμα εξόδου του επαγωγικού αισθητήρα είναι ηλεκτρικό σήμα εντάσεως 0-20mA. Προκειμένου να μετατρέψουμε το σήμα εντάσεως σε σήμα τάσης, ώστε να μπορεί να αναγνωρισθεί και μετρηθεί από τον αναλογοψηφιακό μετατροπέα, 3.1, τοποθετούμε μία ωμική αντίσταση 472Ω, με αποτέλεσμα τελικώς να λαμβάνουμε σήμα τάσης 0-10V.

- Θέση 10 : εμφανίζεται η τιμή της τάσης σε πραγματικό χρόνο.
- Θέση 11 : εμφανίζεται το ποσοστό της μετρούμενης συχνότητας σε σχέση με την επιλεγόμενη μέσω του Πίνακα 3.2 ρύθμιση συχνότητας του μετατροπέα.
- Θέση 12 : εμφανίζεται η ακριβής μέτρηση της συχνότητας αναφορικά με την ρυθμιζόμενη.
- Θέση 13 : εμφανίζεται η επιλογή τερματισμού λειτουργίας της εφαρμογής



**Σχήμα 3-39 : Διάγραμμα ταχύτητας χωρίς τη χρήση φίλτρου αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων**

Όπως προαναφέρθηκε στο πρόγραμμα LabVIEW, ο προγραμματισμός πραγματοποιείται στο σχηματικό διάγραμμα ροής (block diagram), το οποίο παρουσιάζεται σε απλούστερη μορφή λογικού διαγράμματος στο Σχήμα 3-40



Σχήμα 3-40: Σχηματικό διάγραμμα, "block diagram", γλώσσας προγραμματισμού LabVIEW

## 4. Πειραματική διαδικασία.

### 4.1 Πειραματικά αποτελέσματα

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν διεξοδικά τόσο η ελεγχόμενη διάταξη, όσο και οι εγκατεστημένες μετρητικές διατάξεις του επαγωγικού αισθητήρα και του επιταχυνσιομέτρου. Επίσης, έγινε λεπτομερής αναφορά στον τρόπο σύνδεσης των μεταλλακτών απευθείας σε Η/Υ και το λογισμικό καταγραφής των φυσικών μεγεθών της συχνότητας περιστροφής και επιτάχυνσης λόγω κραδασμών.

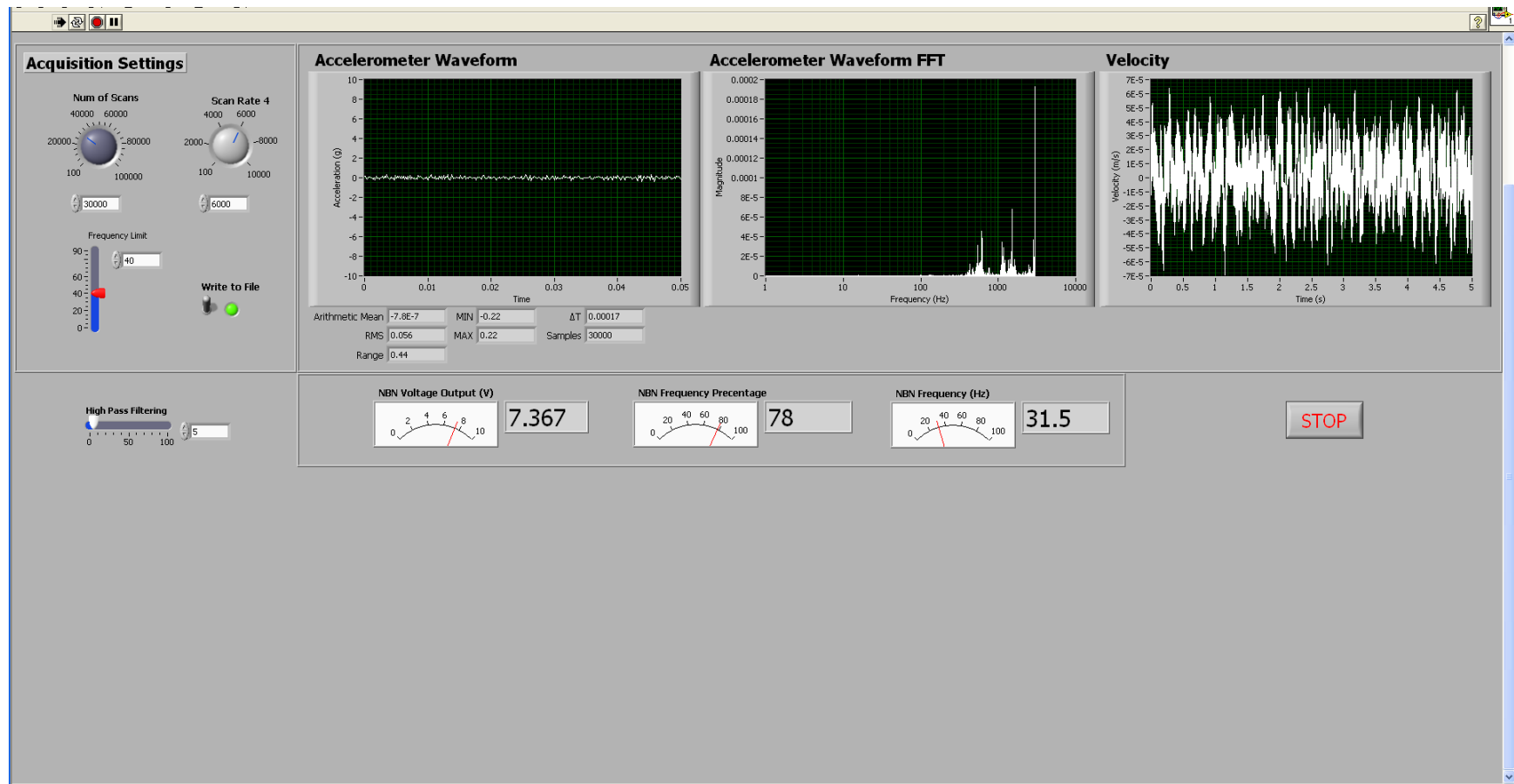
Η πειραματική εφαρμογή πραγματοποιήθηκε αρχικά κατά την ελεύθερη περιστροφή του άξονα του κινητήρα, ώστε μετρηθούν οι παραγόμενοι κραδασμοί. Κατόπιν τοποθετήθηκε έκκεντρα κοχλίας μήκους 3,5 cm, για την διερεύνηση και αποτύπωση της διαφορετικής κατάστασης λειτουργίας, σε διάφορες τιμές της συχνότητας περιστροφής.

- Κινητήρας χωρίς έκκεντρο φορτίο, συχνότητα περιστροφής 31,5Hz

Παράμετροι λειτουργίας LabVIEW:

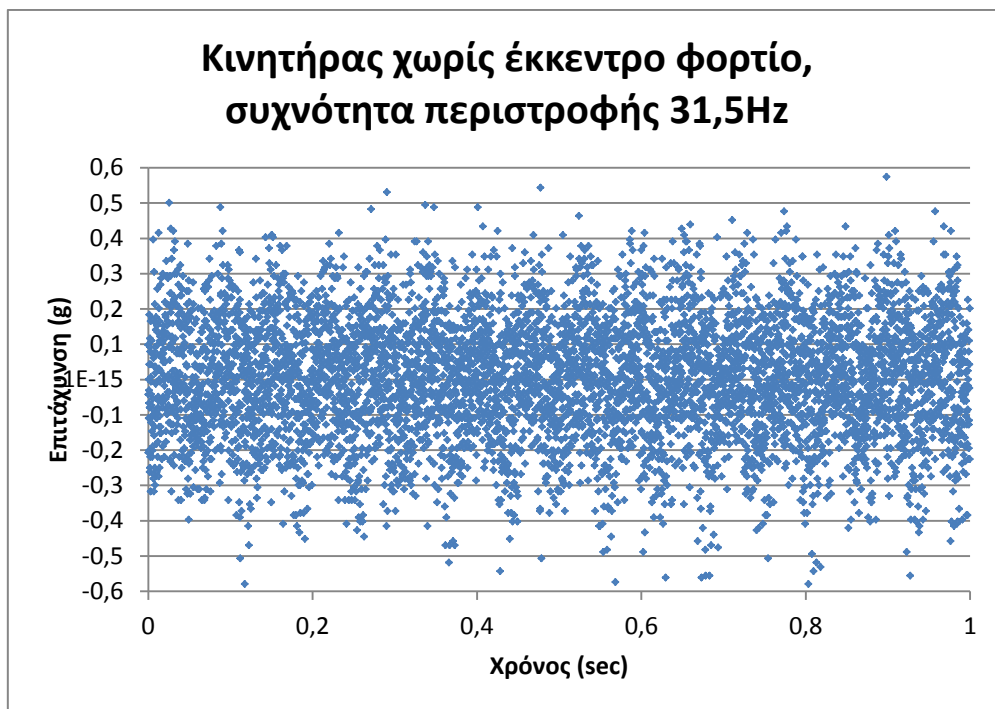
- Πλήθος μετρήσεων: 30.000
- Ρυθμός δειγματοληψίας: 6.000Hz
- εύρος της μετρούμενης συχνότητας του επαγωγικού αισθητήρα: 0-40
- διάστημα αποκλεισμού συχνοτήτων: 5
- χρόνος καταγραφής: 1sec

Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήμα 4-1 και Σχήμα 4-2.



Σχήμα 4-1: Πειραματικά αποτελέσματα LabVIEW, κινητήρας χωρίς έκκεντρο φορτίο, συχνότητα περιστροφής 31,5Hz





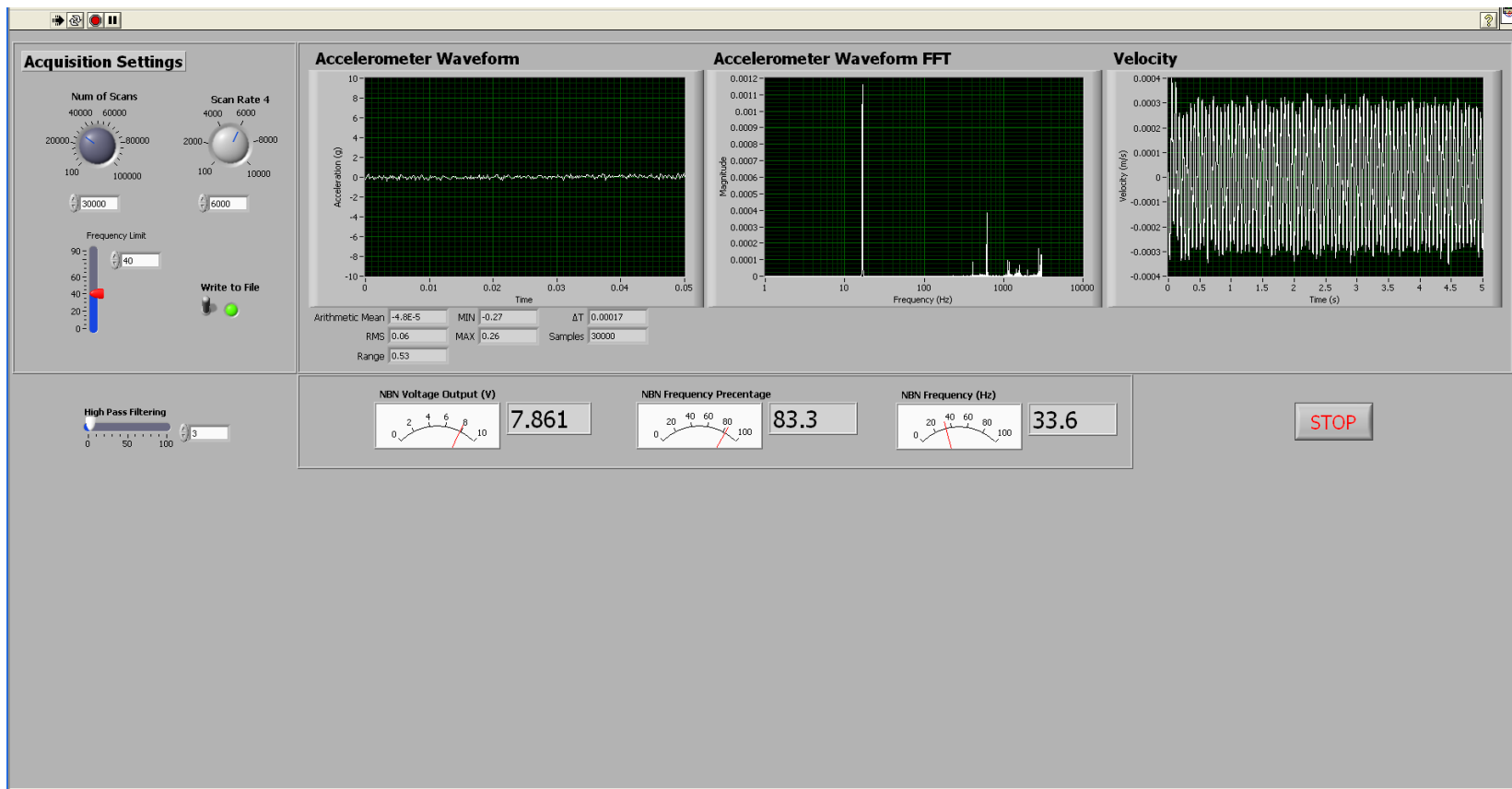
Σχήμα 4-2: Τιμές επιτάχυνσης, κινητήρας χωρίς έκκεντρο φορτίο, συχνότητα περιστροφής 31,5Hz

- Κινητήρας με έκκεντρο φορτίο, συχνότητα περιστροφής 33,6Hz

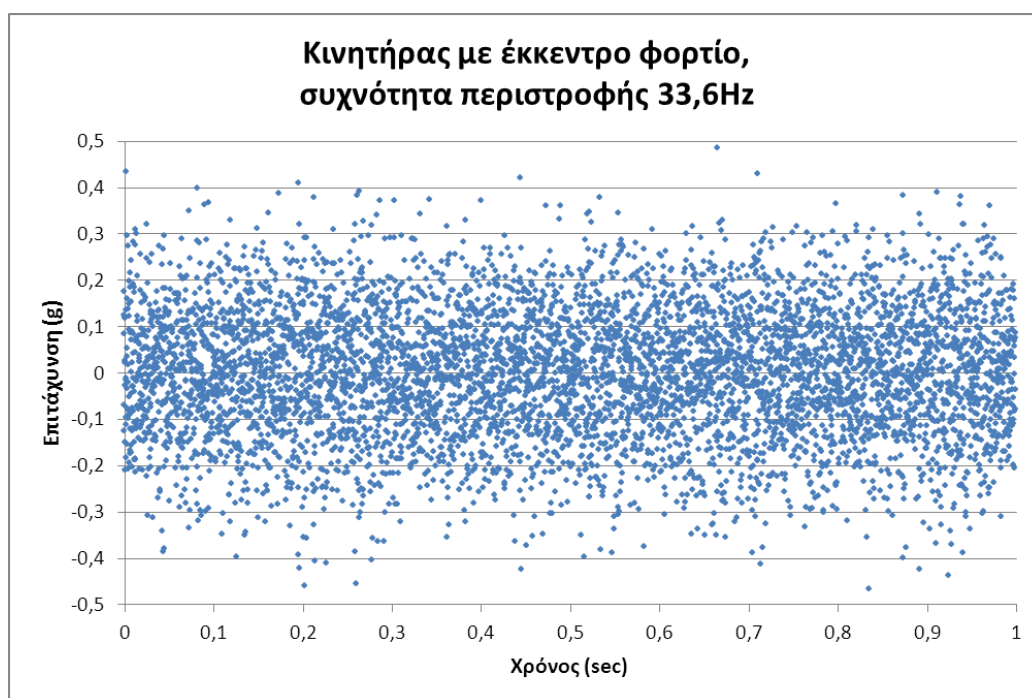
Παράμετροι λειτουργίας LabVIEW:

- Πλήθος μετρήσεων: 30.000
- Ρυθμός δειγματοληψίας: 6.000Hz
- εύρος της μετρούμενης συχνότητας του επαγωγικού αισθητήρα: 0-40
- διάστημα αποκλεισμού συχνοτήτων: 3
- χρόνος καταγραφής: 5sec

Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήμα 4-3 και Σχήμα 4-4.



Σχήμα 4-3: Πειραματικά αποτελέσματα LabVIEW, κινητήρας με έκκεντρο φορτίο, συχνότητα περιστροφής 33,6Hz



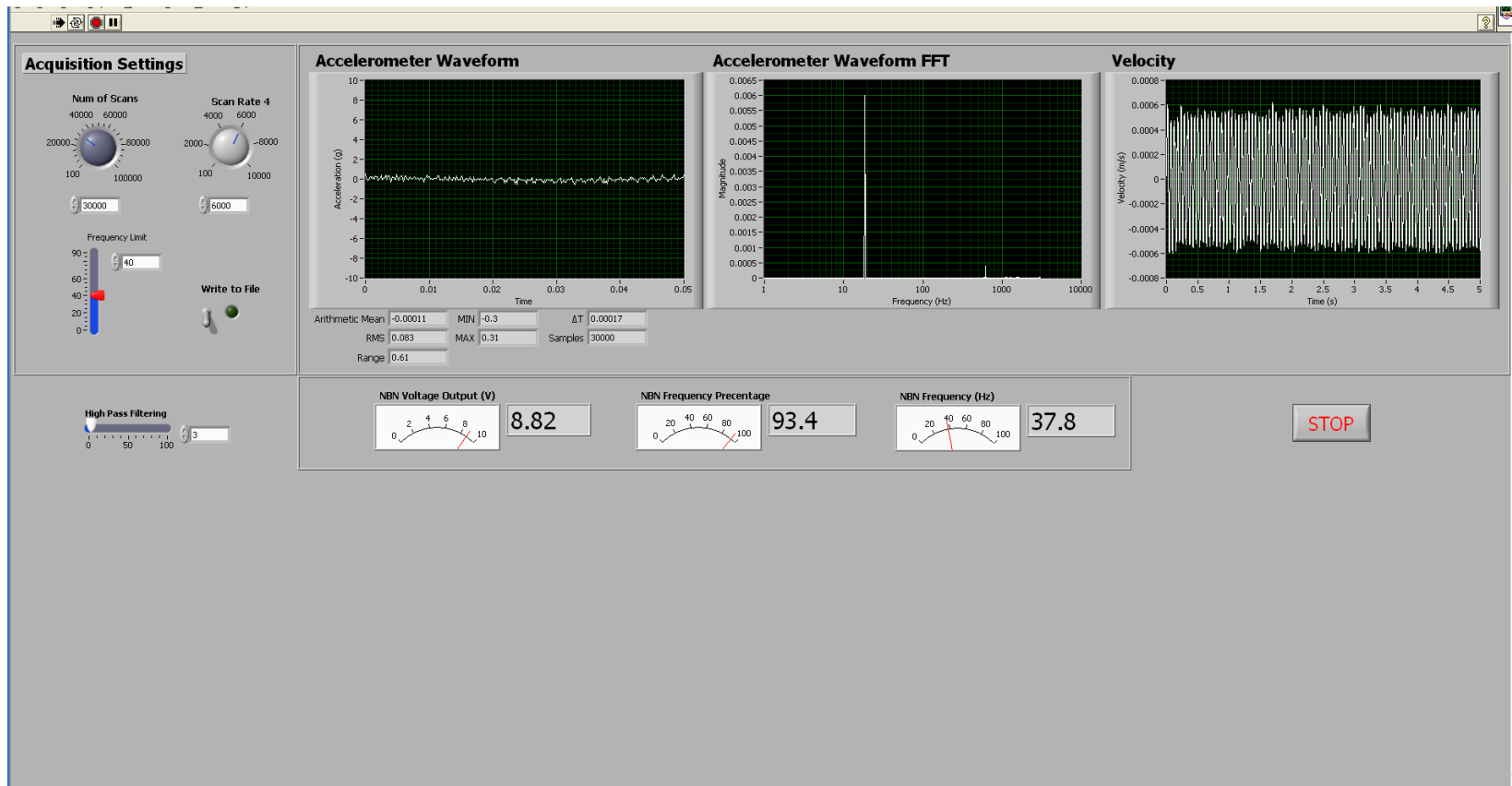
**Σχήμα 4-4: Τιμές επιτάχυνσης, κινητήρας χωρίς έκκεντρο φορτίο, συχνότητα περιστροφής 33,6Hz**

- Κινητήρας με έκκεντρο φορτίο, συχνότητα περιστροφής 37,8Hz

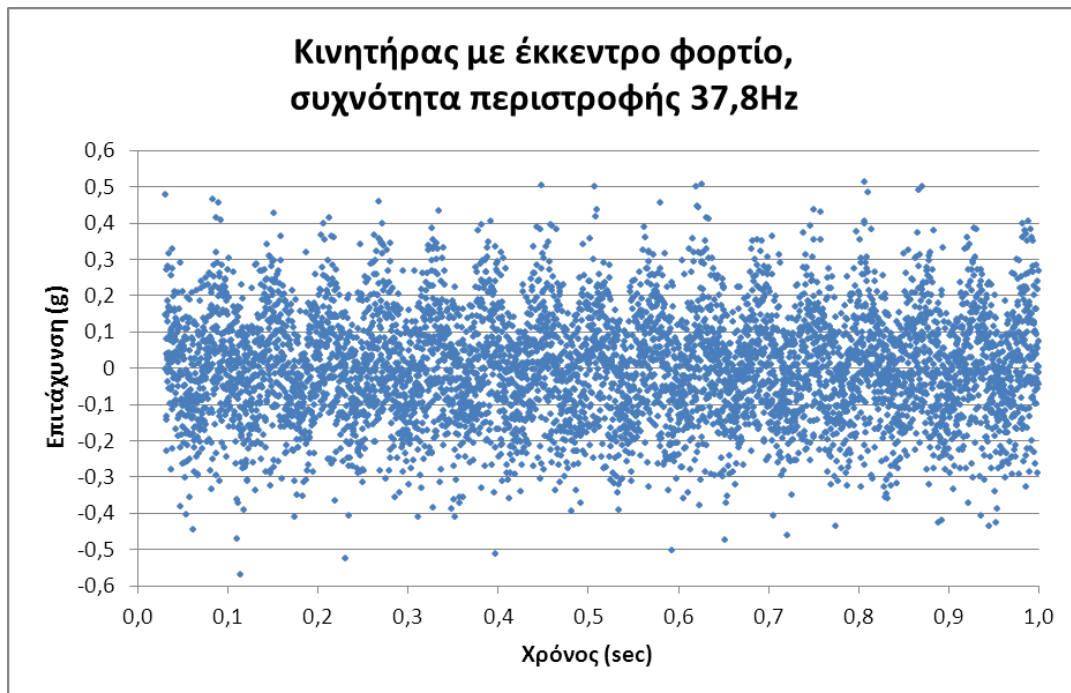
Παράμετροι λειτουργίας LabVIEW:

- Πλήθος μετρήσεων: 30.000
- Ρυθμός δειγματοληψίας: 6.000Hz
- εύρος της μετρούμενης συχνότητας του επαγωγικού αισθητήρα: 0-40
- διάστημα αποκλεισμού συχνοτήτων: 3
- χρόνος καταγραφής: 5sec

Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήμα 4-5 και Σχήμα 4-6.



Σχήμα 4-5: Πειραματικά αποτελέσματα LabVIEW, κινητήρας με έκκεντρο φορτίο, συχνότητα περιστροφής 37,8Hz



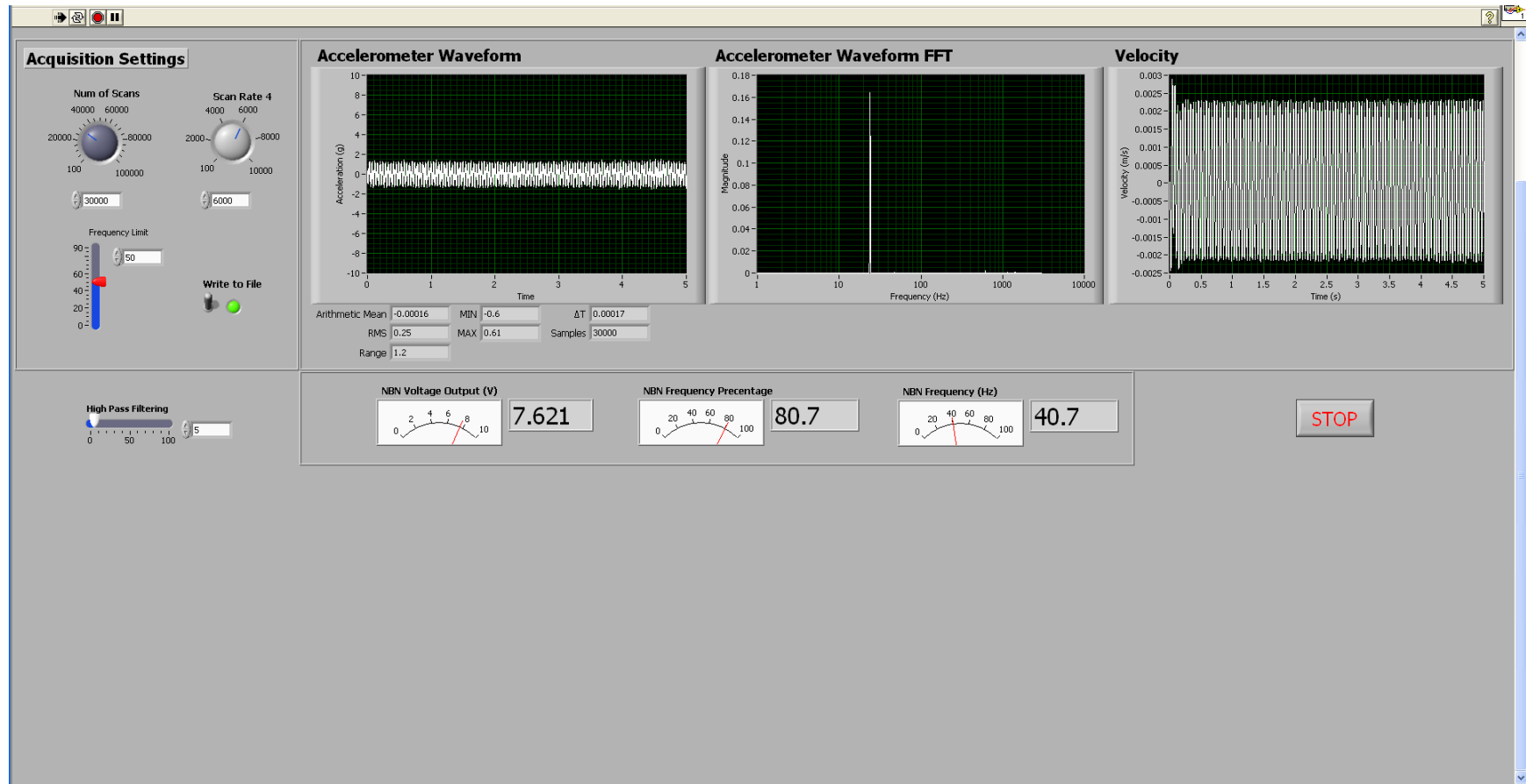
**Σχήμα 4-6: Τιμές επιτάχυνσης, κινητήρας χωρίς έκκεντρο φορτίο, συχνότητα περιστροφής 37,8Hz**

- Κινητήρας με έκκεντρο φορτίο, συχνότητα περιστροφής 40,7Hz

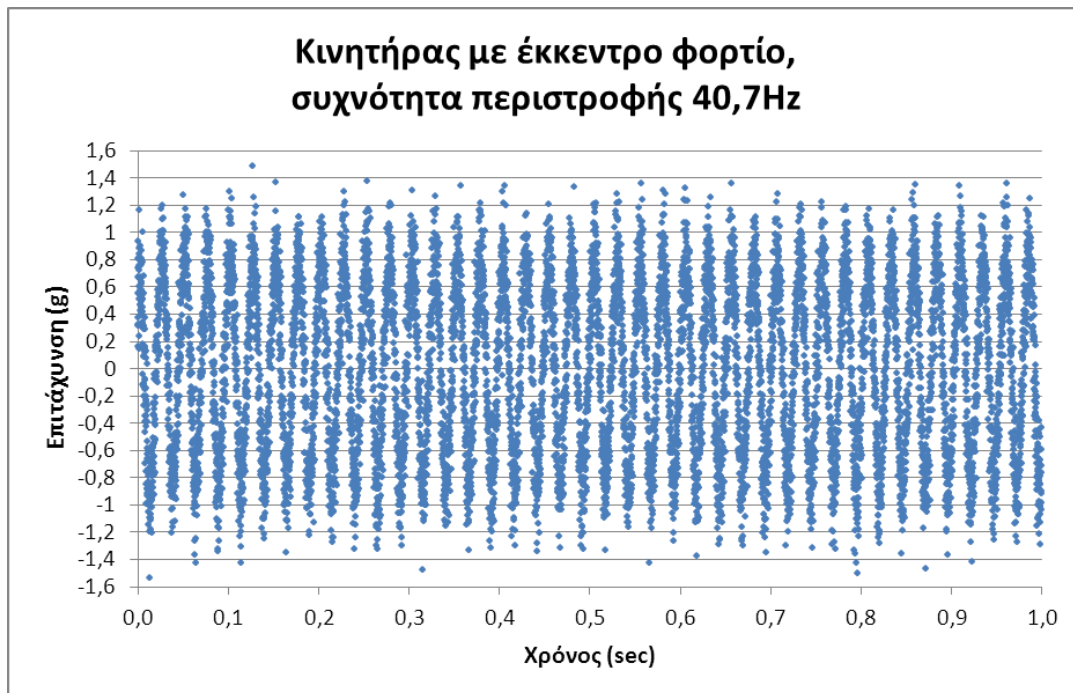
Παράμετροι λειτουργίας LabVIEW:

- Πλήθος μετρήσεων: 30.000
- Ρυθμός δειγματοληψίας: 6.000Hz
- εύρος της μετρούμενης συχνότητας του επαγωγικού αισθητήρα: 0-50
- διάστημα αποκλεισμού συχνοτήτων: 5
- χρόνος καταγραφής: 5sec

Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήμα 4-7 και Σχήμα 4-8.



Σχήμα 4-7: Πειραματικά αποτελέσματα LabVIEW, κινητήρας με έκκεντρο φορτίο, συχνότητα περιστροφής 40,7Hz



**Σχήμα 4-8: Τιμές επιτάχυνσης, κινητήρας χωρίς έκκεντρο φορτίο, συχνότητα περιστροφής 40,7Hz**

#### 4.2 Ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων

Στην πειραματική διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω μπορούν να διαχωριστούν δύο διακριτές περιπτώσεις εφαρμογής. Στην 1<sup>η</sup> περίπτωση ο κινητήρας περιστρέφεται ελεύθερα χωρίς την παρουσία έκκεντρου φορτίου στον άξονά του. Στην 2<sup>η</sup> περίπτωση όπου έχει τοποθετηθεί έκκεντρο φορτίο στον άξονα περιστροφής του και διενεργήθηκαν διαφορετικά πειράματα μεταβάλλοντας την τάση εισόδου του κινητήρα και συνεπακόλουθα την ταχύτητα περιστροφής του.

- 1<sup>η</sup> περίπτωση

Ο κινητήρας περιστρέφεται χωρίς έκκεντρο φορτίο, με συχνότητα περιστροφής 31,5Hz. Οι προκλυόμενες ταλαντώσεις χαρακτηρίζονται από μικρές τιμές επιτάχυνσης, της τάξης των  $0,5\text{m/sec}^2$ . Από την ανάλυση του μετασχηματισμού Fourier, δεν παρατηρείται κάποια κυρίαρχη συχνότητα, παρά μόνο απεικονίζονται τιμές υψηλών συχνοτήτων, μεγαλύτερες των 1000Hz, οι οποίες αποδίδονται στον "θόρυβο" του σήματος.

- 2<sup>η</sup> περίπτωση
  1. Ο κινητήρας περιστρέφεται με έκκεντρο φορτίο, με συχνότητα περιστροφής 33,6Hz. Οι προκλυόμενες ταλαντώσεις δεν διαφοροποιούνται από την 1<sup>η</sup> περίπτωση και χαρακτηρίζονται από μικρές τιμές επιτάχυνσης, της τάξης των 0,5m/sec<sup>2</sup>. Στα αποτελέσματα όμως της ανάλυσης Fourier παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση καθώς απεικονίζεται η κυρίαρχη συχνότητα περιστροφής των 20Hz. Παραμένουν όμως και ορισμένες τιμές υψηλών συχνοτήτων “θορύβου”.
  2. Ο κινητήρας περιστρέφεται με έκκεντρο φορτίο, ενώ η συχνότητα περιστροφής έχει αυξηθεί στην τιμή των 37,8Hz. Οι τιμές επιτάχυνσης των ταλαντώσεων αυξάνεται ελάχιστα πλησιάζοντας την τιμή των 0,6m/sec<sup>2</sup>. Παραμένει η συχνότητα των 20Hz της ανάλυσης Fourier, ενώ έχουν σχεδόν εξαλειφθεί οι τιμές υψηλών συχνοτήτων.
  3. Ο κινητήρας περιστρέφεται με έκκεντρο φορτίο, η συχνότητα περιστροφής βρίσκεται στην τιμή των 40,7Hz. Οι τιμές της επιτάχυνσης έχουν αυξηθεί σημαντικά στην περιοχή των 1,5m/sec<sup>2</sup>. Παραμένει η συχνότητα των 20Hz της ανάλυσης Fourier, ενώ έχουν εξαλειφθεί εξολοκλήρου οι τιμές υψηλών συχνοτήτων.

#### 4.2.1 Σύγκριση μετρούμενων τιμών ταχύτητας με τα κριτήρια δριμύτητας ταλάντωσης, ISO 2372, VDI 2056, BS 4675

Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο §2.5, τα όρια δριμύτητας ταλαντώσεων ορίζονται από τα κριτήρια ISO 2372, VDI 2056, BS 4675 συγκρίνοντας τις μετρούμενες τιμές ταχύτητας σε mm/s με τις τιμές των κριτηρίων κάθε κατηγορίας μηχανολογικής κατασκευής. Ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία ανήκει στην κατηγορία *Group K* η οποία αντιπροσωπεύει μικρές μηχανές έως 15kW.

Οι μετρούμενες τιμές και η σύγκρισή τους παρουσιάζονται στον Πίνακας 4.1.



**Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρούμενης ταχύτητας και σύγκρισης με τα όρια δριμύτητας ταλαντώσεων**

<b>Μετρούμενες τιμές ταχύτητας και σύγκρισή τους με τα κριτήρια δριμύτητας ταλάντωσης</b>			
<u>Περιοχή μετρήσεων 31 έως 40 Hz</u>			
<b>Συχνότητα περιστροφής κινητήρα (Hz)</b>	<b>Έκκεντρο φορτίο</b>	<b>Ταχύτητα (mm/s)</b>	<b>Κριτήριο δριμύτητας ταλάντωσης</b>
31,5	OXI	0,007	Καλή λειτουργία
33,6	ΝΑΙ	0,04	Καλή λειτουργία
37,8	ΝΑΙ	0,08	Καλή λειτουργία
40,7	ΝΑΙ	0,3	Καλή λειτουργία

Παρατηρούμε ότι και στις τέσσερις περιπτώσεις η λειτουργία του κινητήρα παρέμεινε στην 1<sup>η</sup> περιοχή του κριτηρίου δριμύτητας ταλάντωσης, το άνω όριο της οποίας βρίσκεται στην τιμή ταχύτητας 0,7mm/s. Εξάγουμε οπότε το συμπέρασμα ότι στα πλαίσια των τιμών των συχνοτήτων περιστροφής στα οποία πραγματοποιήθηκε το πείραμα η λειτουργία του κινητήρα δεν επηρεάζεται από τις προκλυόμενες ταλαντώσεις. Ανωτέρω όμως αύξηση της συχνότητας περιστροφής του δεδομένα θα οδηγήσει σε αύξηση της τιμής της ταχύτητας και την δυσμενέστερη λειτουργία του κινητήρα.

## 5. Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση των πειραματικών δοκιμών που διενεργήθηκαν στα πλαίσια της παρούσης Δ.Ε. κρίνεται απαραίτητη μία ανασκόπηση των κυριότερων σημείων της.

Βασικός στόχος της ΔΕ αποτέλεσε η κατάλληλη βαθμονόμηση και διασύνδεση των μεταλλακτών επιτάχυνσης και περιστροφής με σκοπό την μέτρηση των αντίστοιχων χαρακτηριστικών των προκλυόμενων από την κίνηση του κινητήρα ταλαντώσεων. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν χρονικά τα εξής βήματα:

- Επιλέχθηκε κατάλληλος στροβοσκοπικός δίσκος για την βαθμονόμηση του επαγωγικού αισθητήρα
- Τοποθετήθηκε ο δίσκος μέσω ομόκεντρου δίσκου από Plexiglas στον άξονα περιστροφής του κινητήρα
- Τροποποιήθηκε διάταξη με αρπάγες για την ορθή τοποθέτηση του επαγωγικού αισθητήρα για την μέτρηση της συχνότητας περιστροφής
- Διενεργήθηκε η κατάλληλη συνδεσμολογία του επαγωγικού αισθητήρα με τον ψηφιακό ελεγκτή, το καταγραφικό, και τον Η/Υ
- Πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση του
- Δημιουργήθηκε κατάλληλη εφαρμογή της γλώσσας προγραμματισμού LabVIEW για την επεξεργασία του σήματος από το επιταχυνσιόμετρο
- Τοποθετήθηκε το επιταχυνσιόμετρο σε κατάλληλη μεταλλική κατασκευή στην συσκευή ανάλυσης κοκκομετρίας και πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση του
- Διενεργήθηκε πείραμα μέτρησης κραδασμών στον σώμα του κινητήρα σε διάφορες συχνότητες περιστροφής, με και χωρίς έκκεντρο φορτίο με την ταυτόχρονη διασύνδεση και των δύο μεταλλακτών

Συμπερασματικά μπορεί να αναφερθεί ότι στην παρούσα ΔΕ υλοποιήθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα μέτρησης κραδασμών, το οποίο μπορεί να διαγνώσει την κυρίαρχη συχνότητα του φαινομένου αλλά και να εκτιμήσει τη σφοδρότητα μέσω υπολογισμού των αναπτυσσόμενων ταχυτήτων και σύγκρισής τους με τα διεθνή όρια των κριτηρίων ταλαντώσεων.

Παρατηρήθηκε ότι μικρή αύξηση στο ρυθμό περιστροφής δεν επιφέρει σημαντική επίπτωση στη συχνότητα των κραδασμών αλλά επιφέρει σημαντική αύξηση στις τιμές των αναπτυσσόμενων ταχυτήτων.

Διαπιστώθηκε η ανάγκη ύπαρξης φίλτρου χαμηλών συχνοτήτων για τις περιπτώσεις ολοκληρωτικών υπολογισμών προκειμένου να αποφεύγονται εσφαλμένα αποτελέσματα.

## 6. Βιβλιογραφία

- User's manual PCI-1710L Multifunction card w/o analog output.* (2003, November). Retrieved from [www.advantech.com](http://www.advantech.com)
- Εργαλεία συντήρησης και προϊόντα λίπανσης.* (2008). Retrieved from [www.skf.gr](http://www.skf.gr).
- Bitter, R., Mohiuddin, T., & Nawrocki, M. (2007). *LabVIEW Advanced Programming Technics* (2nd ed.). CRC Press.
- Digital indicator with linearisation and alarm contacts.* (n.d.). Retrieved August 1997, from [www.jumo.net](http://www.jumo.net)
- Harris, C. M., & Piersol, A. G. (2002). *Shock and vibration handbook*. McGraw-Hill.
- Installation conditions for inductive sensors.* . Retrieved November 2011, from [www.pepperl-fuchs.com](http://www.pepperl-fuchs.com)
- Lincoln, A. . *Calculating Velocity or Displacement from Acceleration Time Histories.* Retrieved from [www.prosig.com](http://www.prosig.com)
- Norton, M. P., & Karczub, D. G. (2003). *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers* (2nd ed.). (U. o. Cambridge, Ed.)
- Operating Instructions for sieving machine type AS 200 control.* Retrieved January 2010, from [www.retech.com](http://www.retech.com)
- Scheffer, C., & Gidnar, P. (2004). *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance.* Newnes.
- User's manual acceleration sensor BS 10.022.* Retrieved April 2001, from [www.schmidttechnology.de](http://www.schmidttechnology.de)
- User's manual Inductive sensor NBN 8-18GM50-E2.* Retrieved July 2011, from [www.pepperl-fuchs.com](http://www.pepperl-fuchs.com)
- User's manual logic control units, frequency current converter WEM Ex-FSU.* Retrieved October 1998, from [www.pepperl-fuchs.com](http://www.pepperl-fuchs.com)
- Wadensten, T. S. (1981, June). *Patent No. 4,425,813.* US.
- Westbury, E. T. (1951). *Notes on basic principles and practical methods of procedure basic principles.*
- Αντωνιάδης, Ι., & Γιακόπουλος, Χ. *Διαγνωστική βλαβών στρεφόμενου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.* Ε.Μ.Π.

Γ.Μυλωνάκης, Α. (2011). Πειραματική μελέτη επαναψύξεως υπερθερμανθισών επιφανειών σε πιέσεις 4 και 5 bar. Ε.Μ.Π.

Κανάραχος, Α. Ε., & Αντωνιάδης, Ι. (1998). *Δυναμική Μηχανών Ι* (1<sup>η</sup> εκδ.).

*Πιλοτικός Εξυπηρετητής της Μέσης Τεχνικής Επαγγελματικής Εκπαίδευσης Υ.Π.Π. Κύπρος*. Ανάκτηση από [www.ntee.net](http://www.ntee.net)